



ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



Πτυχιακή Εργασία

## Πρόσβαση σε υπηρεσίες φωνής video και δεδομένων με τη χρήση των δικτύων WiMAX



Της φοιτήτριας  
Δημοράγκα Παρασκευής  
Αρ. Μητρώου: 02/1935

Επιβλέπων καθηγητής  
Πούλακας Γεώργιος  
Εργαστ. Συνεργάτης Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

Θεσσαλονίκη 2011







.....  
Δημοράγκα Θ. Παρασκευή

Φοιτήτρια Πληροφορικής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

Copyright © Δημοράγκα Θ. Παρασκευή, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Αλεξάνδρειου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Θεσσαλονίκης.



## **Πρόλογος**

Η IPTV (Internet Protocol Television) τεχνολογία είναι μία από τις αναδυόμενες υπηρεσίες στο χώρο της οικιακής ψυχαγωγίας. Η ολοένα και αυξανόμενη αποδοχή της από το καταναλωτικό κοινό οδηγεί τους κατασκευαστές των τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς και τους φορείς παροχής αυτής της υπηρεσίας, στην αναζήτηση νέων μεθόδων διάθεσης για την εξυπηρέτηση μεγαλύτερου πλήθους συνδρομητών αλλά και για τη βελτίωση χαρακτηριστικών της όπως είναι η ποιότητα της εικόνας και του ήχου.





## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας υπήρξε η μελέτη των μεθοδολογιών διανομής των υπηρεσιών της IPTV (Internet Protocol Television) τεχνολογίας μέσω των WiMAX ασύρματων δικτύων.

Αρχικά στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή και επισκόπηση των διαθέσιμων ασύρματων τεχνολογιών ορισμένων για την κατανόηση των ομοιοτήτων και των διαφορών τους συγκριτικά με το WiMAX. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται οι έννοιες της VoIP τεχνολογίας και του VoD (Video on Demand) το οποίο είναι μία από της προσφερόμενες υπηρεσίες της IPTV τεχνολογίας. Κατόπιν στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η IPTV τεχνολογία και στο 4<sup>ο</sup> η λειτουργία των WiMAX δικτύων όπου είναι το αντικείμενο μελέτης για τη διανομή της IPTV τεχνολογίας. Τέλος στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των μεθοδολογιών που έχουν προταθεί έως σήμερα για τη διανομή της IPTV τεχνολογίας μέσω των WiMAX δικτύων, οι οποίες στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας και της ρυθμοαπόδοσης της. Επιπλέον γίνεται αναφορά σε ερευνητικές προκλήσεις και τη βιωσιμότητα της στο μέλλον.



## **Abstract**

The objective of this thesis was the study of the approaches of distributions of IPTV (Internet Protocol Television) services via WiMAX wireless networks.

For starters, in the first chapter there is the history of the available wireless technologies up to date towards the understanding of their similarities and differences in comparison to WiMAX. In the second chapter, the notions of VoIP and VoD (Video on Demand- an IPTV service) are analysed. Furthermore, in the third chapter there is a presentation of the IPTV technology and in fourth chapter the use of WiMAX networks which is the object of study of the distribution of IPTV technology. Last but not least, in the fifth chapter, the analysis of the approaches that have been suggested up to date for the distribution of IPTV technology via WiMAX networks is being made which are targeted towards the improvement of the picture quality and of its throughput. Moreover, there is a reference in the research challenges and its viability in the future.



## Ευρετήριο Περιεχομένων

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Κεφάλαιο 1.....                                  | 1  |
| Επισκόπηση των ασύρματων τεχνολογιών.....        | 1  |
| 1.1 Εισαγωγή.....                                | 3  |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή ασύρματων τεχνολογιών..... | 3  |
| 1.3 Κατηγορίες ασύρματων τεχνολογιών.....        | 4  |
| 1.4 Γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας.....       | 5  |
| 1.4.1 Κινητά δίκτυα 1ης γενιάς.....              | 6  |
| 1.4.2 Κινητά δίκτυα 2ης γενιάς.....              | 7  |
| 1.4.2.1 GSM.....                                 | 8  |
| 1.4.3 Κινητά δίκτυα γενιάς 2.5.....              | 10 |
| 1.4.3.1 HSCSD.....                               | 11 |
| 1.4.3.2 GPRS.....                                | 12 |
| 1.4.3.3 CDMA2000 1xRTT.....                      | 13 |
| 1.4.4 Κινητά δίκτυα γενιάς 2.75.....             | 14 |
| 1.4.4.1 EDGE.....                                | 14 |
| 1.4.5 Κινητά δίκτυα 3ης γενιάς.....              | 14 |
| 1.4.5.1 UMTS.....                                | 15 |
| 1.4.5.2 CDMA2000 1xEV-DO.....                    | 16 |
| 1.4.6 Κινητά δίκτυα 3.5 γενιάς.....              | 17 |
| 1.4.6.1 HSDPA.....                               | 17 |
| 1.4.6.2 HSPA+.....                               | 18 |
| 1.4.7 Κινητά δίκτυα 3.9 γενιάς.....              | 18 |
| 1.4.7.1 LTE.....                                 | 19 |
| 1.4.7.2 EV-DO Rev-A & Rev-B.....                 | 20 |
| 1.4.8 Κινητά δίκτυα 4ης γενιάς.....              | 21 |
| 1.4.8.1 LTE Advanced.....                        | 21 |
| 1.4.8.2 IEEE 802.16m.....                        | 22 |
| 1.5 Ασύρματα δίκτυα δεδομένων.....               | 22 |
| 1.5.1 Ασύρματα προσωπικά δίκτυα.....             | 23 |
| 1.5.1.1 Bluetooth.....                           | 24 |
| 1.5.1.2 Ultra-Wideband.....                      | 27 |
| 1.5.1.3 ZigBee.....                              | 29 |
| 1.5.2 Ασύρματα τοπικά δίκτυα.....                | 33 |
| 1.5.3 Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα.....         | 39 |
| 1.5.3.1 WiMAX.....                               | 40 |
| 1.5.3.4 HiperAccess και HiperMAN.....            | 42 |
| 1.5.4 Ασύρματα περιφερειακά δίκτυα.....          | 43 |
| 1.6 Επίλογος.....                                | 46 |
| 1.7 Βιβλιογραφία.....                            | 49 |
| Κεφάλαιο 2.....                                  | 53 |
| Voice over IP & Video on Demand.....             | 53 |
| 2.1 Εισαγωγή.....                                | 55 |
| 2.2 Voice over IP.....                           | 55 |
| 2.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....       | 57 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.2 Πρωτόκολλα σηματοδότησης .....                    | 59  |
| 2.2.2.1 H.323.....                                      | 60  |
| 2.2.2.2 Session Initiation Protocol .....               | 60  |
| 2.2.3 Softswitch.....                                   | 61  |
| 2.2.4 Ποιότητα φωνής.....                               | 63  |
| 2.2.5 Τεχνικές μέτρησης ποιότητας.....                  | 65  |
| 2.2.5.1 MOS.....                                        | 65  |
| 2.2.5.2 PSQM.....                                       | 65  |
| 2.2.6 Παραβιάσεις ασφαλείας.....                        | 66  |
| 2.2.7 Υποστήριξη υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης.....        | 68  |
| 2.3 Video on Demand.....                                | 69  |
| 2.3.1 Τύποι VoD υπηρεσιών.....                          | 70  |
| 2.3.2 Λογισμικό VoD server.....                         | 73  |
| 2.3.3 VoD πρωτόκολλα διανομής.....                      | 75  |
| 2.3.3.1 Real-Time Transport Protocol .....              | 75  |
| 2.3.3.2 Real - Time Control Protocol.....               | 77  |
| 2.3.3.3 Real - Time Streaming Protocol .....            | 78  |
| 2.3.3.4 Resource Reservation Protocol.....              | 80  |
| 2.4 Επίλογος.....                                       | 81  |
| 2.5 Βιβλιογραφία.....                                   | 83  |
| Κεφάλαιο 3.....                                         | 85  |
| Internet Protocol Television.....                       | 85  |
| 3.1 Εισαγωγή.....                                       | 87  |
| 3.2 Διαφορές μεταξύ IPTV και Internet TV.....           | 88  |
| 3.3 Δομή ενός δικτύου IPTV.....                         | 89  |
| 3.4 Βασικές υπηρεσίες IPTV.....                         | 91  |
| 3.4.1 Εκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης.....                  | 91  |
| 3.4.1.1 Οργανισμοί τυποποίησης ψηφιακής τηλεόρασης..... | 92  |
| 3.4.2 Video on Demand (VoD).....                        | 94  |
| 3.5 Παράγοντες ανάπτυξης IPTV.....                      | 95  |
| 3.6 Οργανισμοί τυποποίησης IPTV.....                    | 95  |
| 3.7 Τεχνολογίες δικτύων διανομής IPTV.....              | 97  |
| 3.7.1 IPTV διαμέσου οπτικών ινών.....                   | 97  |
| 3.7.1.2 AON δίκτυα.....                                 | 102 |
| 3.7.2 IPTV διαμέσου DSL δικτύων.....                    | 102 |
| 3.7.2.1 ADSL.....                                       | 102 |
| 3.7.2.2 ADSL2 .....                                     | 104 |
| 3.7.2.3 VDSL.....                                       | 105 |
| 3.7.3 IPTV διαμέσου δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης.....  | 106 |
| 3.7.3.2 IPTV διαμέσου DOCSIS.....                       | 108 |
| 3.7.4 IPTV διαμέσου δορυφορικών δικτύων.....            | 113 |
| 3.7.5 IPTV διαμέσου ασύρματων τεχνολογιών.....          | 114 |
| 3.7.5.1 Fixed & mobile WiMAX.....                       | 114 |
| 3.7.5.2 Ασύρματα δημοτικά δίκτυα βρόχου.....            | 115 |
| 3.7.5.3 3G τεχνολογίες δικτύου.....                     | 117 |
| 3.8 Τεχνολογίες πυρήνα δικτύου IPTV.....                | 118 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8.1 ATM και SONET/SDH .....                                         | 118 |
| 3.8.2 IP και MPLS .....                                               | 119 |
| 3.8.3 Metro Ethernet .....                                            | 121 |
| 3.9 Παράγοντες δικτύου που επηρεάζουν την ανάπτυξη της IPTV.....      | 123 |
| 3.10 Πραγματικόχρονη κωδικοποίηση .....                               | 124 |
| 3.10.1 MPEG συμπίεση.....                                             | 125 |
| 3.10.1.1 MPEG-2.....                                                  | 126 |
| 3.10.1.2 MPEG-4 Part 10 AVC/H.264.....                                | 132 |
| 3.10.2 VC-1 συμπίεση.....                                             | 136 |
| 3.11 Επικοινωνιακό μοντέλο IPTV.....                                  | 137 |
| 3.12 Μεθοδολογίες διανομής IPTV περιεχομένου.....                     | 145 |
| 3.12.1 Unicast.....                                                   | 145 |
| 3.12.2 Broadcast.....                                                 | 146 |
| 3.12.3 Multicast.....                                                 | 146 |
| 3.13 Αρχιτεκτονική πολυεκπομπής δικτύου IPTV.....                     | 148 |
| 3.13.1 Συσκευές IGMP .....                                            | 148 |
| 3.13.2 Ομάδες πολυεκπομπής και διευθυνσιοδότηση.....                  | 149 |
| 3.13.3 IPTV πρωτόκολλα πολυεκπομπής.....                              | 150 |
| 3.13.3.1 IGMPv1.....                                                  | 150 |
| 3.13.3.2 IGMPv2.....                                                  | 151 |
| 3.13.3.3 IGMPv3.....                                                  | 152 |
| 3.13.4 Αρχιτεκτονική multicast μετάδοσης.....                         | 154 |
| 3.13.4.1 Δέντρα multicast μετάδοσης.....                              | 154 |
| 3.13.4.2 Πρωτόκολλα multicast δρομολόγησης.....                       | 157 |
| 3.13.4.3 Λειτουργία IGMP Snooping και IGMP proxy.....                 | 159 |
| 3.14 Λειτουργία αλλαγής καναλιών.....                                 | 160 |
| 3.14.1 Βασικές αρχές της αλλαγής καναλιών.....                        | 162 |
| 3.14.1.1 Επιλογή καναλιού.....                                        | 163 |
| 3.14.1.2 Εναλλαγή καναλιών.....                                       | 165 |
| 3.14.2 Τεχνικές μείωσης απαιτούμενου χρόνου αλλαγής καναλιών.....     | 166 |
| 3.15 Ποιότητα Υπηρεσίας IPTV.....                                     | 168 |
| 3.17 Ασφάλεια τεχνολογίας IPTV.....                                   | 171 |
| 3.17.1 CA συστήματα ασφαλείας.....                                    | 171 |
| 3.17.1.1 CA συστήματα προσανατολισμένα στο υλικό.....                 | 172 |
| 3.17.1.2 CA συστήματα προσανατολισμένα στο λογισμικό.....             | 177 |
| 3.17.1.3 Υβριδικά CA συστήματα.....                                   | 180 |
| 3.17.2 DRM συστήματα ασφαλείας.....                                   | 180 |
| 3.17.2.1 Αρχιτεκτονική υλικού και λογισμικού ενός DRM συστήματος..... | 180 |
| 3.18 Επίλογος.....                                                    | 184 |
| Βιβλιογραφία.....                                                     | 186 |
| Κεφάλαιο 4.....                                                       | 187 |
| WiMAX.....                                                            | 187 |
| 4.1 Εισαγωγή.....                                                     | 189 |
| 4.2 WiMAX Forum.....                                                  | 190 |
| 4.3 Δομή δικτύου WiMAX.....                                           | 191 |
| 4.3.1 Τοπολογίες σύνδεσης δικτύου.....                                | 193 |

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.1.1 Point-To- Point.....                                                 | 193 |
| 4.3.1.2 Point-To-Consecutive-Point.....                                      | 193 |
| 4.3.1.3 Point-To-Multipoint.....                                             | 194 |
| 4.3.1.4 Τοπολογία πλέγματος.....                                             | 194 |
| 4.3.1.5 Multi-Hop Relay .....                                                | 196 |
| 4.4 Υποστηριζόμενες ζώνες συχνοτήτων .....                                   | 197 |
| 4.5 WiMAX πρότυπα.....                                                       | 199 |
| 4.5.1 IEEE 802.16.....                                                       | 199 |
| 4.5.2 IEEE 802.16a.....                                                      | 200 |
| 4.5.3 IEEE 802.16-2004.....                                                  | 201 |
| 4.5.4 IEEE 802.16e-2005.....                                                 | 202 |
| 4.5.5 IEEE 802.16f-2005.....                                                 | 204 |
| 4.5.6 IEEE 802.16j-2009.....                                                 | 204 |
| 4.5.7 IEEE 802.16m.....                                                      | 205 |
| 4.6 Τεχνολογία Έξυπνων Κεραιών.....                                          | 205 |
| 4.6.1 Συστήματα Κεραιών Πολλαπλής Εισόδου/Εξόδου.....                        | 205 |
| 4.6.2 Προσαρμοστικά συστήματα κεραίων.....                                   | 208 |
| 4.7 Εφαρμογές WiMAX.....                                                     | 210 |
| 4.8 Πλεονεκτήματα WiMAX.....                                                 | 211 |
| 4.9 Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης.....                                           | 212 |
| 4.9.1 Επίπεδο Σύγκλισης .....                                                | 214 |
| 4.9.2 Κοινό Επίπεδο.....                                                     | 214 |
| 4.9.3 Υποεπίπεδο ασφαλείας.....                                              | 214 |
| 4.9.4 Καταστολή κεφαλίδας πακέτων .....                                      | 214 |
| 4.9.5 Σύνδεσεις και ροές υπηρεσίας.....                                      | 215 |
| 4.9.6 Κατάταξη και απεικόνιση των MAC SDUs.....                              | 218 |
| 4.9.7 Επίπεδο σύγκλισης και ποιότητα υπηρεσίας.....                          | 219 |
| 4.9.7.1 Κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας.....                                     | 220 |
| 4.9.8 MAC διευθύνσεις και πλαίσια.....                                       | 222 |
| 4.9.9 Τεμαχισμός, πακετοποίηση και συναλύσωση.....                           | 223 |
| 4.9.10 Μηχανισμοί αίτησης και κατανομής εύρους ζώνης.....                    | 224 |
| 4.9.11.1 Περιαγωγή.....                                                      | 225 |
| 4.9.11.2 Μεταπομπή.....                                                      | 226 |
| 4.9.12 Λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας.....                              | 229 |
| 4.9.13 Θέματα ασφαλείας στο WiMAX.....                                       | 231 |
| 4.9.13.1 Πιστοποιητικό X.509.....                                            | 232 |
| 4.9.13.2 Πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού και ασφαλείας .....                 | 233 |
| 4.9.13.3 Συσχετίσεις ασφαλείας .....                                         | 234 |
| 4.9.13.4 HMAC αλγόριθμος κρυπτογράφησης .....                                | 235 |
| 4.9.13.5 Διαδικασία έγκρισης προτύπου IEEE 802.16-2004.....                  | 235 |
| 4.9.13.6 Διαδικασία έγκρισης IEEE 802.16e και IEEE 802.16-2009 προτύπων..... | 236 |
| 4.9.13.7 Ζητήματα ασφαλείας προτύπου IEEE 802.16j – 2009.....                | 238 |
| 4.10 Φυσικό επίπεδο.....                                                     | 241 |
| 4.10.1 FDD και TDD τεχνικές μετάδοσης.....                                   | 242 |
| 4.10.2 Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας.....                        | 243 |



|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.10.3 Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης και υποκαναλοποίηση.....                      | 245 |
| 4.10.4 Δομή θυρίδας και πλαισίου.....                                                                   | 248 |
| 4.10.5 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση.....                                                   | 251 |
| 4.10.6 Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.....                                                                  | 253 |
| 4.10.7 Παραλλαγές διεπαφών φυσικού επιπέδου.....                                                        | 253 |
| 4.11 Επίλογος.....                                                                                      | 255 |
| 4.12 Βιβλιογραφία.....                                                                                  | 256 |
| Κεφάλαιο 5.....                                                                                         | 257 |
| IPTV over WiMAX.....                                                                                    | 257 |
| 5.1 Εισαγωγή.....                                                                                       | 259 |
| 5.2 Πλεονεκτήματα IPTV over WiMAX.....                                                                  | 260 |
| 5.3 Τεχνολογικές προκλήσεις.....                                                                        | 261 |
| 5.4 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική.....                                                                     | 262 |
| 5.5 Multicast διανομή IPTV over WiMAX συστήματος.....                                                   | 267 |
| 5.5.1 Superposition Coded Multicasting τεχνική δύο επιπέδων.....                                        | 268 |
| 5.6 Βέλτιστη κατανομή ρυθμού μετάδοσης για την εξελικτική multicast διανομή βίντεο μέσω του WiMAX.....  | 271 |
| 5.6.1 Προτεινόμενο σχήμα βέλτιστης κατανομής του ρυθμού μετάδοσης.....                                  | 272 |
| 5.6.2 Επιλογή συνδυασμών των σχημάτων διαμόρφωσης.....                                                  | 273 |
| 5.6.3 Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου για τη μείωση της πολυπλοκότητας.....                                  | 275 |
| 5.7 Cross-layer σχεδιασμός για την ανθεκτική διανομή IPTV υπηρεσιών μέσω WiMAX.....                     | 276 |
| 5.7.1 Προγενέστερες μελέτες.....                                                                        | 276 |
| 5.7.2 Εξελικτική κωδικοποίηση βίντεο.....                                                               | 278 |
| 5.7.3 Layered MDC.....                                                                                  | 280 |
| 5.7.4 Τροποποιημένη Layered MDC τεχνική.....                                                            | 282 |
| 5.7.5 Cross-Layer Superposition Coded Multicast.....                                                    | 283 |
| 5.7.6 Επιλογή βέλτιστης κατανομής ισχύος.....                                                           | 287 |
| 5.8 Συνεργατική multicast διανομή IPTV υπηρεσιών μέσω WiMAX δικτύων.....                                | 288 |
| 5.8.1 Επιλογή multicast ομάδας.....                                                                     | 291 |
| 5.8.2 Συνεργατική μετάδοση.....                                                                         | 292 |
| 5.8.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....                                                                    | 293 |
| 5.9 Αξιολόγηση QoS παραμέτρων για τη μέτρηση της ποιότητας διανομής IPTV βίντεο μέσω δικτύου WiMAX..... | 296 |
| 5.9.1 Ποιότητα βίντεο σε περιπτώσεις δοκιμών κάτω ζεύξης.....                                           | 300 |
| 5.9.2 Ποιότητα βίντεο σε περιπτώσεις δοκιμών άνω ζεύξης.....                                            | 302 |
| 5.11 Επίλογος.....                                                                                      | 306 |
| 5.12 Βιβλιογραφία.....                                                                                  | 307 |



# Ευρετήριο σχημάτων και πινάκων

## I. Σχήματα

**Σχήμα 1.1** Κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας των διάφορων ασύρματων δικτύων διανομής δεδομένων

**Σχήμα 1.2** Στοίβα επιπέδων ZigBee προδιαγραφής

**Σχήμα 1.3** Τοπολογία αστέρα ενός ZigBee δικτύου

**Σχήμα 1.4** Τοπολογία δέντρου ενός ZigBee δικτύου

**Σχήμα 1.5** Τοπολογία βρόχου ενός ZigBee δικτύου

**Σχήμα 1.6** Παράδειγμα υλοποίησης ενός WLAN δικτύου

**Σχήμα 1.7** OSI και HiPerLAN2 μοντέλα αναφοράς

**Σχήμα 1.8** Εμβέλεια λειτουργίας του IEEE 802.22 προτύπου

**Σχήμα 2.1** Χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα για τη δρομολόγηση των ροών δεδομένων

**Σχήμα 2.2** Συστατικά στοιχεία softswitch

**Σχήμα 2.3** Σύστημα διανομής EVoD

**Σχήμα 2.4** Εγκαθίδρυση VoD ροής

**Σχήμα 2.5** Ενθυλάκωση RTP πακέτου

**Σχήμα 2.6** Στοίβα RTP πρωτοκόλλων

**Σχήμα 2.7** RTSP μοντέλο επικοινωνίας

**Σχήμα 3.1** Απλοποιημένο διάγραμμα ενός IPTV συστήματος

**Σχήμα 3.2** IPTV FTTH δίκτυο με χρήση των PON τεχνολογιών

**Σχήμα 3.3** Αρχιτεκτονική IPTV με χρήση εξοπλισμού ADSL

**Σχήμα 3.4** Παράδειγμα HFC δικτύου

**Σχήμα 3.5** Παράδειγμα HFC IPTV αρχιτεκτονικής

**Σχήμα 3.6** Δικτυακή υποδομή DOCSIS 3.0

**Σχήμα 3.7** IPTV διανομή μέσω δορυφόρων

**Σχήμα 3.8** Αρχιτεκτονική ασύρματου δημοτικού δικτύου βρόχου

**Σχήμα 3.9** Υποδομή IPTV δικτύου πυρήνα

**Σχήμα 3.10** MPLS τοπολογία δικτύου πυρήνα

**Σχήμα 3.11** Χρήση Ethernet εικονικών συνδέσεων για τη διασύνδεση κατά μήκος του δικτύου πυρήνα

**Σχήμα 3.12** Ιεραρχική δομή μιας MPEG ροής βίντεο

**Σχήμα 3.13** Σειρά κωδικοποίησης και μεταφοράς των frames μιας ακολουθίας

**Σχήμα 3.14** Interframe μηχανισμός κωδικοποίησης

**Σχήμα 3.15** Υποστηριζόμενα μεγέθη blocks από το H.264/AVC

**Σχήμα 3.16** Εναλλαγή βίντεο ροών με τη χρήση SP-frames

**Σχήμα 3.17** Επικοινωνιακό μοντέλο IPTV

**Σχήμα 3.18** Unicast συνδέσεις χρηστών ενός καναλιού

**Σχήμα 3.19** IP συνδέσεις multicast τεχνικής

**Σχήμα 3.20** Αρχιτεκτονική multicast διανομής με τη χρήση του IGMP

**Σχήμα 3.21** Απλοποιημένο παράδειγμα IPTV multicast SPT

**Σχήμα 3.22** Απλοποιημένο παράδειγμα IPTV multicast διαμοιραζόμενου δέντρου

**Σχήμα 3.23** Παράδειγμα χρήσης του πρωτοκόλλου PIM-SM

**Σχήμα 3.24** Πιθανά βήματα επιλογής ενός IPTV καναλιού

**Σχήμα 3.25** Αλλαγή IPTV καναλιών

**Σχήμα 3.26** Κύρια συστατικά στοιχεία ενός hardware centric CA συστήματος

**Σχήμα 3.27** Συστατικά στοιχεία client CA συστήματος

**Σχήμα 3.28** Κύρια συστατικά στοιχεία ενός software centric CA συστήματος

**Σχήμα 3.29** Αρχιτεκτονική ενός IPTV DRM συστήματος

**Σχήμα 4.1** Περιοχή κάλυψης του IEEE 802.16 δικτύου

**Σχήμα 4.2** Παράδειγμα IEEE 802.16 δικτύου

**Σχήμα 4.3** PTP τοπολογία σύνδεσης

**Σχήμα 4.4** PTM τοπολογία σύνδεσης

**Σχήμα 4.5** Τοπολογία πλέγματος

**Σχήμα 4.6** Multi-hop τοπολογία σύνδεσης

**Σχήμα 4.7** MIMO σύστημα κετραίων, 2x2

**Σχήμα 4.8** WiMAX σταθμός βάσης με χρήση AAS beamforming συστήματος

**Σχήμα 4.9** WiMAX σταθμός βάσης με χρήση πολλαπλών κεραιών και AAS

**Σχήμα 4.10** Υποεπίπεδα MAC επιπέδου

**Σχήμα 4.11** Απεικόνιση συνδέσεων και ροών υπηρεσιών

**Σχήμα 4.12** Ταξινόμηση και CID απεικόνιση

**Σχήμα 4.13** Κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας

**Σχήμα 4.14** Γενική μορφή ενός MAC frame ή MAC PDU

**Σχήμα 4.15** Ομαδοποίηση σταθμών βάσης σε paging groups

**Σχήμα 4.16** Παράδειγμα αρχιτεκτονικής multi-hop relay συστήματος

**Σχήμα 4.17** Αρχιτεκτονική ασφαλείας multi-hop relay συστήματος

**Σχήμα 4.18** Εγκαθίδρυση ζωνών ασφαλείας για τη multihop αναμετάδοση

**Σχήμα 4.19** Πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας

**Σχήμα 4.20** Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας

**Σχήμα 4.21** Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης

**Σχήμα 4.22** Υποκαναλοποίηση άνω ζεύξης

**Σχήμα 4.23** Δομή ενός TDD frame

**Σχήμα 5.1** Αρχιτεκτονική διανομής IPTV υπηρεσιών για σταθερούς WiMAX συνδρομητές

**Σχήμα 5.2** Mapping και demapping διαδικασία κατά τη μεταφορά πακέτων

**Σχήμα 5.3** Διανομή IPTV υπηρεσιών για σταθερούς και εν κινήσει WiMAX συνδρομητές

**Σχήμα 5.4** Στοιβά πρωτοκόλλων για τη διανομή IPTV εφαρμογών

**Σχήμα 5.5** QoS υποστήριξη MAC επιπέδου

**Σχήμα 5.6** Multicast μετάδοση βίντεο σε υπό την ποικιλόμορφη εξασθένιση των καναλιών

**Σχήμα 5.7** Διαφορά ισχύος μεταξύ των χρηστών ενός ασύρματου συστήματος

**Σχήμα 5.8** Προτεινόμενο σχήμα multicast μετάδοσης δύο επιπέδων με τη χρήση superposition κωδικοποίησης

**Σχήμα 5.9 (α), (β)** Σύγκριση του PSNR μεταξύ του παραδοσιακού σχήματος μετάδοσης και του προτεινόμενου 2-level SPCM σχήματος για το SS1 και το SS10 αντίστοιχα

**Σχήμα 5.10** Κλιμακώσιμες bit ροές με L επίπεδα ποιότητας

**Σχήμα 5.11** Συνάρτηση αλλοίωσης βίντεο ως προς το πλήθος των ληφθέντων ροών διαφορετικών επιπέδων ενός GoF

**Σχήμα 5.12** Παραγωγή των PUs από τα συμβατικά Layered MDC πακέτα

**Σχήμα 5.13** Παραγωγή των PUs από τα τροποποιημένα Layered MDC πακέτα με φθίνουσα του μήκους των bytes του  $K_i$  από τα χαμηλότερα επίπεδο ποιότητας προς τα υψηλότερα

**Σχήμα 5.14** PUs επιπέδου  $i$  που διαμορφώνονται από τον RS( $N, K_i$ )

**Σχήμα 5.15** Μετάδοση όλων των PUs όλων των επιπέδων μιας ροής μέσω της SPCM από το BS

**Σχήμα 5.16** Αποθήκευση των PUs του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> επιπέδου στους B1 και B2 buffers για το σχηματισμό cross-layer SPCM σημάτων

**Σχήμα 5.17** Ανάκτηση πλήρους ποιότητας ενός GoF υπό την ποικιλόμορφη εξασθένιση κάθε SS

**Σχήμα 5.18** Προτεινόμενο σχήμα multicast διανομής

**Σχήμα 5.19** Steady-state service πιθανότητα για κάθε multicast ομάδα

**Σχήμα 5.20** Ομαλοποιημένη ρυθμοαπόδοση κάθε μέλους της multicast ομάδας

**Σχήμα 5.21** Ρυθμοαπόδοση δικτύου για διάφορες τιμές της C αναλογίας κάλυψης

**Σχήμα 5.22** Σχεδιάγραμμα δικτύου δοκιμής

**Σχήμα 5.23** Απώλεια πακέτων κάτω (α) και άνω ζεύξης (β) ως προς τις διάφορες συνθήκες καναλιού

**Σχήμα 5.24** Μετρήσεις jitter κάτω (α) και άνω ζεύξης (β) ως προς διάφορες συνθήκες καναλιού

**Σχήμα 5.25** Ποιότητα HD καναλιού σε περιπτώσεις δοκιμών υπό διαφορετικές συνθήκες

**Σχήμα 5.26** HDTV και SDTV ποιότητα για περιπτώσεις δοκιμών υπό διαφορετικές συνθήκες καναλιού

## II. Πίνακες

**Πίνακας 1.1** Τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύων 1<sup>ης</sup> γενιάς

**Πίνακας 1.2** Τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύων 2<sup>ης</sup> γενιάς

**Πίνακας 1.3** Τεχνικά χαρακτηριστικά 2.5G και 2.75G δικτύων

**Πίνακας 1.4** Κλάσεις ισχύος Bluetooth προϊόντων

**Πίνακας 1.5** Σύγκριση χωρικής ικανότητας μεταξύ των WPAN προτύπων

**Πίνακας 1.6** Σύγκριση χαρακτηριστικών των WPAN τεχνολογιών

**Πίνακας 1.7** Κύρια χαρακτηριστικά των 802.11b, 802.11a και 802.11g προτύπων

**Πίνακας 2.1** Μετρήσεις καθυστέρησης κατά τη χρήση των διάφορων τύπων codecs

**Πίνακας 3.1** Σύγκριση των διαφόρων PON τεχνολογιών

**Πίνακας 3.2** Χαρακτηριστικά εκδόσεων του DOCSIS

**Πίνακας 3.3** Διαφορές μεταξύ DOCSIS και EuroDOCSIS

**Πίνακας 3.4** Χαρακτηριστικά εκδόσεων του DOCSIS

**Πίνακας 3.5** Διαφορές μεταξύ DOCSIS και EuroDOCSIS

**Πίνακας 4.1** Συχνότητες λειτουργίας WiMAX ανά τον κόσμο

**Πίνακας 4.2** Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ανά σχήμα διαμόρφωσης και μέγεθος καναλιού προδιαγραφής 802.16.1

**Πίνακας 4.3** Συγκριτικός πίνακας IEEE 802.16, 802.16a, 802.16-2004 και 802.16e προτύπων

**Πίνακας 4.4** Περιπτώσεις εφικτών μεταπομπών

**Πίνακας 4.5** Μέγεθος υποφερόντων σε διαφορετικά πρότυπα και διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης

**Πίνακας 4.6** Υποστηριζόμενα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης φυσικού επιπέδου

**Πίνακας 4.7** Ρυθμοί μετάδοσης φυσικού επιπέδου με διαφορετικό εύρος ζώνης καναλιού

**Πίνακας 4.8** Παραλλαγές διεπαφών φυσικού επιπέδου

**Πίνακας 5.1** Παράμετροι προσομοίωσης

**Πίνακας 5.2** Χαρακτηριστικά WiMAX δικτύου δοκιμής

**Πίνακας 5.3** Ρυθμοαπόδοσης WiMAX σύνδεσης

**Πίνακας 5.4** Περιπτώσεις ελέγχου ως προς την κωδικοποίηση του βίντεο και το σχήμα διαμόρφωσης

---

# Κεφάλαιο 1

## Επισκόπηση των ασύρματων τεχνολογιών

---





## 1.1 Εισαγωγή

Οι ασύρματες τεχνολογίες αποτελούν στις μέρες μας το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα του κλάδου των τηλεπικοινωνιών. Με τα κινητά τηλέφωνα να έχουν γίνει αναπόσπαστο εργαλείο της καθημερινής ζωής των ανθρώπων των ανεπτυγμένων χωρών, τον εκθετικό ρυθμό ανάπτυξης των κυψελοειδών συστημάτων, τη διάδοση των φορητών Η/Υ και των Η/Υ παλάμης, σήμερα οι ασύρματες τεχνολογίες συμπληρώνουν ή αντικαθιστούν ένα μεγάλο τμήμα των ενσύρματων τεχνολογιών τόσο στο περιβάλλον των επιχειρήσεων όσο και στο οικιακό περιβάλλον. Ωστόσο υπάρχουν ακόμη πολλές τεχνικές προκλήσεις για τον εύρωστο σχεδιασμό των ασύρματων τεχνολογιών ώστε να παρέχουν τις αναγκαίες επιδόσεις για την υποστήριξη των αναδυόμενων εφαρμογών.

## 1.2 Ιστορική αναδρομή ασύρματων τεχνολογιών

Οι πρώτες ασύρματες μορφές επικοινωνίας εμφανίστηκαν πριν από την εποχή της βιομηχανίας με τις πληροφορίες να μεταδίδονται με σήματα καπνού, φακούς σηματοδότησης, φωτοβολίδες, κ.λπ. Οι αποστάσεις που κάλυπτε η μετάδοση των πληροφοριών αυτών απαιτούσε την οπτική επαφή (Line Of Sight - LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτές οι αρχικές μορφές επικοινωνίας αργότερα αντικαταστάθηκαν από τον τηλεγράφο και μεταγενέστερα από το τηλέφωνο.

Το 1888 στη Γερμανία παράγεται πρώτο ραδιοφωνικό κύμα από το φυσικό Heinrich Rudolf Hertz, όπου και καθιερώθηκε ως τρόπος επικοινωνίας το 1894. Για τη λήψη των ραδιοκυμάτων με μορφή σήματος χρησιμοποιήθηκαν καλώδια τηλεγράφου. Κατόπιν ο Herz άνοιξε το δρόμο για τη χρήση του ραδιοφώνου, της τηλεόρασης και των ραντάρ με την ανακάλυψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Χάρη στον Ιταλό εφευρέτη Marchese Guglielmo Marconi, από το 1901 η διάδοση των σημάτων αυτών μπορούσε να διασχίσει τον Ατλαντικό ωκεανό. Τα αρχικά αυτά συστήματα μετέδιδαν αναλογικά σήματα με τα περισσότερα από αυτά σήμερα να κάνουν χρήση ψηφιακών σημάτων ενώ ακολούθησε η τεχνολογία της μετάδοσης των σημάτων σε πακέτα που χαρακτηρίζεται από την άνιση ροή μετάδοσης δεδομένων.

Το 1971 μια ομάδα ερευνητών του πανεπιστημίου της Χαβάης δημιούργησε το ALOHANET το οποίο αποτέλεσε το πρώτο ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless

Local Access Network - WLAN) μεταγωγής πακέτων (packet switching), το οποίο αποτελούνταν από επτά Η/Υ οι οποίοι επικοινωνούσαν αμφίδρομα μεταξύ τους με τη χρήση τοπολογίας αστέρα. Το ALOHANET ενσωμάτωσε την πρώτη σειρά πρωτοκόλλων για την πρόσβαση στα κανάλια και τη δρομολόγηση των πακέτων, με πολλές από τις βασικές αρχές των πρωτοκόλλων αυτών να χρησιμοποιούνται έως σήμερα. Ο πρώτος τύπος WLANs δικτύων χρησιμοποιούσε την «ελεύθερη» (unlicensed) ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 902 και 928 MHz η οποία λόγω συνωστισμού προκαλούσε παρεμβολές [1] και έτσι η τεχνολογία αυτή έπρεπε να εκσυγχρονισθεί. Με το δεύτερο τύπο WLANs δικτύων επιτεύχθηκαν ταχύτητες τέσσερις φορές μεγαλύτερες από αυτές του προκάτοχού του οι οποίες άγγιξαν τα 2 Mbps. Σήμερα χρησιμοποιείται ένας τρίτος τύπος WLANs δικτύων ο οποίος επιτυγχάνει τις ίδιες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων με αυτές του δεύτερου τύπου.

Το 1990 δημιουργήθηκε η 802.11 ομάδα εργασίας για τη δημιουργία WLANs προτύπων. Το 1997 το IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11) έγινε αποδεκτό ως πρότυπο μετάδοσης δεδομένων για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα με λειτουργία ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1 και 2 Mbps [2].

### **1.3 Κατηγορίες ασύρματων τεχνολογιών**

Οι ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης κατηγοριοποιούνται σε αυτές που προσανατολίζονται στη μετάδοση φωνής (voice oriented) και σε αυτές που προσανατολίζονται στη μετάδοση δεδομένων (data oriented). Οι voice oriented ασύρματες τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί γύρω από την ασύρματη σύνδεση στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN - Public Switched Telephone Network) και υποδιαιρούνται περεταίρω στα τοπικής και ευρείας εμβέλειας δίκτυα. Τα δίκτυα τοπικής εμβέλειας βασίζονται σε συσκευές μικρής κινητικότητας, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και υψηλής ποιότητας σήματος φωνής συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων τηλεφώνων κυψελοειδούς τεχνολογίας, των PCS (Personal Communication Service)<sup>[1]</sup> συστημάτων και των ασύρματων ιδιωτικών τηλεφωνικών κέντρων PBX (Private Branch Exchange) τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση τηλεφώνων μέσα σε ένα κτίριο ή γραφείο. Τα

δίκτυα ευρείας εμβέλειας χρησιμοποιούν τερματικά με μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος, πλήρους κάλυψης, και μικρότερης ποιότητας υπηρεσιών φωνής. Οι data-oriented ασύρματες τεχνολογίες εξελίχθηκαν γύρω από το διαδίκτυο και κατηγοριοποιούνται με τη σειρά τους στα τοπικά ευρυζωνικά (Local Area Networks - LANs) και ad-hoc δίκτυα και στα δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Networks - WANs) δεδομένων. Τα τοπικά ευρυζωνικά και ad-hoc δίκτυα περιλαμβάνουν τα WLANs δίκτυα και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Access Networks - WPANs) [3].

#### 1.4 Γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας

Τα ασύρματα κινητά συστήματα επικοινωνιών ταξινομούνται από τους κατασκευαστές των κυψελοειδών τηλεφωνικών συστημάτων και τους φορείς παροχής υπηρεσιών σε διάφορες γενεές. Στα 1<sup>ης</sup> γενιάς (1<sup>st</sup> Generation - 1G) συστήματα ανήκουν τα αναλογικά κυψελοειδή κινητά τηλέφωνα αποκλειστικά για τη μετάδοση υπηρεσιών φωνής, ενώ στα 2<sup>ης</sup> γενιάς (2<sup>nd</sup> Generation - 2G) ασύρματα δίκτυα ανήκουν τα voice-oriented μερικώς ψηφιακά κυψελοειδή συστήματα, τα PCS (Personal Communication Service) συστήματα και τα data-oriented ασύρματα δίκτυα ευρείας και τοπικής εμβέλειας. Τα 3<sup>ης</sup> γενιάς (3<sup>rd</sup> Generation - 3G) δίκτυα ενσωματώνουν τις κυψελοειδείς και PCS υπηρεσίες φωνής με ποικίλες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων σε ένα ενοποιημένο δίκτυο. Η κύρια διαφορά μεταξύ των 2G και 3G συστημάτων είναι ότι τα 2G συστήματα λειτουργούν στις «ελεύθερες» ζώνες συχνοτήτων ενώ τα 3G συστήματα λειτουργούν στις «αδειοδοτούμενες» (licensed) ζώνες συχνοτήτων [4]. Σήμερα βρίσκονται υπό ανάπτυξη τα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς (4<sup>th</sup> Generation - 4G) τα οποία στοχεύουν στην ενοποίηση των WWANs, WLANs και WPANs δικτύων [5].

[1] Η ονομασία PCS αποδίδεται στα συστήματα που χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων των 1900 MHz (1850 – 1990 MHz) στις περιοχές των ΗΠΑ, του Καναδά και του Μεξικού. Τα CDMA, D-AMPS και GSM συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτές τις συχνότητες. Εκτός των ΗΠΑ τα PCS συστήματα συνηθίζεται να αναφέρονται ως GSM-1900 ενώ στο Χονγκ Κονγκ είναι γνωστά ως GSM-1800.

#### 1.4.1 Κινητά δίκτυα 1<sup>ης</sup> γενιάς

Η πρώτη και δεύτερη γενιά κυψελοειδών συστημάτων ανήκει στη κατηγορία των WWANs δικτύων. Το AMPS (Advanced Mobile Phone System) το οποίο εισήχθη στις ΗΠΑ το 1979 αλλά χρησιμοποιήθηκε και στις περιοχές της Αυστραλίας και της Κίνας, υπήρξε το πρώτο δημόσιο αναλογικό κυψελοειδές σύστημα κινητής τηλεφωνίας με λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων των 800 MHz. Κατά τη διάρκεια των αρχών της δεκαετίας του '80, στη δυτική Ευρώπη εισήχθη το NMT-450 (Nordic Mobile Telephony 450) το οποίο λειτουργούσε στη ζώνη συχνοτήτων των 450 MHz και αποτέλεσε το πρώτο ευρέως διαδεδομένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Σε κάποιες χώρες της Ευρώπης και στην Ιαπωνία υιοθετήθηκε το TACS (Total Access Communication System) με λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Τα συστήματα αυτά δεν ήταν διαλειτουργικά μεταξύ τους και συνεπώς η περιαγωγή (roaming) των χρηστών μεταξύ των χωρών της Ευρώπης δεν ήταν δυνατή.

Τα 1G συστήματα χρησιμοποιούσαν δύο διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για την εκπομπή και τη λήψη (τεχνική Frequency Division Duplexing - FDD), εύρους ζώνης 25 MHz η κάθε μία, οι οποίες υποδιαιρούνταν κατόπιν σε κανάλια. Το κάθε κανάλι μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από ένα χρήστη [6] και προορίζονταν για την παροχή υπηρεσιών φωνής και τη μετάδοση κάποιων δεδομένων με μεταγωγή κυκλώματος σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (περίπου 9.6 kbps) χρήση της FDMA (Frequency Division Multiple Access) τεχνικής ως μέθοδος πρόσβασης στο κανάλι [5]. Κατά τη χρήση της αναλογικής διαμόρφωσης συχνότητας από τα 1G συστήματα, οι απαιτήσεις ισχύος εξαρτώνται από το εύρος ζώνης της μετάδοσης [4, 5]. Δεδομένου του γεγονότος ότι η ισχύς μετάδοσης συσχετίζεται με το εύρος κάλυψης, η μείωση του εύρους ζώνης μετάδοσης ανά χρήστη μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του μεγέθους του κελιού ενός κυψελοειδούς δικτύου. Η ακτίνα της περιοχής κάλυψης ενός κελιού μπορεί να είναι μικρότερη του 1 Km στις πυκνοκατοικημένες ενώ μπορεί να φθάσει έως τα 30 Km στις αραιοκατοικημένες περιοχές. Η μείωση του μεγέθους των κελιών αυξάνει το πλήθος τους και συνεπώς το κόστος εγκατάστασης της δικτυακής υποδομής, επειδή κάθε κελί διαθέτει ένα σταθμό βάσης για την υλοποίηση και τη δρομολόγηση των κλήσεων. Στα μειονεκτήματα των συστημάτων πρώτης γενιάς μπορούμε να αναφέρουμε την περιορισμένη χωρητικότητα, τις ογκώδεις και υψηλού κόστους συσκευές που χρησιμοποιούσαν οι χρήστες [7] καθώς και την έλλειψη ασφαλείας εξαιτίας της

απουσίας της κρυπτογράφησης (encryption) και του γεγονότος ότι ένας άλλος δέκτης συντονισμένος στη σωστή συχνότητα μπορούσε να ακούσει τη συνομιλία άλλων προσώπων [6]. Επιπλέον η διαδικασία της μετάβασης σε άλλο κελί ή διαφορετικά μεταπομπή (handover) ήταν αναξιόπιστη με αποτέλεσμα οι κλήσεις συχνά να τερματίζονται περιορίζοντας σημαντικά την κινητικότητα του χρήστη.

Ο πίνακας 1.1 που ακολουθεί παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των διάφορων 1G δικτύων.

#### 1.4.2 Κινητά δίκτυα 2<sup>ης</sup> γενιάς

Γενικά τα συστήματα πρώτης γενιάς δεν παρείχαν περιθώρια βελτίωσης για την εφαρμογή τεχνικών όπως η συμπίεση και η κωδικοποίηση οι οποίες προϋποθέτουν τη χρήση του ψηφιακού συστήματος και για το λόγο αυτό καταργήθηκαν. Ο κύριος στόχος των 2G συστημάτων ήταν η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας ενός συστήματος. Η χωρητικότητα των 2G συστημάτων είναι τριπλάσια αυτής των 1G συστημάτων. Τα 2G συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα ψηφιακής κρυπτογράφησης των συνομιλιών αλλά και τη χαμηλού ρυθμού (16 - 32 kbps) [5] μετάδοση υπηρεσιών δεδομένων, για υπηρεσίες όπως αυτή της αποστολής σύντομων γραπτών μηνυμάτων (Short Message Service - SMS).

**Πίνακας 1.1** Τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύων 1<sup>ης</sup> γενιάς [8]

|                                         | <b>NTT</b> | <b>NMNT 450</b> | <b>AMPS</b> | <b>ETACS</b> | <b>N-AMPS</b> | <b>J-TACS</b> |
|-----------------------------------------|------------|-----------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| <b>Year Introduced</b>                  | 1979       | 1981            | 1983        | 1985         | 1991          | 1988          |
| <b>Location</b>                         | Japan      | Europe          | N. America  | Europe       | N. America    | Japan         |
| <b>Modulation</b>                       | FM         | FM              | FM          | FM           | FM            | FM            |
| <b>Multiple Access</b>                  | FDMA       | FDMA            | FDMA        | FDMA         | FDMA          | FDMA          |
| <b>Duplex</b>                           | FDD        | FDD             | FDD         | FDD          | FDD           | FDD           |
| <b>Forward channel (downlink) range</b> | n/a        | 463-468 MHz     | 869-894 MHz | 935-960 MHz  | 869-894 MHz   | 925 MHz       |
| <b>Reverse channel (uplink) range</b>   | n/a        | 453-458 MHz     | 824-849 MHz | 890-915 MHz  | 824-849 MHz   | 860 MHz       |
| <b>Channel Bandwidth</b>                | 25 KHz     | 25 KHz          | 30 KHz      | 25 KHz       | 10 KHz        | 25 KHz        |
| <b>Channel Separation</b>               | n/a        | 10 MHz          | 45 MHz      | 45 MHz       | 45 MHz        | n/a           |
| <b>Number of Channels</b>               | n/a        | 200             | 832         | 1000         | 2496          | n/a           |

Άλλες υπηρεσίες οι οποίες πρωτοεμφανίστηκαν με την έλευση των δικτύων δεύτερης γενιάς ήταν η αναγνώριση κλήσεων, η αποστολή FAX και η περιορισμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Σε ένα τέτοιο ψηφιακό σύστημα η ψηφιακή συμπίεση της φωνής σε σχέση με την αναλογική συμπίεση των 1G συστημάτων επιτρέπει τη διεξαγωγή περισσότερων κλήσεων ταυτόχρονα για ένα δεδομένο εύρος ζώνης. Η ψηφιακή κωδικοποίηση της φωνής επιτρέπει τον έλεγχο των σφαλμάτων κατά τη μετάδοση αυξάνοντας έτσι την ποιότητα της. Τα συστήματα αυτά σχεδιάστηκαν ώστε οι συσκευές τους να εκπέμπουν με τη χρήση μικρότερης ισχύος, συνεπώς τα κελιά είναι μικρότερα και περισσότερα [9]. Εν αντιθέσει με τα 1G συστήματα στα οποία ο διαχωρισμός των χρηστών για την ταυτόχρονη ασύρματη πρόσβαση στο μέσο γινόταν χρήση της FDMA (Frequency Division Multiple Access) τεχνικής, στα συστήματα δεύτερης γενιάς ο διαχωρισμός των χρηστών γίνεται είτε με την TDMA (Time Division Multiple Access) είτε με τη CDMA (Code Division Multiple Access) τεχνική.

Τα κύρια πρότυπα που χρησιμοποιούνται από τα 2G συστήματα είναι το IS-95 (ή CDMA) το οποίο προήλθε από το AMPS και υιοθετήθηκε για χρήση όχι τόσο στην Ευρώπη όσο στη Β. Αμερική και σε κάποια μέρη της Ασίας με λειτουργία στη ζώνη των 800 MHz και ρυθμούς μετάδοσης 14.4 Kbps. Από το IS-95 επήλθε το IS-95B (ή CDMAone [10]). Επιπλέον το IS-136 TDMA (ή D-AMPS [10]) με λειτουργία στη συχνότητα των 800 MHz από το οποίο προέκυψε και το GSM (Global System for Mobile Communications ή ακριβέστερα Groupe Spécial Mobile) [9]. Το AMPS και το IS-95 χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων χωρίς να προκαλούνται παρεμβολές λόγω της χρήσης διαφορετικών καναλιών.

#### **1.4.2.1 GSM**

Στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης η ανάγκη δημιουργίας ενός ενιαίου συστήματος που θα εξυπηρετούσε όλους τους χρήστες ανεξαρτήτως σε ποια Ευρωπαϊκή χώρα βρίσκονται οδήγησε στη δημιουργία του GSM υπό την επίβλεψη του Ευρωπαϊκού Τεχνικού Ινστιτούτου Προτύπων (European Technical Standard Institute - ETSI). Το GSM βασίζεται στη GSM/3GPP οικογένεια προδιαγραφών. Το 3GPP (3rd Generation Partnership Project ) είναι ένα πρόγραμμα συνεργασίας

μεταξύ ομάδων που απαρτίζονται από εταιρείες τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να καταστήσουν εφαρμόσιμες τις 3G προδιαγραφές στα πλαίσια του IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) προγράμματος της ITU (International Telecommunication Union). Οι 3GPP προδιαγραφές βασίζονται στην ανάπτυξη των GSM προδιαγραφών.

Ένα GSM σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σε τέσσερις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, στη ζώνη των 850 MHz για την περιοχή του Καναδά, των 900 και 1800 MHz για την περιοχή της Ευρώπης και στη ζώνη των 1900 MHz για την Αμερική [11]. Ο ρυθμός μετάδοσης για τα GSM 900 δίκτυα είναι 9.6 Kbps και για τα GSM 1800 δίκτυα 14.4 Kbps. Πολλές GSM συσκευές χρησιμοποιούν δύο (dual-band), τρεις (tri-band) ή και τις τέσσερις (quad-band) από αυτές τις ζώνες, έτσι ώστε κατά τη μετακίνησή τους να προσαρμόζονται στο εκάστοτε τοπικό σύστημα συχνοτήτων [12]. Η ζώνη των 900 MHz για την οποία είχε συμφωνηθεί η αποκλειστική χρήση της από τις GSM υπηρεσίες [13], χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, τη 935 - 960 MHz ζώνη για την εκπομπή και τη 890 - 915 MHz ζώνη για τη λήψη, ενώ πιο σπάνια κάποιες χώρες υιοθετούν για τη λειτουργία του GSM τις ζώνες των 400 και 450 MHz οι οποίες χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν από τα 1G συστήματα [11]. Κάθε ζώνη υποδιαιρείται σε 124 φέρουσες συχνότητες σε απόσταση 200 KHz η μία από την άλλη. Κατόπιν κάθε φορέας διαιρείται περαιτέρω με τη χρήση της TDMA σε 8 χρονοθυρίδες (timeslots), κάθε μία από τις οποίες αναπαριστά ένα κανάλι. Συνεπώς στο δίκτυο υπάρχει η δυνατότητα 124 X 8 ταυτόχρονων κλήσεων συνομιλίας [10]. Αναφορικά με τα μειονεκτήματά τους, τα GSM είναι connection-oriented δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος με αποτέλεσμα την ανεπαρκή χρήση του εύρους ζώνης και των διαθέσιμων πόρων. Επιπλέον τα GSM δεν είναι συμβατά με τα TCP/IP δίκτυα εξαιτίας των διαφορών του υλικού, του λογισμικού και των πρωτοκόλλων, καθώς επίσης δε μπορούν να χειριστούν τη μετάδοση σύνθετων δεδομένων όπως είναι το βίντεο [7].

Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων 2<sup>ης</sup> γενιάς.

**Πίνακας 1.2** Τεχνικά χαρακτηριστικά δικτύων 2<sup>ης</sup> γενιάς [14]

|                                               | <b>GSM 900</b> | <b>USDC IS-54</b> | <b>IS-136 IS-54 RevC</b> | <b>DCS-1800</b> | <b>IS-95</b> | <b>DCS-1900</b> |
|-----------------------------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Year Introduced</b>                        | 1990           | 1990              | 1991                     | 1993            | 1993         | 1994            |
| <b>Location</b>                               | Europe         | N. America        | N. America               | Europe          | N. America   | N. America      |
| <b>Modulation</b>                             | GMSK           | $\pi/4$ DPSK      | $\pi/4$ DPSK             | GMSK            | QPSK         | GMSK            |
| <b>Multiple Access</b>                        | TDMA           | TDMA              | TDMA                     | TDMA            | CDMA         | TDMA            |
| <b>Duplex</b>                                 | FDD            | FDD               | FDD                      | FDD             | FDD          | FDD             |
| <b>Forward channel (downlink) Range (MHz)</b> | 935-960        | 869-894           | 869-894                  | 1805-1880       | 1930-1990    | 1850-1910       |
| <b>Reverse channel (uplink) range (MHz)</b>   | 890-915        | 824-849           | 824-849                  | 1710-1785       | 1850-1910    | 1930-1990       |
| <b>Channel Bandwidth</b>                      | 200 KHz        | 30 KHz            | 30 KHz                   | 200 KHz         | 1250 KHz     | 200 KHz         |
| <b>Channel Separation</b>                     | 45 MHz         | 45 MHz            | 45 MHz                   | 95 MHz          | n/a          | 80 MHz          |
| <b>Number of Channels</b>                     | 124            | 832               | 136-198                  | 374             | 4-12         | 299             |

### 1.4.3 Κινητά δίκτυα γενιάς 2.5

Τα 2.5G δίκτυα αποτελούν το σκαλοπάτι για τη μετάβαση από τις 2G στις 3G ασύρματες κυψελοειδείς τεχνολογίες. Ο όρος 2.5G χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα 2G συστήματα τα οποία εκτός από τη μετάδοση μεταγωγής κυκλώματος, χρησιμοποιούν τη μετάδοση μεταγωγής πακέτων χωρίς να παρέχουν απαραίτητως μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης [15]. Το πρώτο σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των δικτύων GSM σε 3G δίκτυα έγινε με την εισαγωγή της GPRS (General Packet Radio Service) υπηρεσίας. Ομοίως μέσω της εισαγωγής του CDMA2000 1xRTT προτύπου, επετεύχθη η ανάπτυξη της CDMA2000 οικογενείας 3G προτύπων. Τα πρότυπα της οικογενείας αυτής είναι συμβατά με το CDMAone το οποίο ανήκει επίσης στη 2.5G γενιά. Τα κύρια 2.5G πρότυπα περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν.



#### **1.4.3.1 HSCSD**

Το HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) ανήκει στη GSM/3GPP οικογένεια προδιαγραφών. Τα HSCSD είναι δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος επιτρέποντας τη χρήση των χρονοθυρίδων (ή διαφορετικά των καναλιών) των GSM δικτύων και συνεπώς λειτουργούν σε περιοχές που πραγματοποιείται μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες 9.6 Kbps. Ο περιορισμός της ταχύτητας των 9.6 kbps των GSM δικτύων οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο ένα από τα οκτώ πιθανά TDMA κανάλια χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των δεδομένων από το χρήστη. Ο περιορισμός αυτός που τίθεται στα GSM δίκτυα μπορεί να αρθεί από ένα HSCSD δίκτυο με τη μείωση του ελέγχου των σφαλμάτων. Το HSCSD εφαρμόζει μια πιο ελαστική πολιτική παρέχοντας διαφορετικά επίπεδα διόρθωσης σφαλμάτων ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης όταν οι συνθήκες μετάδοσης είναι καλές, αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων στα 14.4 kbps στα μέρη του δικτύου που μπορεί να γίνει η μείωση του ελέγχου των σφαλμάτων. Μία ακόμη καινοτομία του HSCSD είναι η δυνατότητα χρήσης δύο έως τεσσάρων καναλιών μετάδοσης ταυτοχρόνως επιτυγχάνοντας την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης έως 57.6 Kbps (δηλαδή  $4 \times 14.4$  Kbps). Ακόμη και σε άσχημες συνθήκες καναλιού όπου απαιτείται διόρθωση σφαλμάτων υψηλού επιπέδου, επιτυγχάνεται ρυθμός μετάδοσης 38.4 Kbps, τέσσερις φορές μεγαλύτερος σε σχέση με το GSM. Συνεπώς καθίσταται δυνατή για τους χρήστες η σύνδεση με το διαδίκτυο. Το κόστος χρήσης του HSCSD είναι μεγαλύτερο, καθώς η χρέωση των χρηστών γίνεται ανάλογα με τον αριθμό των χρονοθυρίδων που τους ανατίθεται για τη συνολική χρονική περίοδο που μία τηλεφωνική κλήση είναι ενεργή. Το βασικό μειονέκτημα των HSCSD δικτύων έγκυται στο γεγονός ότι η χρήση της μεταγωγής κυκλώματος δεν κάνει αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου, αφού οι χρονοθυρίδες δεσμεύονται ακόμη και όταν η χωρητικότητά τους δε χρησιμοποιείται. Ο πίνακας 1.3 παρουσιάζει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά ενός HSCSD δικτύου [16].

**Πίνακας 1.3** Τεχνικά χαρακτηριστικά 2.5G και 2.75G δικτύων [14]

|                                         | <b>HSCSD</b> | <b>GPRS</b> | <b>IS-95B</b> | <b>EDGE</b> |
|-----------------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| <b>Year Introduced</b>                  | 1999         | 1999        | 1999          | 1999        |
| <b>Location</b>                         | Europe       | Europe      | N. America    | Europe      |
| <b>Modulation</b>                       | GMSK         | GMSK        | QPSK          | 8-PSK       |
| <b>Multiple Access</b>                  | TDMA         | TDMA        | CDMA          | TDMA        |
| <b>Duplex</b>                           | FDD          | FDD         | FDD           | FDD         |
| <b>Forward channel (downlink) range</b> | 935-960 MHz  | 935-960 MHz | 1930-1990 MHz | 935-960 MHz |
| <b>Reverse channel (uplink) range</b>   | 890-915 MHz  | 890-915 MHz | 1850-1910 MHz | 890-915 MHz |
| <b>Channel Bandwidth</b>                | 200 KHz      | 200 KHz     | 1250 KHz      | 200 KHz     |
| <b>Channel Separation</b>               | 45 MHz       | 45 MHz      | n/a           | 45 MHz      |
| <b>Number of Channels</b>               | 124          | 124         | n/a           | 124         |

#### 1.4.3.2 GPRS

Το GPRS είναι ένα πρότυπο μεταγωγής πακέτων το οποίο βασίζεται επίσης στη GSM/3GPP οικογένεια προδιαγραφών, στόχος της δημιουργίας του οποίου ήταν η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε σύγκριση με αυτόν των GSM δικτύων. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές διαδικτύου όπως αυτές του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, της περιήγησης ιστοσελίδων, του intranet καθώς και αυτές των πολυμεσικών υπηρεσιών. Το GPRS επιτρέπει την αποστολή και τη λήψη δεδομένων με ρυθμούς που κυμαίνονται από 14.4 έως 115 Kbps (μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης) ανάλογα με το πόσα από τα οκτώ διαθέσιμα TDMA κανάλια χρησιμοποιούνται. Καθότι το GPRS αποτελεί ένα σύστημα μεταγωγής πακέτων κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ όλων των χρηστών στα πλαίσια ενός κελιού. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων μεταγωγής πακέτων είναι ότι είναι ικανά να αποστέλλουν και να λαμβάνουν δεδομένα χωρίς να απαιτείται η

αναμονή για την εγκαθίδρυση της κλήσης (call set-up) όπως συμβαίνει στην περίπτωση των 2G δικτύων. Επιπλέον δεδομένου ότι οι GPRS συσκευές τηλεφώνου υποστηρίζουν τη μετάδοση μεταγωγής πακέτων και τη μετάδοση μεταγωγής κυκλώματος για την πραγματοποίηση των τηλεφωνικών συνδιαλέξεων, επιτρέπεται στους χρήστες να λαμβάνουν κλήσεις ταυτοχρόνως με την αποστολή ή η λήψη δεδομένων. Η μετάδοση μεταγωγής πακέτων είναι πιο οικονομική δεδομένου ότι οι συνδρομητές χρεώνονται βάσει του όγκου των δεδομένων και όχι βάσει της διάρκειας της κλήσης και για αυτό το λόγο η GPRS τεχνολογία επικρατεί της HSCSD τεχνολογίας [17]. Προκειμένου να υλοποιηθεί ένα GPRS δίκτυο, στην αρχιτεκτονική του GSM δικτύου απαιτείται η προσθήκη ενός GPRS κόμβου (GPRS Node - GGSN) για τη διεπαφή μεταξύ του σταθμού βάσης (Base Station - BS) και του δικτύου μεταγωγής πακέτων (IP ή X.25).

#### **1.4.3.3 CDMA2000 1xRTT**

Το CDMA2000 1xRTT (IS-2000) βασίζεται στη 3GPP2 οικογένεια προδιαγραφών. Το 3GPP2 όπως και το 3GPP, είναι ένα πρόγραμμα συνεργασίας μεταξύ ομάδων που απαρτίζονται από εταιρείες τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να καταστήσουν εφαρμόσιμες τις 3G προδιαγραφές στα πλαίσια του IMT-2000 προγράμματος της ITU. Πιο συγκεκριμένα το 3GPP2 προσδιορίζει τις προδιαγραφές για εκείνες τις 3G τεχνολογίες οι οποίες βασίζονται στο IS-95 (CDMA). Το CDMA2000 1xRTT ικανοποιεί τις απαιτήσεις του IMT-2000 της ITU και όπως υποδηλώνεται από το όνομα του χρησιμοποιεί τη CDMA τεχνική για την πρόσβαση στο κανάλι. Με την προσθήκη 64 επιπλέον καναλιών έχει σχεδόν διπλάσια χωρητικότητα συγκριτικά με το CDMAone. Υποστηρίζει θεωρητικά μέγιστο ρυθμό μετάδοσης έως 153 Kbps με την πραγματική ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων να κυμαίνεται μεταξύ 60 και 100 Kbps. Το IMT-2000 εισάγει αλλαγές στο επίπεδο σύνδεσης των δεδομένων (data link layer) συμπεριλαμβάνοντας πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο και στη σύνδεση (medium and link access protocols) καθώς και QoS (Quality of Service) μηχανισμών, σε σχέση με το CDMAone το οποίο παρέχει μόνο BE (Best Effort) διανομή για τα κανάλια μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων [15].

#### **1.4.4 Κινητά δίκτυα γενιάς 2.75**

Ο όρος 2.75G χρησιμοποιείται για τα EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) δίκτυα τα οποία είναι γρηγορότερα συγκριτικά με τα GPRS, αλλά πιο αργά από τα χαρακτηριστικά 3G δίκτυα. Αν και τα EDGE δίκτυα είναι επικυρωμένα από την ITU ως μια 3G τεχνολογία δεν επιτυγχάνουν τους ρυθμούς μετάδοσης των 3G δικτύων και για αυτό θεωρούνται 2.75G δίκτυα [18]

##### **1.4.4.1 EDGE**

Το 2003 τα GPRS δίκτυα μετεξελίχθηκαν στα EDGE δίκτυα, τα οποία προσφωνούνται και EGPRS (Enhanced GPRS) και συνεπώς ανήκουν και αυτά στη GSM/3GPP οικογένεια προδιαγραφών. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1.3, η EDGE προδιαγραφή εκτός της GMSK κάνει χρήση και της 8PSK (Phase Shift Keying) διαμόρφωσης σήματος, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 473.6 Kbps κατά τη χρήση των οκτώ υπάρχοντων GSM χρονοθυρίδων και 547.2 Kbps όταν δε χρησιμοποιείται η τεχνική διόρθωσης σφαλμάτων. Το νέο χαρακτηριστικό που συναντάται στα EDGE δίκτυα σε σύγκριση με τα GPRS, είναι ότι τα EDGE δίκτυα αποστέλλουν περισσότερες πλεονάζουσες πληροφορίες αυξάνοντας την πιθανότητα της επιτυχούς αποκωδικοποίησης.

Επιπλέον του EDGE προτύπου, υπάρχει και το Evolved EDGE το οποίο αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή του EDGE όπου με τη χρήση των 32QAM (Quadrature Amplitude Modulation) και 16QAM σχημάτων διαμόρφωσης επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης 400 Kbps με μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps. Συνεπώς οι εν κινήσει χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν σύνδεση στο διαδίκτυο αντίστοιχη με αυτή μιας ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) υπηρεσίας ρυθμού μετάδοσης 500 Kbps [9, 19].

#### **1.4.5 Κινητά δίκτυα 3ης γενιάς**

Τα πρότυπα 3ης γενιάς δημιουργήθηκαν στα πλαίσια του έργου IMT-2000 υπό την επίβλεψη της ITU και τα οποία ορίστηκαν γενικά υπό την UMTS (Universal Mobile Telecommunication Service) επωνυμία. Τα πρώτα 3G UMTS δίκτυα ήταν

διαθέσιμα στο καταναλωτικό κοινό της Ιαπωνίας το 2002 η οποία δεν υποστήριζε προηγουμένως το GSM [20]. Παρά την πρόθεση να υπάρξει ένα ενιαίο παγκόσμιο 3G σύστημα αυτό δεν κατέστη εφικτό με συνέπεια να αναπτυχθούν τρεις διαφορετικές εκδόσεις των 3G συστημάτων, κάθε μία από τις οποίες αναπτύχθηκε πάνω από ένα υπάρχον 2G σύστημα. Οι κύριες τεχνολογίες που περιλαμβάνονται στα 3G συστήματα είναι για την περιοχή της Ευρώπης το UMTS το οποίο χρησιμοποιεί τη W-CDMA (Wideband CDMA) τεχνική πρόσβασης στο κανάλι και για την Αμερική το CDMA2000 το οποίο χρησιμοποιεί τη MC-CDMA (Multi-Carrier CDMA) τεχνική. Τα 3G συστήματα σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε να είναι εφικτή η περιαγωγή σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη και επιπλέον να υποστηρίζουν δίκτυα όπως είναι το GSM900 και το GSM1800 στις περιοχές όπου οι 3G υπηρεσίες δεν είναι διαθέσιμες [21]. Τα κύρια 3G συστήματα περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

#### **1.4.5.1 UMTS**

Το UMTS είναι ένα σύστημα μεταγωγής πακέτων που βασίζεται στο GSM (δηλαδή ανήκει στη 3GPP οικογένεια προδιαγραφών) και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, έως 144 Kbps για τους εν κίνηση σε τροχαίες ταχύτητες χρήστες, έως 384 Kbps για τους πεζούς και έως 2 Mbps για τους σταθερούς χρήστες [21]. Για να υπογραμμιστεί η στενή σχέση του UMTS με το GSM πολλές φορές πωλείται με την επωνυμία 3GSM και εκτός Ευρώπης είναι επίσης γνωστό με την επωνυμία W-CDMA. Το UMTS μπορεί να λειτουργήσει και σε συνδυασμό με δορυφορικές συνδέσεις. Οι ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας του UMTS καθορίστηκαν στα 1885 - 2025 MHz και στα 2110 - 2200 MHz για την άνω και κάτω ζεύξη και στα 1980 - 2010, 2170 - 2200 MHz για την άνω και κάτω ζεύξη του δορυφορικού μέρους των UMTS στην Αμερική [20]. Το υψηλό εύρος ζώνης λειτουργίας του UMTS επιτρέπει τη χρήση υπηρεσιών όπως είναι η IPTV (Internet Protocol Television) [20] και επίσης αναπτύσσεται έτσι ώστε να αποτελεί και ένα είδος 4G τεχνολογίας. Σε αντίθεση με τα EDGE και CDMA2000 δίκτυα το UMTS απαιτεί νέους σταθμούς βάσης και τον ορισμό νέων ζωνών συχνοτήτων για τη λειτουργία του. Ένα σημαντικό πρόβλημα αξιοπιστίας που τέθηκε από τα UMTS δίκτυα ήταν αυτό της μεταπομπής μεταξύ ενός UMTS και ενός GSM δικτύου,

καθώς η μεταπομπή ήταν εφικτή προς μία μόνο κατεύθυνση (από το UMTS στο GSM). Σήμερα το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται πλέον [20].

#### **1.4.5.2 CDMA2000 1xEV-DO**

Το CDMA2000 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized), συχνά αποκαλούμενο ως EV-DO ή EV, είναι εξ' ολοκλήρου ένα πρότυπο μεταγωγής πακέτων της 3GPP2 οικογένειας προδιαγραφών για τη διαδικτυακή ευρυζωνική πρόσβαση, το οποίο αναπτύχθηκε το 1999 για να εκπληρώσει τις απαιτήσεις που τίθενται από το IMT-2000. Παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες από άλλα υπάρχοντα CDMA δίκτυα ή άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το GPRS και το EDGE, χρησιμοποιώντας τη CDMA καθώς επίσης και την TDMA τεχνική πρόσβασης στο κανάλι, για τη μεγιστοποίηση τόσο της ρυθμοαπόδοσης του κάθε μεμονωμένου χρήστη αλλά και της συνολικής ρυθμοαπόδοσης ενός συστήματος. Το εύρος ζώνης ενός EV-DO καναλιού είναι 1.25 MHz ακριβώς όσο είναι και το εύρος ζώνης ενός CDMAone ή ενός CDMA2000 1xRTT καναλιού [15], ενώ η θεωρητική μέγιστη ρυθμοαπόδοση του είναι 2.4 Mbps και είναι αρκετά γρήγορο όσο πολλές ευρυζωνικές DSL (Digital Subscriber Line) συνδέσεις [22]. Στην πραγματικότητα, οι εν κινήσει EV-DO χρήστες μπορούν προσδοκούν ταχύτητες μεταφόρτωσης από 400 έως 1000 Kbps (EV-DO Rev 0) [23], αλλά και ταχύτητες άνω των 2 Mbps για τη σταθερή επικοινωνία και για περιοχές όπου η ισχύς του σήματος είναι μεγάλη και οι παρεμβολές μικρές. Ένας EV-DO χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε IPTV και VoIP (Voice over Internet Protocol) εφαρμογές καθώς επίσης υποστηρίζει εφαρμογές τηλεδιάσκεψης (videoconferencing) όταν ο εν κινήσει συνδρομητής ταξιδεύει με ταχύτητα 95 Km/h ή ακόμη και σε τηλεφωνικές κλήσεις στην περίπτωση που ο συνδρομητής μπορεί να ταξιδεύει με ταχύτητα μεγαλύτερη των 240 Km/h [22]. Ο αρχικός ανταγωνιστής του EV-DO στα 3G δίκτυα είναι το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), το οποίο σε αντίθεση με το EV-DO επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και δεδομένων. Σε περιοχές όπου το EV-DO δεν είναι διαθέσιμο, οι EV-DO συσκευές ή οι PCI κάρτες μπορούν να συνδεθούν μέσω του CDMA2000 1XRTT. Το EV-DO στην περιοχή της Ευρώπης η οποία χρησιμοποιεί ως επί το πλείστον το GSM δεν είναι διαθέσιμο [23]. Το EV-DO χρησιμοποιεί την ίδια προσέγγιση για τις κλήσεις φωνής με αυτή που

χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων στο διαδίκτυο, δηλαδή όταν κατά τη διάρκεια μιας τηλεφωνικής συνδιάλεξης όταν δε μιλά κανένας από τους χρήστες δεν καταναλώνεται εύρος ζώνης γιατί δεν αποστέλλονται πακέτα φωνής [22]. Ένα EV-DO modem επιτρέπει τη πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω ενός USB dongle, μιας ExpressCard ή μιας PCMCIA κάρτας για απευθείας σύνδεση στον Η/Υ ή μέσω ενός 3G δρομολογητή. Μία EV-DO σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει πολλούς υπολογιστές μαζί για τη δημιουργία ενός hotspot με τη χρήση ενός 3G δρομολογητή, ακριβώς όπως συμβαίνει με μια ευρυζωνική σύνδεση. Η διαφορά ενός 3G δρομολογητή συγκριτικά με τους cable/DSL δρομολογητές είναι ότι μπορεί να υποστηρίξει τις κυψελοειδής συσκευές [24].

#### **1.4.6 Κινητά δίκτυα 3.5 γενιάς**

Η 3.5G γενιά περιλαμβάνει τα δίκτυα εκείνα τα οποία εκτός από την W-CDMA τεχνολογία ενσωματώνουν και την HSDPA τεχνολογία, οι κύριοι εκπρόσωποι της οποίας βασίζονται στη 3GPP οικογένεια προδιαγραφών και παρουσιάζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

##### **1.4.6.1 HSDPA**

Το HSDPA είναι ένα πρότυπο της HSPA (High-Speed Packet Access) οικογένειας προτύπων το οποίο προσφέρει στα δίκτυα που είναι βασισμένα στο UMTS μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Το HSDPA γενικά μεταδίδει πακέτα από το σταθμό βάσης με ρυθμό πέντε φορές μεγαλύτερο από ένα UMTS δίκτυο και δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο από αυτόν των GPRS δικτύων. Τα πρώτα HSDPA δίκτυα είναι εμπορικά διαθέσιμα από τον Αύγουστο του 2009 και οι ρυθμοί μετάδοσης για την κάτω ζεύξη είναι 1.8, 3.6, 7.2 και 14.0 Mbps. Σε αντίθεση με τα CDMA2000 1xEV-DO συστήματα όπου χρησιμοποιούν ξεχωριστά κανάλια (Dedicated Channels - DCHs) για την αποστολή πακέτων σε κάθε χρήστη, η λειτουργία του HSDPA βασίζεται σε ένα διαμοιραζόμενο κανάλι (Downlink Shared Channel - DSCH) το οποίο μοιράζονται μεταξύ τους οι χρήστες. Το κανάλι αυτό διαθέτει πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης για αυτό αποκαλείται και High-Speed DSCH (HS-DSCH). Τα HSDPA συστήματα προσαρμόζουν το σχήμα

διαμόρφωσης και την κωδικοποίηση που χρησιμοποιούν ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι. Το αρχικό σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν είναι το QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) και το 16QAM επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης των πακέτων έως 1.8 και 3.6 Mbps αντίστοιχα [25].

#### **1.4.6.2 HSPA+**

Κατόπιν του HSDPA αναπτύχθηκε το Evolved HSPA (HSPA+), το οποίο με τη χρήση MIMO (Multiple Input Multiple Output) κεραιών και της beamforming τεχνικής επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης στην κάτω ζεύξη έως 28 Mbps όταν χρησιμοποιείται το 16QAM και έως 42 Mbps όταν χρησιμοποιείται το 64QAM σχήμα διαμόρφωσης. Η τεχνική MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για τη μετάδοση στο χρήστη ενώ η beamforming τεχνική στρέφει την προς μετάδοση ισχύ μιας κεραίας στην κατεύθυνση του χρήστη. Οι μεταγενέστερες εκδόσεις του HSPA+ υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης έως 84 Mbps στην κάτω ζεύξη στην περίπτωση χρήσης της MIMO τεχνικής σε συνδυασμό με τη Dual-Cell HSDPA λειτουργία και έως 42 Mbps μόνο με τη Dual-Cell λειτουργία χωρίς τη χρήση MIMO κεραιών. Η Dual-Cell HSDPA λειτουργία αναφέρεται στη χρήση 2 φορέων ταυτοχρόνως για παράδειγμα των 5 MHz ο καθένας για την επίτευξη μεγαλύτερης φασματοδοτικότητας και καλύτερης χρησιμοποίησης των πόρων. Στο μέλλον με τη χρήση πολλαπλών φορέων το HSPA+ προβλέπεται να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης έως 168 Mbps [25, 26, 27].

#### **1.4.7 Κινητά δίκτυα 3.9 γενιάς**

Τα κύρια δίκτυα που ανήκουν στην 3.9 γενιά είναι το LTE, το EV-DO Rev-A και το EV-DO Rev-B των οποίων η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.



#### 1.4.7.1 LTE

Η LTE αποτελεί μία από τις τελευταίες ασύρματες τεχνολογίες της 3GPP οικογενείας προδιαγραφών, δεδομένου όμως του γεγονότος ότι δε συμμορφώνεται πλήρως με τις IMT Advanced 4G απαιτήσεις αποτελεί μια 3.9G τεχνολογία η οποία όμως πωλείται ως 4G. Ο όρος IMT-Advanced έχει δημιουργηθεί από την ITU για τον προσδιορισμό εκείνων των κινητών συστημάτων των οποίων οι ικανότητες υπερβαίνουν αυτές των IMT-2000 συστημάτων. Το LTE άρχισε να διατίθεται το Δεκέμβριο του 2009 αποτελώντας μια εναλλακτική λύση έναντι αυτής των HSPA+ συστημάτων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του LTE είναι η δυνατότητα παροχής ταχύτερων κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών σε περισσότερους χρήστες, η plug & play λειτουργία και το χαμηλότερο κόστος, η αυξημένη ασφάλεια και οι μικρότεροι χρόνοι καθυστέρησης. Επιπλέον είναι διαλειτουργικό με τα GSM, UMTS, CDMAone και τα CDMA2000 συστήματα. Ένας από τους στόχους των LTE συστημάτων είναι η εξολοκλήρου χρήση IP αρχιτεκτονικής, σε αντίθεση με τα UMTS συστήματα τα οποία είναι ένας συνδυασμός αρχιτεκτονικής μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής κυκλώματος. Ένα μέρος του LTE προτύπου αποτελεί η Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστημάτων (System Architecture Evolution), η οποία σχεδιάσθηκε με σκοπό να αντικαταστήσει το δίκτυο πυρήνα ενός GPRS συστήματος έτσι ώστε να εξασφαλίσει την υποστήριξη και την κινητικότητα με κάποια μη 3GPP συστήματα όπως για παράδειγμα με το WiMAX. Η LTE προδιαγραφή επιτρέπει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα κινητού διαδικτύου έως 320 Mbps στην κάτω ζεύξη, δέκα φορές υψηλότερες από εκείνες των 3G δικτύων και 170 Mbps για την άνω ζεύξη [25] υποστηρίζοντας μεταβλητό εύρος ζώνης φορέων από 1.4 έως 20 MHz με τη χρήση είτε της FDD είτε της TDD (Time Division Duplexing) τεχνικής. Πιο συγκεκριμένα η μετάδοση δεδομένων με το LTE για τους εν κινήσει χρήστες είναι εφικτή μέχρι την ταχύτητα των 350 Km/h ή ακόμη έως την ταχύτητα των 430 Km/h ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται [28]. Τον Ιούλιο του 2009 η Ευρωπαϊκή Ένωση ενέκρινε την πρόταση για τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων των 900MHz η οποία είχε παραχωρηθεί αποκλειστικά για τις GSM. Η LTE χρησιμοποιεί το ραδιοφάσμα αποτελεσματικότερα, παρέχοντας στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τη δυνατότητα να επωφεληθούν από το ψηφιακό μέρισμα και να χρησιμοποιήσουν τις συχνότητες που θα απελευθερωθούν με τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Οι LTE υπηρεσίες είναι δυνατόν να

φθάσουν σε λιγότερο κατοικημένες περιοχές και να συμβάλουν στη μείωση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ των αγροτικών και των αστικών περιοχών, αφού ακόμη και έως τα τέλη του 2008 το 23% του πληθυσμού στις αγροτικές περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν μπορούσε να έχει πρόσβαση σε διαδικτυακές DSL συνδέσεις. Η τεχνολογία αυτή δοκιμάζεται επί του παρόντος από φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητών επικοινωνιών στη Φινλανδία τη Γερμανία, τη Νορβηγία, την Ισπανία, τη Σουηδία και το Ηνωμένο Βασίλειο και είναι εμπορικά διαθέσιμη στη Σουηδία και τη Νορβηγία από το πρώτο εξάμηνο του 2010. Σε παγκόσμια κλίμακα οι μεγάλοι φορείς εκμετάλλευσης κινητών επικοινωνιών και κατασκευαστές (Orange, T-Mobile, AT&T, Verizon, Alcatel-Lucent, Ericsson, Huawei και Nokia Siemens Networks) έχουν δεσμευθεί να χρησιμοποιήσουν το πρότυπο LTE και αναμένεται να πραγματοποιήσουν μέχρι το 2013 επενδύσεις σε LTE εξοπλισμό ύψους περίπου 6 δισεκατομμυρίων ευρώ [13].

#### **1.4.7.2 EV-DO Rev-A & Rev-B**

Τόσο το EV-DO Rev-A όσο και το EV-DO Rev-B ανήκουν στη 3GPP2 οικογένεια προδιαγραφών. Το EV-DO Rev-A αυξάνει τη μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μετάδοσης στα 3.1 Mbps, με τη πραγματική ταχύτητα να κυμαίνεται από 600 έως 1.400 Kbps στην κάτω ζεύξη και από 500 έως 800 Kbps στην άνω ζεύξη. Κάποια EV-DO τηλέφωνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως modem αντί της σύνδεσης ενός EV-DO modem (USB, ExpressCard, ή PCMCIA κάρτα) στον Η/Υ ή στο 3G δρομολογητή. Με τα περισσότερα τηλέφωνα να υποστηρίζουν το EV-DO Rev-0 και τις περισσότερες συσκευές δεδομένων να υποστηρίζουν το EV-DO Rev-A, εάν ένα τηλέφωνο πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως modem θα πρέπει να υποστηρίζει το EV-DO Rev-A [23]. Στις πρόσφατες εξελίξεις στην κινητή τηλεφωνία ανήκει η κυκλοφορία συσκευών η οποίες συνδυάζουν το EV-DO Rev-A και το WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) με τις κλήσεις να πραγματοποιούνται μέσω του CDMA, ενώ η κίνηση των δεδομένων δρομολογείται από το EV-DO/WiMAX [29]. Το EV-DO Rev-B επιτυγχάνει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μετάδοσης 4.9 Mbps επιτρέποντας τη διανομή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (High Definition - HD).

#### **1.4.8 Κινητά δίκτυα 4ης γενιάς**

Η 4G γενιά ασύρματων κυψελοειδών προτύπων αποτελεί το διάδοχο των 2G και των 3G προτύπων. Αναφέρεται εξ' ολοκλήρου σε IP κινητά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των οποίων μπορεί να φθάσει το 1 Gbps. Τα 4G δίκτυα εγκαταλείπουν τη χρήση της CDMA τεχνικής πρόσβασης στο κανάλι (που χρησιμοποιείται από τα 3G συστήματα και το IS-95) η οποία αντικαθίσταται από την OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) τεχνική και η οποία συνδυάζεται με τη χρήση των MIMO κεραιών. Η 4G γενιά αναπτύσσεται για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ως προς την ασφάλεια, την ποιότητα των υπηρεσιών και των ρυθμών μετάδοσης που τίθενται από την περαιτέρω ανάπτυξη των υπαρχουσών 3G εφαρμογών, όπως είναι αυτές τις ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, της VoIP τεχνολογίας, της τηλεοπτικής τηλεφωνίας (video telephony), της mobile TV αλλά και των υπηρεσιών τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας. Τα κύρια 4G δίκτυα περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

##### **1.4.8.1 LTE Advanced**

Το LTE παρόλες τις βελτιώσεις θεωρείται μια 3G τεχνολογία η οποία δεν πληρεί τις προδιαγραφές των 4G ή των IMT Advanced δικτύων όπως καθορίζονται από την ITU. Κατά τη διάρκεια του 2009, η 3GPP έχει εργαστεί για τον προσδιορισμό βελτιώσεων για το LTE που απαιτούνται από το IMT-Advanced. Ο λόγος για τον οποίο το LTE απαιτείται να συμμορφωθεί με τις απαιτήσεις του IMT-Advanced είναι για να εξασφαλιστεί η εμπορική λειτουργία των δικτύων για χρόνια [30].

Το LTE Advanced της 3GPP οικογενείας προδιαγραφών αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοχή του LTE προτύπου, το οποίο υποβλήθηκε ως πρότυπο των 4G συστημάτων το φθινόπωρο το 2009 και αναμένεται να είναι διαθέσιμο το 2012. Οι πρώτες εμπορικές υπηρεσίες του LTE Advanced εισήχθησαν στη Σκανδιναβία το Δεκέμβριο του 2009 [31]. Από τον Ιανουάριο του 2010 η Ευρωπαϊκή Ένωση αποφάσισε την επένδυση 18 εκατομμυρίων ευρώ στην έρευνα για το LTE Advanced. Η LTE Advanced τεχνολογία αναμένεται να προσφέρει ταχύτητες κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών για τους χρήστες υψηλής κινητικότητας από 100 Mbps και έως 1 Gbps για τους χρήστες χαμηλής κινητικότητας [32] και να

λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με το LTE. Με το εύρος ζώνης να είναι μεταβλητό και να κυμαίνεται από 20 έως 100 MHz [33], αναμένεται να παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να επωφεληθούν πλήρως από πολύπλοκες διαδικτυακές υπηρεσίες όπως αυτές της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και των Video on Demand (VoD) υπηρεσιών [13]. Το LTE Advanced θα να είναι συμβατό με το LTE ακριβώς όπως το HSPA είναι συμβατό με το UMTS [34].

#### **1.4.8.2 IEEE 802.16m**

Το IEEE 802.16e (mobile WiMAX) μπορεί να υπερβαίνει σε απόδοση άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες μέχρι σήμερα, ωστόσο υπολείπεται των βασικών απαιτήσεων της ITU για την IMT-Advanced τεχνολογία ώστε να ανήκει στην κατηγορία των 4G υπηρεσιών. Τον Οκτώβριο του 2009 ανακοινώθηκε το IEEE 802.16m πρότυπο ως υποψήφιο για ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων. Το IEEE 802.16m παρουσιάζει αυξημένη χωρητικότητα, ικανό να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης για τους εν κινήσει χρήστες έως 120 Mbps στην κάτω ζεύξη και 60 Mbps στην άνω ζεύξη, με τη χρήση 4x2 MIMO κεραιών για κανάλι εύρους ζώνης 20 MHz, ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης για τους σταθερούς χρήστες αναμένεται να φθάνουν το 1 Gbps [35]. Η τυποποίηση του IEEE 802.16m αναμένεται να διατηρεί τη συμβατότητα του με το IEEE 802.16e. Τα πρώτα προϊόντα που θα υποστηρίζουν το IEEE 802.16m πρότυπο είναι ήδη υπό ανάπτυξη και το WiMAX Forum προτίθεται να τα πιστοποιήσει στα τέλη του 2011 [36].

### **1.5 Ασύρματα δίκτυα δεδομένων**

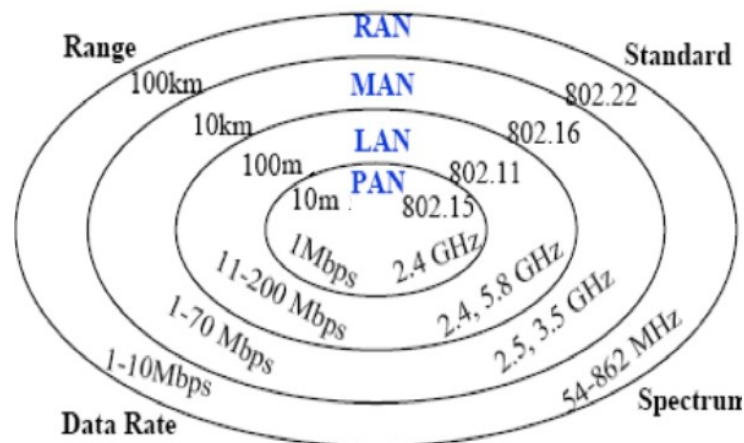
Τα ασύρματα δίκτυα δεδομένων διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Access Networks - WPANs)
- Ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Access Networks - WLANs)
- Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Access Networks - WMANs)
- Ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (Wireless Regional Access Networks - WRANs)

Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών κάθε επιμέρους κατηγορίας ασύρματων δικτύων δεδομένων.

### 1.5.1 Ασύρματα προσωπικά δίκτυα

Ένα ασύρματο προσωπικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο που εξυπηρετεί ένα μεμονωμένο χρήστη ή μια μικρή ομάδα ατόμων και χαρακτηρίζεται από τη λειτουργία του σε μια περιορισμένη απόσταση περίπου 10 μέτρων. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ ενός φορητού Η/Υ ή ενός PDA (Personal Digital Assistant) και ενός σταθερού Η/Υ ή ενός server και ενός εκτυπωτή. Μια άλλη εφαρμογή των WPANs είναι η χρήση τους σε οικιακά συστήματα ελέγχου και αυτοματοποίησης [39]. Οι κύριοι εκπρόσωποι των WPANs δικτύων είναι το IrDA, το Bluetooth, το UWB, το ZigBee, κ.λπ. Αν και εν μέρη οι διάφορες WPANs τεχνολογίες ανταγωνίζονται η μία την άλλη, συχνά λειτουργούν ως συμπληρωματικές μεταξύ τους [30].



**Σχήμα 1.1** Κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας των διάφορων ασύρματων δικτύων διανομής δεδομένων [37]

### 1.5.1.1 Bluetooth

Έως τα τέλη της δεκαετίας του '90 δεν υπήρχε κάποιο ευρέως αποδεκτό WPAN πρότυπο. Τότε περίπου η Ericsson έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη μιας τεχνολογίας η οποία θα επέτρεπε τον σχηματισμό δικτύων πολύ μικρής εμβέλειας με σκοπό την ασύρματη ad-hoc δικτύωση ετερογενών φορητών συσκευών. Το πρότυπο που προέκυψε υιοθετήθηκε στη συνέχεια από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) ως το πρότυπο IEEE 802.15.1 για τα WPAN δίκτυα. Το Bluetooth είναι ένα ανοικτό ασύρματο πρωτόκολλο χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που αναπτύχθηκε από τη Bluetooth SIG (Bluetooth Special Interest Group). Σχεδιάστηκε για μεταδόσεις δεδομένων μικρής εμβέλειας μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών, σταθερών ή φορητών με μικρές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία προσωπικών δικτύων.

Το Bluetooth λειτουργεί σε ένα καθεστώς master/slave. Η master Bluetooth συσκευή μπορεί να επικοινωνεί με έως και επτά συσκευές στα πλαίσια μίας ομάδας ασύρματων χρηστών. Αυτή η ομάδα δικτύου μέχρι και οκτώ συσκευών ονομάζεται piconet. Η Bluetooth προδιαγραφή επιτρέπει τη σύνδεση δύο ή περισσότερων piconets, με κάποιες συσκευές να ενεργούν ως γέφυρα παίζοντας ταυτόχρονα το ρόλο του slave σε ένα άλλο piconet. Αυτή είναι η βάση διαμόρφωσης των ad-hoc Bluetooth δικτύων. Σε αντίθεση με τον προκάτοχό του το IrDA, το οποίο απαιτεί ένα ξεχωριστό προσαρμογέα για κάθε συσκευή, το Bluetooth επιτρέπει σε πολλαπλές συσκευές να επικοινωνούν με έναν υπολογιστή μέσω ενός ενιαίου προσαρμογέα. Οι πρόσφατης τεχνολογίας φορητοί υπολογιστές διατίθενται με ενσωματωμένο Bluetooth προσαρμογέα χωρίς να είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ αυτού και των άλλων Bluetooth συσκευών.

Η Bluetooth τεχνολογία κάνει χρήση της «ελεύθερης» ζώνης συχνοτήτων των 2.4 GHz όπως ακριβώς το Wi-Fi (IEEE802.11b/g), ώστε οι συσκευές που το ενσωματώνουν να μπορούν να λειτουργήσουν απροβλημάτιστα σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Για να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παρεμβολές από παρεμφερείς συσκευές, το Bluetooth χρησιμοποιεί τη μέθοδο μετάδοσης με διασπορά φάσματος (Frequency Hopping - FH) επιτυγχάνοντας έως 1600 εναλλαγές συχνότητας ανά δευτερόλεπτο.

Στον πίνακα 1.4 συνοψίζονται τρεις κατηγορίες προϊόντων της τεχνολογίας αυτής με τη κάθε μία από αυτές να χαρακτηρίζεται από διαφορετική μέγιστη απόδοση/

**Πίνακας 1.4** Κλάσεις ισχύος Bluetooth προϊόντων [40]

| Κλάση Ισχύος | Μέγιστη Ισχύς Εξόδου | Μέγιστο Εύρος |
|--------------|----------------------|---------------|
| Class 1      | 100mW                | 100m          |
| Class 2      | 2.5mW                | 10m           |
| Class 3      | 1mW                  | 1m            |

ισχύ. Η σημερινή χρήση του Bluetooth (τουλάχιστον για τις κλάσεις 2 και 3) είναι συμπληρωματική της τεχνολογίας του Wi-Fi και εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιπτώσεις από αυτές των Wi-Fi προτύπων καθώς το δεύτερο θεωρείται ένα τύπος ασύρματου Ethernet ενώ το Bluetooth θεωρείται μια μορφή ασύρματης USB σύνδεσης.

Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές του Bluetooth περιλαμβάνουν:

- Τη μεταφορά δεδομένων ήχου μεταξύ κινητών τηλεφώνων και hands-free ακουστικών
- Την επικοινωνία ενός Η/Υ με τις συσκευές του ποντικιού, του πληκτρολόγιου, του εκτυπωτή, της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής αλλά και με κάποιον άλλο Η/Υ.
- Την ασύρματη μεταφορά ψηφιακών αρχείων (εικόνες, mp3 κ.λπ.) ανάμεσα σε κινητά τηλέφωνα και PDAs.
- Τον απομακρυσμένο έλεγχο συσκευών, οι οποίες έως την εμφάνιση του Bluetooth χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία υπέρυθρων ακτινών.
- Ιατρικές συσκευές.

Οι αρχικές εκδόσεις του προτύπου ήταν η Bluetooth 1.0 και η Bluetooth 1.0b οι οποίες παρουσίαζαν πολλά προβλήματα και οι κατασκευαστές τους αντιμετώπιζαν δυσκολίες στην επίτευξη της διαλειτουργικότητας των προϊόντων τους. Ακολούθως πολλά σφάλματα της 1.0b προδιαγραφής επιλύθηκαν από την επόμενη προδιαγραφή τη Bluetooth 1.1 η οποία επικυρώθηκε ως IEEE 802.15.1-2002 πρότυπο.

- **Bluetooth 1.2** Η 1.2 έκδοση του Bluetooth είναι συμβατή με την 1.1 και επικυρώθηκε ως το IEEE 802.15.1-2005 πρότυπο. Μεταξύ άλλων

υποστηρίζει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης μέχρι 1 Mbps [40] και βελτιώνει την αντοχή της στις παρεμβολές συχνοτήτων με τη μέθοδο προσαρμοστικής διασποράς φάσματος (Adaptive Frequency Hopping - AFH), αποφεύγοντας τη χρήση των πολυσύχναστων συχνοτήτων.

- **Bluetooth 2.0** Η συγκεκριμένη έκδοση της Bluetooth τεχνολογίας κυκλοφόρησε στις 10 Νοεμβρίου 2004 και είναι συμβατή με την προηγούμενη της, την 1.2. Η βασική διαφορά είναι η εισαγωγή της EDR (Enhanced Data Rate) λειτουργίας για την ταχύτερη μεταφορά δεδομένων και τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων σε αυτή την περίπτωση είναι 3 Mbps [40]. Ενώ η προηγούμενη έκδοση του Bluetooth περιοριζόταν μόνο στη χρήση της GFSK διαμόρφωσης σήματος, στη συγκεκριμένη έκδοση το EDR κάνει χρήση των π/4-DQPSK και 8DPSK τεχνικών διαμόρφωσης σήματος που προκύπτουν από το συνδυασμό των GFSK και PSK. Η Bluetooth SIG δημοσίευσε την προδιαγραφή αυτή με το όνομα Bluetooth 2.0 + EDR το οποίο σημαίνει ότι η EDR λειτουργία είναι προαιρετική.
- **Bluetooth 2.1 + EDR** Η έκδοση αυτή η οποία αποκαλείται και Bluetooth Core Specification 2.1 είναι πλήρως συμβατή με την 1.2 έκδοση και εγκρίθηκε από τη Bluetooth SIG στις 26 Ιουλίου 2007.
- **Bluetooth 3.0** Η νέα αυτή έκδοση είναι βασισμένη στη Bluetooth 2.1 + EDR προδιαγραφή και εγκρίθηκε από τη Bluetooth SIG στις 21 Απριλίου του 2009. Το κύριο νέο χαρακτηριστικό της είναι το AMP (Alternate MAC/PHY), ως προσθήκης του IEEE 802.11 πρωτοκόλλου, το οποίο προσφέρει υψηλές ταχύτητες μεταφοράς της τάξης των 24 Mbps. Επιπλέον έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει αυξημένη εξοικονόμηση ενέργειας για τις κινητές συσκευές που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη προδιαγραφή.
- **Bluetooth 4.0** Τον Ιούνιο του 2007 η Bluetooth SIG και η Nokia ανακοίνωσαν ότι η Wibree τεχνολογία θα αποτελεί μέρος της Bluetooth προδιαγραφής ως μια εξαιρετικά χαμηλής ισχύος (Ultra Low Power - ULP) Bluetooth τεχνολογίας. Το Δεκέμβριο του 2009 αυτό το χαρακτηριστικό της χαμηλής ενέργειας υιοθετήθηκε από την 4.0 έκδοση και οι Wibree και Bluetooth ULP ονομασίες εγκαταλείφθηκαν. Κατόπιν τον Απρίλιο του 2010 η Bluetooth SIG ολοκλήρωσε τη Bluetooth 4.0 προδιαγραφή η οποία



περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα του κλασσικού Bluetooth, το Bluetooth υψηλής ταχύτητας και το Bluetooth χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας [40].

#### **1.5.1.2 Ultra-Wideband**

Η Ultra-Wideband (UWB) ονομασία ή διαφορετικά το πρότυπο IEEE 802.15.3 χρησιμοποιείται συχνά για την αναφορά σε οτιδήποτε συνδέεται διαδίδοντας σήματα μικρής διάρκειας παλμών, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πέρα από μια πολύ ευρεία ζώνη συχνοτήτων. Με την εναλλαγή του πλάτους των παλμών, της πολικότητας, του συγχρονισμού και άλλων χαρακτηριστικών οι πληροφορίες κωδικοποιούνται στις προς μετάδοση ροές δεδομένων. Η τεχνική αυτή να είναι όμοια αυτής που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές των ραντάρ. Το UWB παρέχει τη δυνατότητα διαβίβασης μεγάλου όγκου δεδομένων, με τη χρήση χαμηλής ισχύος, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης από 20 Mbps [41] και ανάλογα με την εφαρμογή λειτουργεί στην «ελεύθερη» ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 3.1 και των 10.6 GHz [42]. Το εύρος ζώνης λειτουργίας που καταλαμβάνει το UWB είναι μεγαλύτερο του 20% της κεντρικής συχνότητας ή τουλάχιστον 500 MHz και θεωρητικά κάτω από ιδανικές συνθήκες το φάσμα μπορεί να διαμοιραστεί με άλλους χρήστες [41]. Το UWB δεν περιορίζεται μόνο στην ασύρματη επικοινωνία αλλά μπορεί να χρησιμοποιήσει και ομοαξονικά και συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων για ταχύτητες έως 1 Gbps. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά με άλλες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το WiMAX και άλλες κυψελοειδής WAN τεχνολογίες για την αναμετάδοση δεδομένων από μια host συσκευή σε άλλες συσκευές για μια απόσταση έως 10 μέτρων. Επιπλέον της διαβίβασης μεγάλου όγκου δεδομένων σε μια μικρή απόσταση με χρήση χαμηλής ισχύος έχει τη δυνατότητα να διαβιβάσει τα σήματα σε περιοχές μη οπτικής επαφής (Non Line Of Sight - NLOS) δηλαδή έχει δυνατότητα διαβίβασης των δεδομένων μέσα από πόρτες και άλλα εμπόδια. Η ισχύς που χρησιμοποιεί είναι του επιπέδου των 0.2 Milliwatt, περιορίζοντας κατά συνέπεια τη λειτουργία του σε αποστάσεις έως των 10 μέτρων. Επειδή γενικά τα επίπεδα της ενέργειας των παλμών είναι πολύ χαμηλά συνήθως δε προκαλούνται προβλήματα παρεμβολών. Ωστόσο το UWB είναι ευαίσθητο στις παρεμβολές πομπών άλλων τεχνολογιών. Μια UWB συσκευή εκπέμπει μόνο το 1/3.000 της

μέσης ενέργειας που εκπέμπεται από ένα συμβατικό κινητό τηλέφωνο των 600 Milliwatt, γεγονός που σημαίνει ότι δεν εμπνέει τόσους κινδύνους για την υγεία συγκριτικά κυψελοειδή δίκτυα [43].

Το πλεονέκτημα της UWB τεχνολογίας σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες έγκυται στη χωρική του ικανότητα (spatial capacity). Όπως απεικονίζεται και από τον πίνακα 1.5 καθώς το IEEE 802.11b πρότυπο μπορεί να λειτουργήσει μεν σε μία μέγιστη απόσταση των 100 μέτρων μπορεί να υποστηρίξει μόνο 1 Kbps ανά τετραγωνικό μέτρο. Στα πλαίσια ενός hotspot, το γεγονός αυτό δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση πολλών χρηστών οι οποίοι θέλουν να δουλέψουν σε multimedia περιβάλλον. Ωστόσο το UWB μπορεί να υποστηρίξει 1.000 Kbps ανά τετραγωνικό μέτρο [43].

Για το μέλλον είχε προβλεφθεί ότι το UWB θα μπορούσε να υποστηρίξει τη ρυθμούς μετάδοσης έως 500 Mbps για αποστάσεις 5 έως 10 μέτρων αλλά και να ικανοποιήσει τις WAN ανάγκες με τη χρήση ad-hoc δικτύων θέτοντας στο περιθώριο ανταγωνιστικές τεχνολογίες όπως είναι το W-CDMA και το GPRS.

Εντούτοις, μετά από αρκετά έτη αδράνειας, η IEEE 802.15.3a ομάδα εργασίας διαλύθηκε το 2006. Η αργή πρόοδος στην ανάπτυξη των UWB προτύπων, το υψηλό κόστος των αρχικών εφαρμογών και η χαμηλότερη απόδοση από την αρχικά αναμενόμενη, είναι μερικοί από τους λόγους της περιορισμένης επιτυχίας του UWB η οποία οδήγησε τους διάφορους πωλητές του UWB στην παύση των διαδικασιών αυτών κατά τη διάρκεια του 2008 και του 2009 [42].

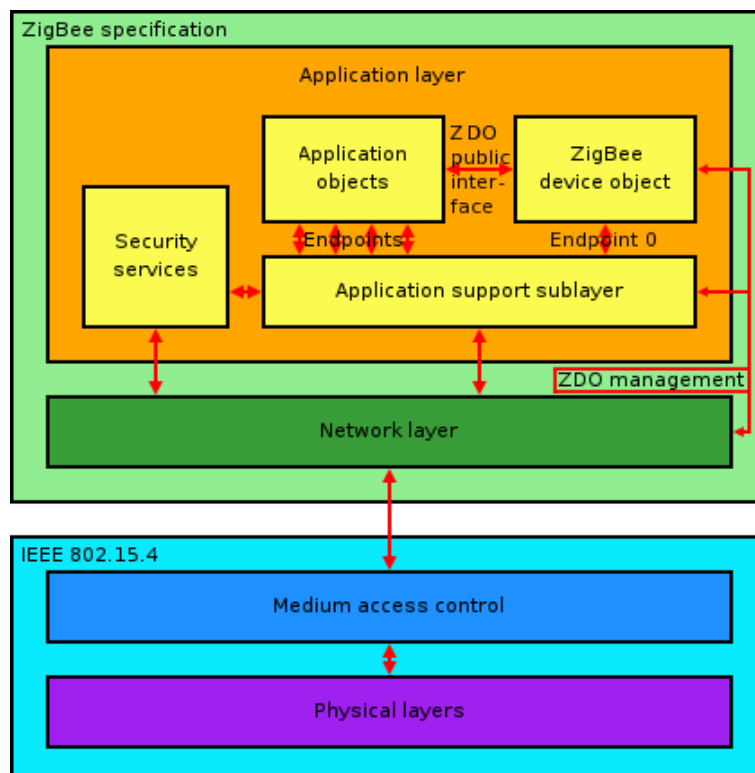
**Πίνακας 1.5** Σύγκριση χωρικής ικανότητας μεταξύ των WPAN προτύπων [43]

| Technology   | Power  | Range | Spatial Capacity         |
|--------------|--------|-------|--------------------------|
| IEEE 802.11b | 50 mW  | 100 m | 1 Kbps/m <sup>2</sup>    |
| Bluetooth    | 1 mW   | 10 m  | 30 Kbps/m <sup>2</sup>   |
| IEEE 802.11a | 200 mW | 50 m  | 55 Kbps/m <sup>2</sup>   |
| UWB          | 0.2 mW | 10 m  | 1000 Kbps/m <sup>2</sup> |

### 1.5.1.3 ZigBee

Το ZigBee είναι το όνομα της προδιαγραφής μιας ακολουθίας πρωτοκόλλων υψηλού επιπέδου επικοινωνίας, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, τα οποία βασίζονται στο IEEE 802.15.4-2003 πρότυπο. Η ZigBee τεχνολογία υποστηρίζεται από τη ZigBee Alliance, η οποία αναπτύσσει τις προδιαγραφές και πιστοποιεί την ορθή εφαρμογή της. Στόχος της τεχνολογίας αυτής ήταν να είναι οικονομικότερη και απλούστερη από άλλα WPAN πρωτόκολλα όπως το Bluetooth. Προορίζεται για εφαρμογές χαμηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων με μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταριών όπως είναι οι εφαρμογές απομακρυσμένου ελέγχου και οι εφαρμογές αισθητήρα. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο φυσικό (PHY) και MAC (Medium Access Control) επίπεδο που ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4-2003 και ολοκληρώνει το πρότυπο αυτό ορίζοντας τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογών (σχήμα 1.2).

Το IEEE 802.15.4-2003 πρότυπο καθορίζει τη λειτουργία για τη Zigbee τεχνολογία στην «ελεύθερη» ζώνη συχνοτήτων των 2.4 GHz σε παγκόσμια κλίμακα, στη ζώνη των 915 MHz για την Αμερική και στη ζώνη των 868MHz για την περιοχή της Ευρώπης. Στην ζώνη των 2.4 GHz υπάρχουν 16 ZigBee κανάλια με ρυθμό



Σχήμα 1.2 Στοιβά επιπέδων ZigBee προδιαγραφής [44]

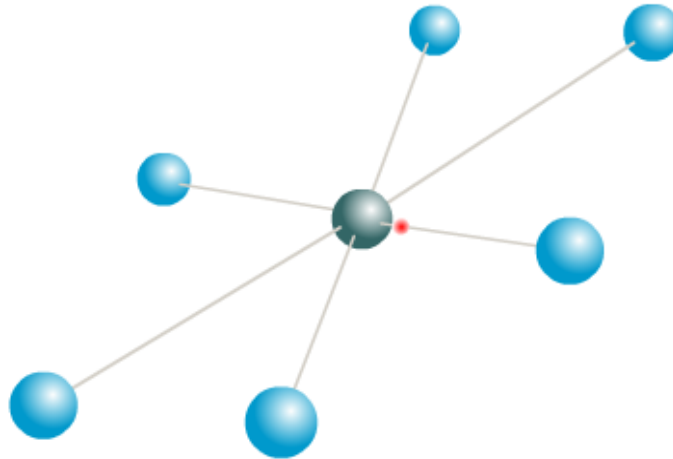
μετάδοσης δεδομένων 250 Kbps για κάθε κανάλι και εύρος ζώνης καναλιού 5 MHz. Η ζώνη των 915 MHz ορίζει 10 ZigBee κανάλια, με εύρος ζώνης καναλιού 2 MHz, με κάθε κανάλι να επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης 40Kbps ενώ η ζώνη των 868 MHz ορίζει 1 κανάλι επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης 20Kbps. Οι τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι η BPSK στα 868 και στα 915 MHz και η ορθογώνια QPSK για τη ζώνη των 2.4 GHz. Τέλος το εύρος μετάδοσης της ZigBee τεχνολογίας κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 75 μέτρων.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ZigBee συσκευών οι οποίοι είναι:

- **ZigBee Coordinator (ZC):** Συντηρεί συνολικά το δίκτυο αποτελώντας το πυρήνα αυτού έχοντας δυνατότητα επικοινωνίας με άλλα δίκτυα. Κάθε ZigBee δίκτυο διαθέτει ακριβώς ένα συντονιστή έχοντας μεγαλύτερες απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ συγκριτικά με τις άλλες συσκευές.
- **ZigBee Router (ZR):** Ένας Zigbee δρομολογητής μπορεί να λειτουργήσει ως ένας ενδιάμεσος δρομολογητής μεταφέροντας δεδομένα από άλλες συσκευές.
- **ZigBee End Device (ZED):** Μία ZED συσκευή επικοινωνεί είτε με το ZigBee συντονιστή είτε με το ZigBee δρομολογητή. Είναι το σημείο με το οποίο συνδέονται οι φυσικές συσκευές και δε μπορεί να αναμεταδώσει δεδομένα από αυτές. Απαιτεί ένα ελάχιστο ποσοστό μνήμης και επομένως είναι λιγότερο δαπανηρή συγκριτικά με το ZR ή το ZC.

Το επίπεδο δικτύου του ZigBee υποστηρίζει τρεις τοπολογίες, την τοπολογία αστέρα, την τοπολογία δέντρου και την τοπολογία βρόχου.

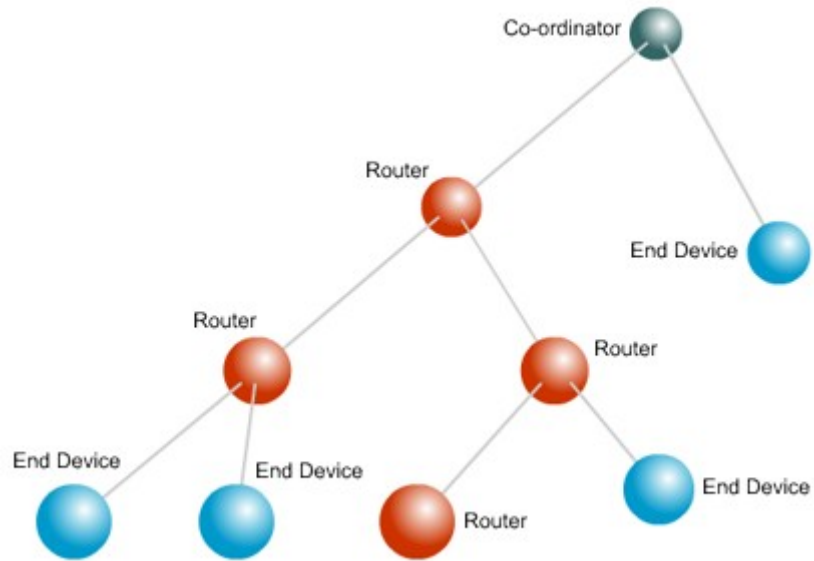
Η τοπολογία αστέρα (σχήμα 1.3) έχει το πλεονέκτημα της απλής υλοποίησης, με κάθε συσκευή συντονιστή να συνδέεται με ένα σύνολο τερματικών συσκευών. Κάθε τερματική συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τη συσκευή συντονιστή και επομένως η αποστολή ενός μηνύματος από μία τερματική συσκευή σε μία άλλη πρέπει να γίνει μέσω του συντονιστή [45].



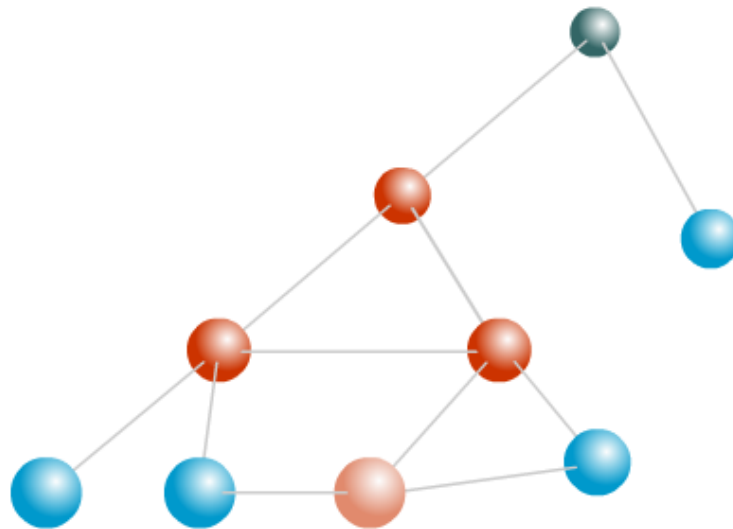
**Σχήμα 1.3** Τοπολογία αστέρα ενός ZigBee δικτύου [44]

Στην κορυφή της τοπολογίας δέντρου (σχήμα 1.4) τοποθετείται ο συντονιστής ο οποίος μπορεί να συνδέεται με ένα πλήθος δρομολογητών και τερματικών συσκευών («παιδιά»). Ο δρομολογητής μπορεί να συνδέεται με άλλους δρομολογητές ή τερματικές συσκευές, ωστόσο οι τερματικές συσκευές δε μπορούν να συνδεθούν απευθείας με άλλες τερματικές συσκευές δηλαδή δε μπορούν να έχουν «απογόνους». Το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας έγκυται στο ότι δεν υπάρχει εναλλακτική διαδρομή στην περίπτωση όπου μία απαραίτητη σύνδεση αποτύχει.

Η δομή της τοπολογίας βρόχου (σχήμα 1.5) είναι όμοια με αυτή της τοπολογίας δέντρου και παρέχει υψηλό βαθμό αξιοπιστίας ως προς τη διάδοση των μηνυμάτων. Ο συντονιστής τοποθετείται στην κορυφή της δομής και μπορεί να συνδέεται με ένα πλήθος δρομολογητών και τερματικών συσκευών («παιδιά»), ενώ ο δρομολογητής μπορεί να συνδέεται με άλλους δρομολογητές και τερματικές συσκευές που δεν αποτελούν απαραίτητα τους «απογόνους» του. Τα μηνύματα μπορούν να δρομολογούνται σε ολόκληρο το δίκτυο, έτσι εάν υπάρχει κάποιο είδος παρεμβολής, αποτυχία σύνδεσης ή συμφόρηση (bottleneck) σε ένα τμήμα του δικτύου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική διαδρομή [47].



Σχήμα 1.4 Τοπολογία δέντρου ενός ZigBee δικτύου [46]



Σχήμα 1.5 Τοπολογία βρόχου ενός ZigBee δικτύου [47]

Ολοκληρώνοντας ο πίνακας 1.6 παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά των WPAN τεχνολογιών όπως ορίζονται από το IEEE 802.15.

**Πίνακας 1.6** Σύγκριση χαρακτηριστικών των WPAN τεχνολογιών [48]

| Parameters                        | Bluetooth (IEEE 802.15.1)                                                                       | UWB (IEEE 802.15.3)                                                                | ZigBee (IEEE 802.15.4)                                                                                  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Applications</b>               | Computer and accessory devices,<br>Computer to commuter,<br>Computer with other digital devices | Multimedia content transfer,<br>High-resolution radar,<br>Ground-penetrating radar | Home control,<br>Building automation,<br>Industrial automation,<br>Home security,<br>Medical monitoring |
| <b>Frequency Band</b>             | 2.4 – 2.48 GHz                                                                                  | 3.1 – 10.6 GHz                                                                     | 868 MHz<br>902-928 MHz<br>2.4 – 2.48 GHz                                                                |
| <b>Range</b>                      | ~ 10 m                                                                                          | ~ 10 m                                                                             | ~ 100 m                                                                                                 |
| <b>Maximum Data Transfer Rate</b> | 3 Mbps                                                                                          | 1 Gbps                                                                             | 20 Kbps<br>40 Kbps<br>250 Kbps                                                                          |
| <b>Modulation</b>                 | GFSK, 2PSK, DQSP, 8PSK                                                                          | QPKS, BPSK                                                                         | BPSK (868/928 MHz),<br>QPSK (2.4 GHz)                                                                   |

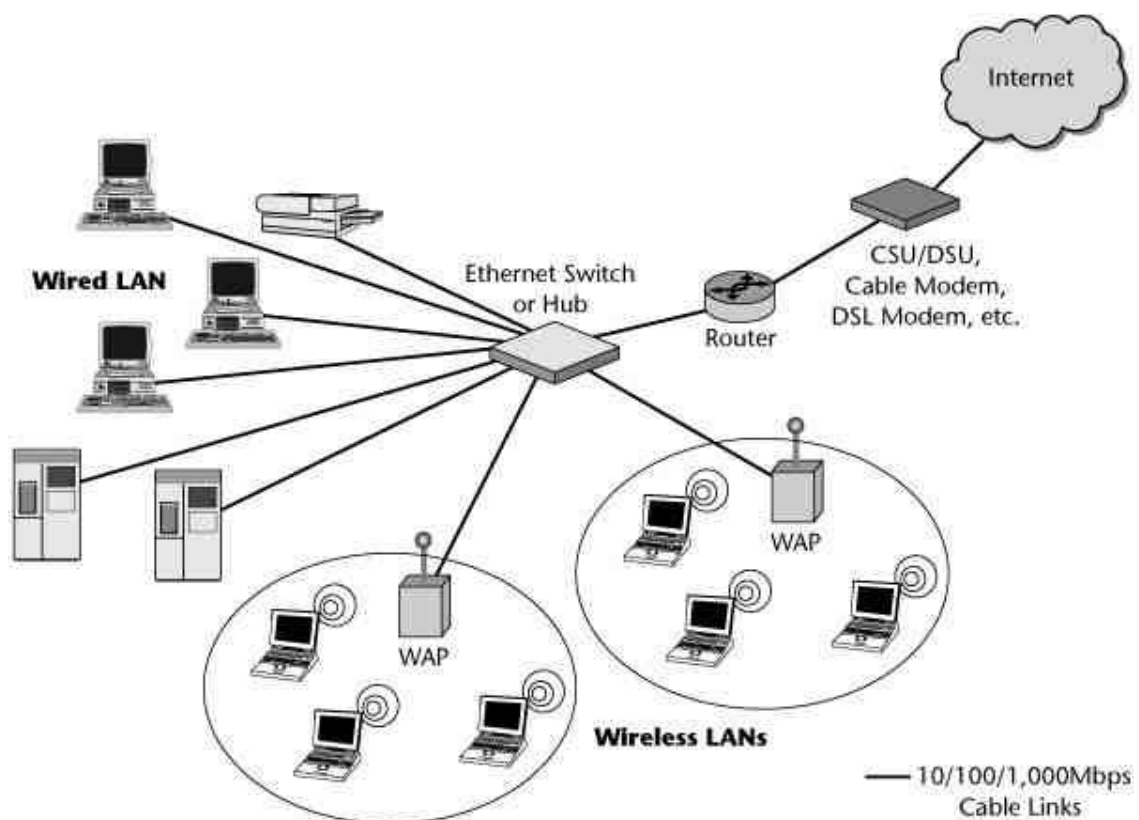
### 1.5.2 Ασύρματα τοπικά δίκτυα

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο το οποίο δε βασίζεται σε ενσύρματες Ethernet συνδέσεις. Ένα WLAN μπορεί να είναι μια επέκταση σε ένα τρέχον ενσύρματο δίκτυο είτε μια εναλλακτική λύση αυτού, αποτελώντας συνήθως μια οικονομικότερη λύση έναντι των ενσύρματων δικτύων.

Η λειτουργία των αρχικών WLANs περιοριζόταν σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μεταξύ του 1 και των 11 Mbps με την πραγματική ρυθμοαπόδοση να είναι τουλάχιστον 50% μικρότερη της μέγιστης προαναφερθείσας ρυθμοαπόδοσης. Τα μεταγενέστερα WLAN δίκτυα υποστηρίζουν μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης έως 54 Mbps με την πραγματική ρυθμοαπόδοση να φθάνει έως 32 Mbps. Τα WLANs δίκτυα λειτουργούν στις «ελεύθερες» ζώνες συχνοτήτων, των 2.4 είτε των 5 GHz χωρίς να απαιτούν συνθήκες οπτικής επαφής ενώ η διάδοση ενός WLAN σήματος μπορεί να καλύψει μια περιοχή που εκτείνεται σε ακτίνα 3 έως 150 μέτρων περίπου. Το βασικό στοιχείο ενός WLAN δικτύου είναι ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης (Wireless Access Point - WAP) ή διαφορετικά ο σταθμός βάσης. Τα WAPs συνδέονται σε ένα Ethernet hub ή στο server. Η συνολική περιοχή κάλυψης μπορεί να επεκταθεί με τη σύνδεση πολλαπλών

WAPs, ενώ η περιαγωγή των χρηστών είναι εφικτή μέσω των μεταπομπών μεταξύ των WAPs. Μία περιοχή που καλύπτεται από ένα ή περισσότερα APs συνδεδεμένα μεταξύ τους ονομάζεται hotspot. Στο σχήμα 1.6 απεικονίζεται ένα τυπικό παράδειγμα ενός WLAN δικτύου [49, 50].

Τα WLANs δίκτυα διακρίνονται σε δύο τύπους, σε αυτά που χρησιμοποιούνται για οικιακές εφαρμογές ή μικρές επιχειρήσεις και σε αυτά που χρησιμοποιούνται από μεγάλες επιχειρήσεις (enterprise class WLANs). Ο πρώτος τύπος δικτύων συνήθως χρησιμοποιεί ένα ή δύο access points για τη μετάδοση των σημάτων σε μία ακτίνα 30 έως 60 μέτρων. Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό access points για τη μετάδοση των σημάτων σε μία ευρεία περιοχή. Αυτά τα access points διαθέτουν περισσότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ώστε να παρέχουν καλύτερη ασφάλεια, επικύρωση (authentication), απομακρυσμένη διαχείριση καθώς και εργαλεία για την ενσωμάτωσή τους στα υπάρχοντα δίκτυα. Επιπλέον είναι ικανά να καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές αλλά και να συνεργάζονται με τον πρώτο τύπο access points ώστε να επιτυγχάνουν ακόμη μεγαλύτερες περιοχές κάλυψης.



Σχήμα 1.6 Παράδειγμα υλοποίησης ενός WLAN δικτύου [49]



Αν και ένα WAN δίκτυο είναι εξ' ορισμού ακριβώς αντίθετο ενός LAN δικτύου, σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μια συνοπτική αναφορά για τα WWANs (Wireless WANs) δίκτυα καθώς η διάκριση μεταξύ αυτών των δύο για τους τελικούς χρήστες γίνεται όλο και λιγότερο εμφανής. Τα WWANs δίκτυα καλύπτουν εξαιρετικά ευρείες περιοχές βασιζόμενα στην κάλυψη που προσφέρουν οι πάροχοι των κυψελοειδών δικτύων αλλά παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων αρκετά μικρότερους από αυτούς των WLANs, οι οποίοι κυμαίνονται από 50 Kbps έως 2 Mbps. Τα περισσότερα πρότυπα των WWANs δικτύων (GSM, GPRS, UMTS) είναι αυτά που χρησιμοποιούνται για την κινητή τηλεφωνία τα οποία είναι διαθέσιμα όλο και περισσότερο για την πρόσβαση στο διαδίκτυο [50].

#### **1.5.2.1 IEEE 802.11a-1999**

Το πρότυπο αυτό λειτουργεί στη συχνότητα των 5 GHz και επιτυγχάνει μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 54 Mbps, ενώ με τη χρήση κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων επιτυγχάνει ρεαλιστικούς ρυθμούς μετάδοσης περίπου 27 Mbps. Η υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας ωστόσο έχει σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη του εμβέλεια έναντι των μεταγενέστερων 802.11b/g προτύπων, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 18 και 30 μέτρων. Το σήμα του εξασθενεί περισσότερο όταν απαιτείται να διαπεράσει τοίχους, ή γενικά ογκώδη αντικείμενα συγκριτικά με το 802.11b πρότυπο. Λόγω της λειτουργίας του σε υψηλότερη συχνότητα - έναντι των υπόλοιπων προτύπων τοπικής ασύρματης δικτύωσης η οποία δε χρησιμοποιείται σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο η συχνότητα των 2.4 GHz, επηρεάζεται λιγότερο από παρεμβολές άλλων συσκευών και συνεπώς είναι ιδανικότερο για περιοχές όπως αυτές των αεροδρομίων.

#### **1.5.2.2 IEEE 802.11b-1999**

Το πρότυπο αυτό υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως 11 Mbps. Εκτός των 11 Mbps ο 802.11b εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει στα 5.5, 2, και 1 Mbps εάν η ποιότητα του σήματος δεν είναι καλή. Πρακτικά στην περίπτωση μιας point-to-multipoint διαμόρφωσης ένα AP επικοινωνεί μέσω των πανκατευθυντικών κεραιών των κινητών χρηστών, σε μια περιοχή κάλυψης γύρω από το AP η οποία εκτίνεται μεταξύ των 20 και 45 μέτρων επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης 11 Mbps ενώ το

μέγιστο θεωρητικό εύρος της μετάδοσης μπορεί να φθάσει τα 100 μέτρα για ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps. Στην πράξη το 802.11b έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας στις χαμηλές ταχύτητες των 5 ή των 1 Mbps, εντούτοις το 802.11a μπορεί να έχει το ίδιο ή μεγαλύτερο εύρος εξαιτίας των μικρότερων παρεμβολών. Το 802.11 b δέχεται παρεμβολές από άλλες συσκευές οι οποίες λειτουργούν επίσης στη συχνότητα των 2.4 GHz όπως είναι τα ασύρματα τηλέφωνα, οι συσκευές παρακολούθησης βρεφών και οι Bluetooth συσκευές και επομένως δεν συνίσταται για εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μια αξιόπιστη σύνδεση όπως είναι η πραγματικόχρονη (real-time) μετάδοση βίντεο. Δεδομένου ότι το 802.11b δεν λειτουργεί στην ίδια συχνότητα με το 802.11a τα δύο αυτά πρότυπα δεν είναι διαλειτουργικά μεταξύ τους εκτός κ αν οι συσκευές τους υποστηρίζουν την dual-band λειτουργία. Η μείωση των τιμών του εξοπλισμού που υποστηρίζει το 802.11b οδήγησε στη γρήγορη αποδοχή του από το καταναλωτικό κοινό και στην καθιέρωση του ως το κυρίαρχο πρότυπο ασύρματης τοπικής δικτύωσης.

### **1.5.2.3 IEEE 802.11g-2003**

Τον Ιούνιο του 2003 επικυρώθηκε το 802.11g πρότυπο, το οποίο είναι γρηγορότερο του 802.11b, υποστηρίζοντας ρυθμούς μετάδοσης έως 54 Mbps. Σε πραγματικές συνθήκες διαθέτει εμβέλεια 20 έως 35 μέτρων, ελαφρώς μικρότερη αυτής του 802.11b, παραμένοντας ωστόσο καλύτερο από το 802.11a. Λειτουργεί στη συχνότητα των 2.4 GHz αντιμετωπίζοντας συνεπώς το ίδιο πρόβλημα εξαιτίας των παρεμβολών όπως και το 802.11b αλλά βασίζεται στην OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) μετάδοση όπως και το 802.11a. Το 802.11g είναι συμβατό με τα 802.11b προϊόντα, όμως αποτέλεσμα της συμβατότητας αυτής είναι η μείωση του ρυθμού μετάδοσης στο 802.11g δίκτυο. Μέχρι το καλοκαίρι του 2003, τα περισσότερα dual-band 802.11a/b προϊόντα μετατράπηκαν σε tri-band υποστηρίζοντας έτσι τα 802.11a και 802.11b/g πρότυπα ταυτοχρόνως.

### **1.5.2.4 IEEE 802.11n-2009**

Το 802.11n αποτελεί μια πρόσφατη βελτίωση των προηγούμενων 802.11 προτύπων ενσωματώνοντας κάποια τεχνολογικά στοιχεία αυτών αλλά και ορίζοντας κάποια νέα τεχνικά χαρακτηριστικά για την επίτευξη μεγαλύτερων

ταχυτήτων έναντι του 802.11a και του 802.11g όπως τη χρήση των MIMO κεραιών. Το IEEE έχει εγκρίνει την 802.11n τροποποίηση η οποία δημοσιεύθηκε τον Οκτώβριο του 2009. Ωστόσο πριν την τελική επικύρωση της αρκετοί κατασκευαστές άρχισαν να διαθέτουν προϊόντα (με χαρακτηρισμούς όπως pre-n) βασισμένα στα πρώτα προσχέδια (draft) της τεχνολογίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στις συζητήσεις για τη διαμόρφωση του προτύπου οι εκτιμήσεις της ταχύτητας δεν αφορούν την ονομαστική ταχύτητα του δικτύου, αλλά την ταχύτητα που πλησιάζει αρκετά σε αυτή που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Συγκεκριμένα, οι ταχύτητες μετάδοσης του 802.11n θα κυμαίνονται κατά μέσο όρο από 100 ως 140 Mbps, ενώ αναμένεται η θεωρητική μέγιστη ταχύτητα του να φτάνει ακόμη και τα 600 Mbps [50]. Ένα άλλο κύριο χαρακτηριστικό του 802.11n είναι η διατήρηση της συμβατότητας του με παλαιότερα πρότυπα, υποστηρίζοντας έτσι τη λειτουργία δικτύων που περιλαμβάνουν ετερογενείς συσκευές των b και g τεχνολογιών. Συνεπώς η συχνότητα λειτουργίας του ορίζεται στα 5 GHz ή στα 2.4 GHz.

Στον πίνακα 1.7 που ακολουθεί συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των 802.11a, 802.11b και 802.11g προτύπων.

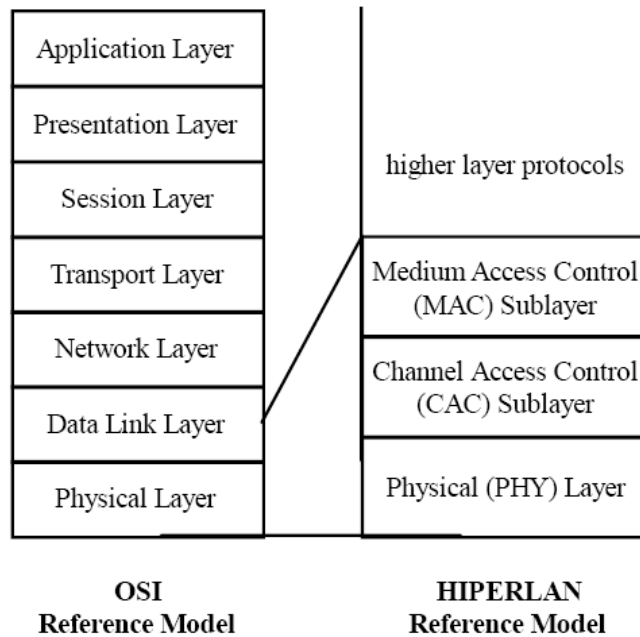
**Πίνακας 1.7** Κύρια χαρακτηριστικά των 802.11b, 802.11a και 802.11g προτύπων [49]

| <b>Standard</b>                           | <b>802.11b</b>  | <b>802.11a</b> | <b>802.11g</b> |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| <b>Capacity per Channel (Theoretical)</b> | 11 Mbps         | 54 Mbps        | 54 Mbps        |
| <b>Capacity per Channel (Actual)</b>      | 5 Mbps          | 27 Mbps        | 27 Mbps        |
| <b>Band Used/Range</b>                    | 2.4 GHz / 100 m | 5 GHz / 50 m   | 2.4 GHz/100 m  |
| <b>Technology</b>                         | DSSS            | OFDM           | OFDM           |
| <b>Number of Channels (U.S.)</b>          | 3               | 12             | 3              |
| <b>Number of Channels (Asia)</b>          | 3               | 4              | 3              |
| <b>Number of Channels (Europe)</b>        | 4               | 15             | 4              |

### 1.5.2.5 HiperLan/2

Το HiperLAN/2 παρέχει στους χρήστες του σε επιχειρησιακό και οικιακό επίπεδο κινητή ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο, υποστήριξη πολυμεσικών εφαρμογών και real-time υπηρεσιών βίντεο. Μια άλλη ιδιαιτερότητα του HiperLAN/2 είναι επίσης η ad-hoc περιαγωγή, η δυνατότητα δηλαδή της αυτόματης προώθησης των δεδομένων από access points σε access points στην περίπτωση όπου ο παραλήπτης δεν βρίσκεται στο βεληνεκές του αποστολέα. Η HiperLAN/2 προδιαγραφή ολοκληρώθηκε το Φεβρουάριο του 2000. Το φυσικό επίπεδο του HiperLAN/2 είναι αρκετά όμοιο με αυτό των IEEE 802.11a ασύρματων δικτύων. Το HiperLAN/2 λειτουργεί στην «ελεύθερη» ζώνη των 5 GHz επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης έως 54 Mbps. Στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιούνται τα BPSK, QPSK, 16QAM ή 64QAM σχήματα διαμόρφωσης. Στο MAC επίπεδο το HiperLAN/2 χρησιμοποιεί τη Dynamic TDMA τεχνική πρόσβασης στο κανάλι σε αντίθεση με το 802.11a το οποίο χρησιμοποιεί τη CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance). Το πρότυπο αυτό παρέχει αυξημένη ασφάλεια με τη χρήση των DES (Data Encryption Standard) και Triple DES αλγορίθμων. Τα ασύρματα τερματικά και τα access points μπορούν να επικυρώσουν το ένα το άλλο. Το HiperLAN/2 διαθέτει επιπλέον ένα επίπεδο το CAC (Channel Access and Control) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.7. Το CAC επίπεδο παρέχει τον EY-NPMA (Elimination-Yield Non-Preemptive Multiple Access mechanism) μηχανισμό προτεραιοτήτων. Με τη χρήση του μηχανισμού προτεραιοτήτων τα πακέτα δεδομένων κατηγοριοποιούνται και αποκτούν διαφορετική σειρά προτεραιότητας ανάλογα με τον τύπο τους. Για παράδειγμα τα πακέτα ενός βίντεο έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα κατά τη μεταφορά τους, με αποτέλεσμα την πιο ομαλή εμφάνισή του. Χάρη στον EY-NPMA μηχανισμό είναι δυνατή η υποστήριξη των πολυμεσικών εφαρμογών. Το HiperLAN/2, σε αντίθεση με όλα τα υπόλοιπα πρότυπα, είναι συμβατό με μια ποικιλία δικτύων. Εκτός της σύνδεσής του με Ethernet και IP δίκτυα, έχει δυνατότητα μεταφοράς ATM (Asynchronous Transfer Mode) και UMTS πακέτων [57, 58].

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση κατά τη μετάδοση των δεδομένων στα ασύρματα τοπικά δίκτυα είναι ο WEP (Wired Equivalent Privacy) ο οποίος θεσπίστηκε το 1997. Ο WEP προοριζόταν αρχικά για το 802.11b



Σχήμα 1.7 OSI και HiperLAN2 μοντέλα αναφοράς [61]

πρότυπο αλλά χρησιμοποιείται επίσης και από το 802.11a κρυπτογραφώντας τα δεδομένα μεταξύ του ασύρματου AP και του Η/Υ του χρήστη. Ωστόσο οι πολλές αδυναμίες του που εντοπίστηκαν από το 2001 οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι μια WEP σύνδεση μπορεί να είναι εύκολα προσβάσιμη εντός μερικών λεπτών με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού. Το 2003 ο WEP αλγόριθμος εκτοπίστηκε από μια νέα τεχνική κρυπτογράφησης τη WPA (Wi-Fi Protected Access). Παρά τις αδυναμίες του ο WEP χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως και συχνά αποτελεί την πρώτη επιλογή ασφάλειας εκ μέρους των χρηστών. Η πιο πρόσφατη τεχνική για την αντιμετώπιση των ζητημάτων ασφαλείας σήμερα είναι η WPA2 (Wi-Fi Protected Access 2) με τις συσκευές που χρησιμοποιούν το WPA2 να είναι διαλειτουργικές με τις WPA συσκευές [50, 51, 52].

### 1.5.3 Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα

Τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα τα οποία είναι γνωστά και ως WLLs (Wireless Local Loops), βασίζονται στο IEEE 802.16 πρότυπο. Μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 1 έως 10 Mbps για μια περιοχή κάλυψης που εκτείνεται μεταξύ 4 και 10 Km. Το πιο διαδεδομένο WMAN δίκτυο σήμερα είναι το WiMAX το οποίο μπορεί να επιτυγχάνει ρυθμούς

μετάδοσης 70 Mbps. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα κύρια WMANs πρότυπα.

### **1.5.3.1 WiMAX**

Το 1998 συστάθηκε μια ομάδα εργασίας από το IEEE με την επωνυμία 802.16, για την ανάπτυξη ενός νέου προτύπου που θα κάλυπτε τις ανάγκες των WMANs δικτύων. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και η 802.16 ομάδα εργασίας καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας. Τα IEEE 802.16 πρότυπα (η εμπορική ονομασία των οποίων είναι WiMAX), σχεδιάστηκαν ώστε να λειτουργούν σε μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz, υποστηρίζοντας ταχύτητες ασύρματης μετάδοσης έως 70Mbps σε εμβέλεια που ξεπερνά τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση για point-to-multipoint συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point-to-point συνδέσεις και τοπολογίες πλέγματος (mesh). Χρησιμοποιεί το OFDM σχήμα διαμόρφωσης, παρέχει υποστήριξη QoS μηχανισμών και συστημάτων προσαρμοστικών κεραιών (Adaptive Antenna System – AAS). Η λειτουργία των WiMAX δικτύων μελετάται εκτενέστερα στο τέταρτο κεφάλαιο.

### **1.5.3.2 WiBro**

Το WiBro (Wireless Broadband) είναι μια διαδικτυακή ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία που αναπτύχθηκε από το νοτιοκορεάτικο ίδρυμα τηλεπικοινωνιών ηλεκτρονικής και έρευνας (Electronics and Telecommunications Research Institute - ETRI). Το WiBro αποτελεί για την περιοχή της Νότιας Κορέας τεχνολογία αντίστοιχη αυτής του IEEE 802.16e διεθνούς προτύπου. Πρίν την έλευση του WiBro, προηγήθη το High-Speed Portable Internet το οποίο όμως δεν ήταν συμβατό με τα αναπτυσσόμενα WiMAX πρότυπα, οδηγώντας έτσι στην αντικατάστασή του από το συμβατότερο πρότυπο του WiBro. Το WiBro δημιουργήθηκε για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί μετάδοσης δεδομένων των κινητών τηλεφώνων (που χρησιμοποιούν για παράδειγμα το CDMA 1x) και για να προσθέσει το χαρακτηριστικό της κινητικότητας στην διαδικτυακή ευρυζωνική

πρόσβαση, χαρακτηριστικό το οποίο δεν προσφέρεται από την ADSL τεχνολογία και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Σημαντικός ανταγωνιστής του WiBro αποτελεί η HSDPA τεχνολογία.

Το Φεβρουάριο του 2002, η Κορεατική κυβέρνηση διέθεσε 100MHz φάσματος για τη λειτουργία του WiBro στη ζώνη των 2.3 - 2.4 GHz [53]. Το πλεονέκτημα της χρήσης του «αδειοδοτούμενου» φάσματος συχνοτήτων είναι ότι μειώνει το πρόβλημα οποιονδήποτε πιθανών παρεμβολών από άλλες πηγές που χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα. Η χρήση αυτού του φάσματος είναι μία ειδοποιός διαφορά μεταξύ του WiMAX και του WiBro και μπορεί να μην επιτρέπει στο WiBro διαθέσιμο σε παγκόσμια κλίμακα. Το WiBro υιοθετεί την TDD τεχνική πολυπλεξίας και την OFDMA τεχνική πρόσβασης για κανάλια εύρους ζώνης 8.75 MHz. Αν και το mobile WiMAX μαζί με το WiBro χρησιμοποιούν την OFDMA τεχνική πρόσβασης στο κανάλι, οι διαφορές τους ως προς το φυσικό επίπεδο όπως αυτή της χρήσης διαφορετικού εύρους ζώνης των καναλιών, καθιστούν αβέβαιο για το πώς θα επικοινωνήσουν τελικά μεταξύ τους καθώς το WiBro δε συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές που θέτει το WiMAX Forum. Οι σταθμοί βάσης του WiBro προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που κυμαίνονται από 30 έως 50 Mbps για μια περιοχή κάλυψης 1 έως 5 Km. Το WiBro είναι αρκετά όμοιο με το mobile WiMAX επιτρέποντας τη φορητή χρήση του διαδικτύου και προσφέροντας στους χρήστες τη πρόσβαση στο διαδίκτυο με αρχικές ταχύτητες των 700 Kbps σε τροχαίες ταχύτητες έως 120 Km/h [55] έναντι των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας οι οποίες προσφέρουν τις υπηρεσίες τους στους συνδρομητές για τροχαίες ταχύτητες έως 250 Km/h. Τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει επιτρέπουν την αξιόπιστη διανομή βίντεο και άλλων time-sensitive εφαρμογών [53, 54].

### **1.5.3.3 Mobile-Fi**

Η IEEE 802.20 (ή αλλιώς Mobile Broadband Wireless Access - MBWA) ομάδα εργασίας δημιουργήθηκε το 2002 με στόχο την ανάπτυξη διαλειτουργικών IP κινητών ευρυζωνικών δικτύων ασύρματης πρόσβασης, χαμηλού κόστους για τη λειτουργία τους σε παγκόσμια κλίμακα. Η IEEE 802.20 προδιαγραφή η οποία είναι γνωστή και ως Mobile-Fi ενεκρίθη στις 12 Ιουνίου 2008. Οι στόχοι του IEEE 802.20 είναι όμοιοι με αυτούς του IEEE 802.16e, ωστόσο το Mobile-Fi σε αντίθεση

με το mobile WiMAX θεωρείται ανταγωνιστής των 3G τεχνολογιών. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και το εύρος λειτουργίας του Mobile-Fi είναι κατά το ήμισυ μικρότερες από αυτές του mobile WiMAX. Υποστηρίζει μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 260 Mbps [56] για περιοχές κάλυψης μεγαλύτερες των 15 Km καθώς επίσης είναι εφικτή η λειτουργία του για εν κινήσει χρήστες με ταχύτητα 250 Km/h, σε αντίθεση με το WiMAX που υποστηρίζει τροχαίες ταχύτητες 100 Km/h. Επειδή το Mobile-Fi υιοθετεί τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ζώνες συχνοτήτων κάτω των 3.5 GHz, βελτιστοποιεί τη περιαγωγή και τη μεταπομπή των χρηστών καθολικά με ταχύτητες μεγαλύτερες του 1 Mbps [55]. Επιπλέον αυτού το γεγονός ότι το Mobile-Fi λειτουργεί μόνο στην «αδειοδοτούμενη» ζώνη κάτω των 3.5 GHz καθιστά τις πιθανότητες ευρείας υιοθέτησης του μικρές. Τόσο το IEEE 802.20 όσο και το WiMAX χρησιμοποιούν τις OFDM/MIMO και beamforming τεχνικές [55, 56].

#### 1.5.3.4 HiperAccess και HiperMAN

Το ETSI προκειμένου να ανταποκριθεί στην πίεση των αγορών για συνδέσεις χαμηλού κόστους και μεγάλης χωρητικότητας, την άνοιξη του 1997 καθιέρωσε το BRAN (Broadband-Compliant Radio Access Networks) πρόγραμμα τυποποίησης. Το ETSI BRAN πρόγραμμα βοηθά τους οργανισμούς τυποποίησης σχετικά με τις προδιαγραφές που απαιτούνται να εφαρμοστούν στα νέα ευρυζωνικά δίκτυα. Κάποιες από τις προδιαγραφές του ETSI BRAN είναι το HiperLAN/2 (High-Performance Radio LAN 2), το HiperAccess (High-Performance Radio Access) και το HiperMAN (High-Performance Radio MAN) [54].

- **HiperAccess.** Το HiperAccess είναι ένα πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται για την υπαίθρια σταθερή ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση υψηλών ταχυτήτων. Έχει σχεδιαστεί να παρέχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 100 Mbps αν και συνήθως επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης 25 Mbps. Λειτουργεί σε υψηλές ζώνες συχνοτήτων και ειδικά στη ζώνη μεταξύ των 40.5 και 43.5 GHz και είναι ικανό να υποστηρίζει πολυμεσικές εφαρμογές. Για αυτές τις ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιεί τη TDMA τεχνική πρόσβασης στο κανάλι. Τα πρώτα HiperAccess πρότυπα ήταν εμπορικά διαθέσιμα από το Δεκέμβριο του 2004 [54, 59].



- **HiperMAN.** Το HiperMAN είναι ένα πρότυπο για τη σταθερή και νομαδική ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση τόσο σε οικιακό όσο και σε περιβάλλον μικρομεσαίων επιχειρήσεων. Είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συχνότητες μεταξύ των 2 και των 11 GHz (και κυρίως στη ζώνη των 3.5 GHz [60]) και είναι διαλειτουργικό με το IEEE 802.16a-2003 πρότυπο της WiMAX οικογενείας προδιαγραφών. Το HiperMAN αποτελεί μια Ευρωπαϊκή εναλλακτική έναντι του WiMAX και του Κορεάτικου WiBro. Είναι σχεδιασμένο για τη διανομή δεδομένων ακόμη και σε περιοχές μη οπτικής επαφής μεταξύ του πομπού και του δέκτη και υιοθετεί τόσο τη FDD όσο και την TDD τεχνική εκπομπής και λήψης. Παρέχει QoS μηχανισμούς και υποστηρίζει την point-to-multipoint καθώς και την τοπολογία πλέγματος. Αν και το HiperMAN εστιάζει κυρίως σε IP δίκτυα, μπορεί επίσης να υποστηρίξει και δίκτυα ATM [60].

#### 1.5.4 Ασύρματα περιφερειακά δίκτυα

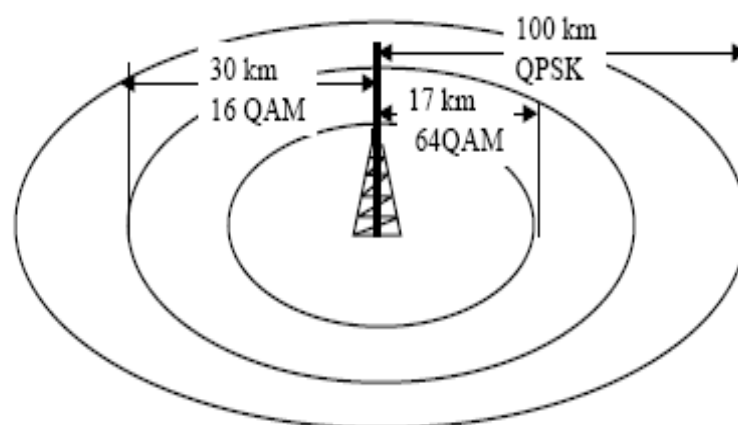
Για την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου τηλεοπτικού φάσματος, το IEEE 802.22 πρότυπο ευρυζωνικής πρόσβασης για τα ασύρματα περιφερειακά δίκτυα σχεδιάσθηκε ώστε να λειτουργεί στις μη χρησιμοποιούμενες UHF/VHF ζώνες συχνοτήτων τηλεοπτικής μετάδοσης μεταξύ των 54 και 862 MHz ή στις ζώνες ασφαλείας αυτών [62]. Το Νοέμβριο του 2004 συγκροτήθηκε η IEEE 802.22 ομάδα εργασίας για την ανάπτυξη ενός WRAN συστήματος για τη διανομή ευρυζωνικών υπηρεσιών ιδιαίτερα στις δυσπρόσιτες ή στις μη πολυπληθής περιοχές (όπως οι αγροτικές). Από το Μάιο του 2006 ήταν διαθέσιμη η v0.1 έκδοση του IEEE 802.22 προτύπου, ωστόσο ήταν αναγκαίες κάποιες βελτιώσεις για τη διαβεβαίωση του ότι οι χρησιμοποιούμενες ζώνες ασφαλείας δε θα προκαλούν παρεμβολές κατά τη μετάδοση αναλογικής και ψηφιακής τηλεόρασης καθώς και συσκευών χαμηλής ισχύος όπως είναι τα ασύρματα μικρόφωνα τα οποία λειτουργούν στις «αδειοδοτούμενες» ζώνες συχνοτήτων [62]. Το πρότυπο αυτό αναμένεται να έχει οριστικοποιηθεί μέχρι το πρώτο τρίμηνο του 2010.

Για την επίτευξη του στόχου τους τα WRAN συστήματα χρησιμοποιούν τη γνωστική ραδιο-τεχνολογία (cognitive radio technology) [63]. Κατά τη χρήση της τεχνολογίας αυτής ένα δίκτυο ή ένας ασύρματος κόμβος αλλάζει τις παραμέτρους

μετάδοσης ή λήψης για την αποφυγή παρεμβολών. Η αλλαγή των παραμέτρων βασίζεται στον ενεργό έλεγχο διάφορων παραγόντων όπως είναι το φάσμα συχνοτήτων [64].

Η υλοποίηση ενός WRAN συστήματος βασίζεται στην point-to-multipoint τοπολογία, αποτελούμενο από ένα σταθμό βάσης και από τον εξοπλισμό εγκατάστασης των πελατών (Customer Premise Equipment - CPE). Ο σταθμός βάσης μπορεί να είναι εφοδιασμένος με έναν GPS (Global Positioning System) δέκτη ο οποίος επιτρέπει τον εντοπισμό της θέσης του από τους κεντρικούς servers. Οι servers με τη σειρά τους ενημερώνουν κάθε σταθμό βάσης σχετικά με τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων που μπορεί να χρησιμοποιήσουν. Μία διαφορετική προσέγγιση έγγυται στον προσδιορισμό των ελεύθερων τηλεοπτικών συχνοτήτων από τον ίδιο το σταθμό βάσης ή το συνδυασμό αυτών των δύο τεχνικών μαζί. Η περιοχή εμβέλειας του σταθμού βάσης ενός WRAN συστήματος εκτείνεται σε εύρος 30 Km, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει τα 100 Km (σχήμα 1.8). Ένα IEEE 802.22 σύστημα έχει εύρος ζώνης καναλιού 6 MHz (το οποίο σε κάποιες χώρες μπορεί να είναι 7 ή 8 MHz [62]) και χωρητικότητα καναλιού 18 Mbps εξυπηρετώντας 12 χρήστες. Το σύστημα έχει καθοριστεί ώστε να διανέμει δεδομένα στους χρήστες με ρυθμό μετάδοσης 1.5 Mbps στην άνω ζεύξη και 384 Kbps στην κάτω ζεύξη όμοια με αυτές των DSL υπηρεσιών [63].

Το φυσικό επίπεδο ενός WRAN συστήματος πρέπει να είναι ευέλικτο ώστε να



Σχήμα 1.8 Εμβέλεια λειτουργίας του IEEE 802.22 προτύπου [37]

προσαρμόζεται στις διαφορετικές συνθήκες που προκύπτουν κατά τη μετακίνηση από ένα κανάλι σε ένα άλλο χωρίς την εμφάνιση σφαλμάτων τα οποία οδηγούν στη διακοπή των υπηρεσιών των χρηστών (CPEs). Η ευελιξία του φυσικού επιπέδου είναι απαραίτητη για τη δυναμική προσαρμογή του εύρους ζώνης, των σχημάτων διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στην άνω και στην κάτω ζεύξη είναι το OFDMA. Οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται σε κάθε κανάλι δεν είναι επαρκείς για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του προτύπου και για αυτό χρησιμοποιείται η τεχνική συνένωσης καναλιών (Channel Bonding) η οποία κάνει χρήση περισσότερων του ενός καναλιών αυξάνοντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης και συνεπώς την απόδοση του συστήματος.

Το MAC επίπεδο των WRAN συστημάτων βασίζεται στη γνωστική ραδιο-τεχνολογία. Το επίπεδο αυτό μέσω της ανίχνευσης του φάσματος πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αποτελείται από το frame και το superframe το οποίο με τη σειρά του αποτελείται από πολλά frames. Το superframe διαθέτει μία κεφαλίδα ελέγχου αυτού (η οποία ονομάζεται Superframe Control Header - SCH) και ένα προοίμιο (preamble) τα οποία αποστέλλονται από τη CPE κατά την ανίχνευση του φάσματος στο σταθμό βάσης, για την ενημέρωση του τελευταίου περί των διαθέσιμων καναλιών. Με βάση τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται, ο σταθμός βάσης αξιολογεί εάν είναι απαραίτητη ή όχι η αλλαγή του καναλιού που χρησιμοποιείται από μια CPE. Μια CPE χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς τύπους μετρήσεως του φάσματος, την in-band και την out-band. Κατά την in-band μέτρηση γίνεται ανίχνευση του καναλιού που χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης και τη CPE ενώ κατά την out-band μέτρηση γίνεται ανίχνευση των υπόλοιπων καναλιών. Αυτοί οι μηχανισμοί ανίχνευσης χρησιμοποιούνται κυρίως για να προσδιορίσουν εάν υπάρχει κάποια επικείμενη μετάδοση και για το εάν υπάρχει ανάγκη αποφυγής της για την αποτροπή παρεμβολών. Για να είναι αξιόπιστη η διαδικασία της ανίχνευσης δε θα πρέπει να επιτρέπεται ταυτοχρόνως η μεταφορά δεδομένων. Ωστόσο η περιοδική διακοπή της μεταφοράς δεδομένων μπορεί να προκαλέσει εξασθένηση (impairment), της ποιότητας υπηρεσίας του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό διευθετείται με τη χρήση της μεθόδου της δυναμικής διασποράς φάσματος (Dynamic Frequency Hopping - DFH) κατά την οποία η μετάδοση δεδομένων των

WRANs συστημάτων πραγματοποιείται ταυτοχρόνως με την ανίχνευση του φάσματος [62].

## 1.6 Επίλογος

Οι ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης κατηγοριοποιούνται σε αυτές που προσανατολίζονται στη μετάδοση φωνής και σε αυτές που προσανατολίζονται στη μετάδοση δεδομένων. Τα δίκτυα που προσανατολίζονται στη μετάδοση φωνής ταξινομούνται από τους κατασκευαστές των κυψελοειδών τηλεφωνικών συστημάτων και τους φορείς παροχής υπηρεσιών σε τέσσερις γενιές. Τα δίκτυα που προσανατολίζονται στη μετάδοση δεδομένων ταξινομούνται αντίστοιχα στα ασύρματα προσωπικά (WPANs), ασύρματα τοπικά (WLANs), ασύρματα μητροπολιτικά (WMANs) και ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (WRANs). Τα συστήματα πρώτης γενιάς προοριζόντουσαν για την παροχή υπηρεσιών φωνής και τη μετάδοση δεδομένων με μεταγωγή κυκλώματος σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (περίπου 9.6 kbps). Τα συστήματα αυτά δεν ήταν διαλειτουργικά μεταξύ τους και συνεπώς η περιαγωγή των χρηστών μεταξύ των χωρών της Ευρώπης δεν ήταν δυνατή. Επιπλέον χρησιμοποιούσαν την αναλογική διαμόρφωσης συχνότητας και χαρακτηριζόντουσαν από την έλλειψη ασφαλείας εξαιτίας της απουσίας της κρυπτογράφησης. Τέλος δεν υποστήριζαν τεχνικές συμπίεσης και κωδικοποίησης οι οποίες προϋποθέτουν τη χρήση του ψηφιακού συστήματος και για το λόγο αυτό καταργήθηκαν. Τα συστήματα δεύτερης γενιάς προσφέρουν ψηφιακή συμπίεση της φωνής σε σχέση με την αναλογική συμπίεση των συστημάτων πρώτης γενιάς επιτρέποντας τη διεξαγωγή περισσότερων κλήσεων ταυτοχρόνως. Επιπλέον έχουν δυνατότητα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης υπηρεσιών δεδομένων (16-32 kbps), όπως αυτή της αποστολής σύντομων γραπτών μηνυμάτων, την αναγνώριση κλήσεων και την περιορισμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τα κύρια πρότυπα που χρησιμοποιούνται από τα 2G συστήματα είναι το GSM, το GPRS και το EDGE. Τα GSM είναι δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος με αποτέλεσμα την ανεπαρκή χρήση του εύρους ζώνης και των διαθέσιμων πόρων, ενώ GPRS είναι ένα πρότυπο μεταγωγής πακέτων, στόχος του οποίου ήταν η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε σύγκριση με αυτόν των GSM δικτύων. Υποστηρίζει εφαρμογές διαδικτύου όπως αυτές του ηλεκτρονικού

ταχυδρομείου, της περιήγησης ιστοσελίδων καθώς και εφαρμογές πολυμεσικών υπηρεσιών επιτρέποντας την αποστολή και λήψη δεδομένων με ρυθμούς που κυμαίνονται από 14.4 έως 115 Kbps. Τα EDGE αποτελούν την εξέλιξη των GPRS δικτύων επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης έως 473.6 Kbps. Τα 1G και 2G συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των WWANs δικτύων. Τα συστήματα τρίτης γενιάς σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε να είναι εφικτή η περιαγωγή σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη και επιπλέον να υποστηρίζουν τα GSM δίκτυα. Τα κύρια πρότυπα αυτής της γενιάς δικτύων είναι το UMTS, EV-DO, το HSDPA και το LTE. Το UMTS είναι ένα σύστημα μεταγωγής πακέτων που βασίζεται στο GSM και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως 144 Kbps για τους εν κίνηση σε τροχαίες ταχύτητες χρήστες, έως 384 Kbps για τους πεζούς και έως 2 Mbps για τους σταθερούς χρήστες. Το UMTS μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με δορυφορικές συνδέσεις, ενώ το υψηλό εύρος ζώνης λειτουργίας του επιτρέπει τη χρήση υπηρεσιών όπως είναι η IPTV. Το EV-DO είναι εξ' ολοκλήρου ένα πρότυπο μεταγωγής πακέτων το οποίο παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες από άλλα υπάρχοντα CDMA δίκτυα ή άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το GPRS και το EDGE. Η θεωρητική μέγιστη ρυθμοαπόδοση του είναι 2.4 Mbps και είναι αρκετά γρήγορο όσο πολλές ευρυζωνικές DSL συνδέσεις. Στην πραγματικότητα οι εν κινήσει EV-DO χρήστες μπορούν προσδοκούν ταχύτητες από 400 έως 1000 Kbps και ταχύτητες άνω των 2 Mbps για τη σταθερή επικοινωνία και για περιοχές όπου η ισχύς του σήματος είναι μεγάλη και οι παρεμβολές μικρές. Παρέχει πρόσβαση σε IPTV και VoIP εφαρμογές καθώς επίσης υποστηρίζει εφαρμογές τηλεδιάσκεψης όταν ο εν κινήσει συνδρομητής ταξιδεύει με ταχύτητα 95 Km/h ή ακόμη και τηλεφωνικές κλήσεις στην περίπτωση που ο συνδρομητής μπορεί να ταξιδεύει με ταχύτητα μεγαλύτερη των 240 Km/h. Μία EV-DO σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει πολλούς υπολογιστές μαζί για τη δημιουργία ενός hotspot όπως ακριβώς και μια ADSL σύνδεση. Το HSDPA προσφέρει στα δίκτυα που είναι βασισμένα στο UMTS ταχύτητες πέντε φορές μεγαλύτερες από ένα UMTS δίκτυο. Αποτελεί ανταγωνιστή του EV-DO και σε αντίθεση με αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και δεδομένων. Το LTE αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή των UMTS συστημάτων και επιτυγχάνει μέγιστη θεωρητική ταχύτητα κινητού διαδικτύου 100 Mbps. Στα πλεονεκτήματα του συγκαταλέγονται το χαμηλότερο κόστος, η αυξημένη ασφάλεια, οι μικρότεροι χρόνοι καθυστέρησης και είναι διαλειτουργικό με τα GSM, CDMAone, UMTS και τα CDMA2000

συστήματα. Τα LTE συστήματα βασίζονται εξολοκλήρου στην IP αρχιτεκτονικής σε αντίθεση με τα UMTS συστήματα, τα οποία είναι ένας συνδυασμός αρχιτεκτονικής μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής κυκλώματος. Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς στοχεύουν στην ενοποίηση των WWANs, των WLANs και των WPANs για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ως προς την ασφάλεια, την ποιότητα των υπηρεσιών και των ρυθμών μετάδοσης, που τίθενται από την περαιτέρω ανάπτυξη των υπάρχουσών 3G εφαρμογών όπως είναι αυτές τις ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, της VoIP τεχνολογίας και των υπηρεσιών τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας. Η τέταρτη γενιά δικτύων περιλαμβάνει εξ' ολοκλήρου IP κινητά δίκτυα μεταγωγής πακέτων, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των οποίων μπορεί να φθάσει το 1 Gbps. Σε αυτά συγκαταλέγονται το IEEE 802.m πρότυπο και η LTE Advanced τεχνολογία και οι οποίες αναμένονται το 2011 και το 2012 αντίστοιχα. Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων συνήθως για αποστάσεις έως 10 μέτρων με κύριο εκπρόσωπο Bluetooth (πρότυπο IEEE 802.15.1). Στα ασύρματα τοπικά δίκτυα σήμερα κυριαρχεί η WiFi τεχνολογία με τα IEEE 802.11b και IEEE 802.11g πρότυπα. Το IEEE 802.11b επιτυγχάνει στην πράξη ρυθμούς μετάδοσης 2 και 5.5 Mbps για μια περιοχή κάλυψης 20 έως 45 μέτρων ενώ μπορεί να καλύψει ακόμη και μια περιοχή εμβέλειας 100 μέτρων όταν εκπέμπει με ρυθμούς μετάδοσης 1 Mbps. Το IEEE 802.11g διαθέτει εμβέλεια 20 έως 35 μέτρων επιτυγχάνοντας ρεαλιστικούς ρυθμούς μετάδοσης 27 Mbps. Η πιο πρόσφατη IEEE 802.11n WLAN προδιαγραφή αναμένεται να επιτυγχάνει πραγματικούς ρυθμούς μετάδοσης 100 έως 140 Mbps για μια περιοχή κάλυψης 50 έως 150 μέτρων. Στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα κυριαρχεί η τεχνολογία του WiMAX σημαντικό ανταγωνιστής του οποίου είναι το LTE, ενώ τα ασύρματα περιφερειακά δίκτυα λειτουργούν στις μη χρησιμοποιούμενες UHF/VHF ζώνες συχνοτήτων τηλεοπτικής μετάδοσης ή στις ζώνες ασφαλείας αυτών επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης έως 10 Mbps και εμβέλεια που σε μερικές περιπτώσεις να μπορεί να φθάσει τα 100 Km.

## 1.7 Βιβλιογραφία

- [1] [http://www.arp.sprnet.org/default/inserv/trends/history\\_wireless.htm](http://www.arp.sprnet.org/default/inserv/trends/history_wireless.htm) (Τελ. πρόσβ. 06/05/2010)
- [2] <http://www.exba.net/Art/3969/263/The-History-of-Wireless-Networking.html> (Τελ. πρόσβαση 06/05/2010)
- [3] <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=27374> (Τελευταία πρόσβαση 06/05/2010)
- [4] <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=27374&seqNum=3> (Τελ. πρόσβαση 06/05/2010)
- [5] Vijay K. Garg (2007), *Wireless Communication And Networking*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA
- [6] [http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/1G\\_-\\_First\\_Generation/](http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/1G_-_First_Generation/) (Τελ. πρόσβαση 06/05/2010)
- [7] <http://www.wiziq.com/tutorial/16064-GLOBAL-SYSTEM-FOR-MOBILE-COMMUNICATION> (Τελευταία πρόσβαση 10/05/2010)
- [8] Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practices", pp. 7, 9, 537, 594 and Smith & Collins *3G Wireless Networks* p. 28
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/2G> (Τελευταία πρόσβαση 09/05/2010)
- [10] [http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/2G\\_-\\_Second\\_Generation/](http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/2G_-_Second_Generation/) (Τελευταία πρόσβαση 13/05/2010)
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM> (Τελευταία πρόσβαση 13/05/2010)
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Personal\\_Communications\\_Service](http://en.wikipedia.org/wiki/Personal_Communications_Service) (Τελ. πρόσβ. 13/05/2010)
- [13] [http://ec.europa.eu/ellada/news/news/20090818mobile\\_internet\\_el.htm](http://ec.europa.eu/ellada/news/news/20090818mobile_internet_el.htm) (Τελευταία πρόσβαση 15/05/2010)
- [14] Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practices", p. 32 and Smith & Collins, *3G Wireless Networks*, p. 168
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/CDMA2000> (Τελευταία πρόσβαση 15/05/2010)
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed\\_Circuit-Switched\\_Data](http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Circuit-Switched_Data) (Τελ. πρόσβαση 15/05/2010)
- [17] <http://www.mobile-phone-directory.org/Glossary/G/GPRS.html> (Τελ. πρόσβαση 15/05/2010)
- [18] <http://www.mobileburn.com/definition.jsp?term=2.75G> (Τελευταία πρόσβαση 15/05/2010)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced\\_Data\\_Rates\\_for\\_GSM\\_Evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_Data_Rates_for_GSM_Evolution) (Τελευταία πρόσβαση 15/05/2010)
- [20] <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/UMTS> (Τελ. πρόσβαση 15/05/2010)
- [21] [http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/3G\\_-\\_Third\\_Generation/](http://www.mobile-phone-directory.org/Technology/3G_-_Third_Generation/) (Τελευταία πρόσβαση 17/05/2010)
- [22] <http://www.wisegEEK.com/what-is-evdo.htm> (Τελευταία πρόσβαση 17/05/2010)
- [23] <http://www.evdoinfo.com/content/view/37/61/> (Τελευταία πρόσβαση 17/05/2010)
- [24] <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/EV-DO> (Τελ. πρόσβαση 17/05/2010)
- [25] [http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed\\_Download\\_Packet\\_Access](http://en.wikipedia.org/wiki/High-Speed_Download_Packet_Access) (Τελ. πρόσβ. 19/05/2010)
- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Evolved\\_HSPA](http://en.wikipedia.org/wiki/Evolved_HSPA) (Τελευταία πρόσβαση 19/05/2010)
- [27] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dual-Cell\\_HSDPA](http://en.wikipedia.org/wiki/Dual-Cell_HSDPA) (Τελευταία πρόσβαση 19/05/2010)
- [28] [http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP\\_Long\\_Term\\_Evolution](http://en.wikipedia.org/wiki/3GPP_Long_Term_Evolution) (Τελευταία πρόσβαση 19/05/2010)
- [29] <http://www.myphone.gr/forum/showthread.php?t=269325> (Τελευταία πρόσβαση 21/05/2010)

- [30] <http://www.totaltele.com/view.aspx?ID=454421> (Τελευταία πρόσβαση 21/05/2010)
- [31] [http://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_Advanced](http://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced) (Τελευταία πρόσβαση 21/05/2010)
- [32] <http://www.3gpp.org/article/lte-advanced> (Τελευταία πρόσβαση 22/05/2010)
- [33] <http://en.wikipedia.org/wiki/4G> (Τελευταία πρόσβαση 22/05/2010)
- [34] [http://mobilesociety.typepad.com/mobile\\_life/2008/04/3gpp-moves-on-1.html](http://mobilesociety.typepad.com/mobile_life/2008/04/3gpp-moves-on-1.html) (Τελευταία πρόσβαση 23/05/2010)
- [35] <http://www.wimax.com/commentary/blog/blog-2010/february-2010/wimax-act-2-80216m-provides-evolution-path-to-4g-0203> (Τελευταία πρόσβαση 23/05/2010)
- [36] <http://www.myphone.gr/forum/showthread.php?t=270981> (Τελευταία πρόσβαση 19/05/2010)
- [37] [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/j\\_dwrn2.pdf](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/j_dwrn2.pdf) (Τελευταία πρόσβαση 27/05/2010)
- [38] <http://codeidol.com/telecommunications/telecommunications-essentials/WMANs,-WLANs,-and-WPANs/WPANs/> (Τελευταία πρόσβαση 19/05/2010)
- [39] <http://www.networkdictionary.com/wireless/WPAN.php> (Τελευταία πρόσβαση 25/05/2010)
- [40] <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth> (Τελευταία πρόσβαση 25/05/2010)
- [41] <http://www.networkdictionary.com/wireless/WPAN.php> (Τελευταία πρόσβαση 25/05/2010)
- [42] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-wideband> (Τελευταία πρόσβαση 25/05/2010)
- [43] Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practices", p. 32 and Smith & Collins, 3G Wireless Networks, p. 168
- [44] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZigBee\\_protocol\\_stack.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZigBee_protocol_stack.png) (Τελ. πρόσβ. 17/06/2010)
- [45] <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/files/html/module2/module2-4.htm> (Τελευταία πρόσβαση 17/06/2010)
- [46] <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/files/html/module2/module2-5.htm> (Τελευταία πρόσβαση 17/06/2010)
- [47] <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/files/html/module2/module2-6.htm> (Τελευταία πρόσβαση 17/06/2010)
- [48] <http://www.networkdictionary.com/wireless/WPAN.php> (Τελευταία πρόσβαση 17/06/2010)
- [49] <http://codeidol.com/telecommunications/telecommunications-essentials/WMANs,-WLANs,-and-WPANs/WLANs/> (Τελευταία πρόσβαση 18/06/2010)
- [50] <http://kb.iu.edu/data/aick.html> (Τελευταία πρόσβαση 18/06/2010)
- [51] <http://en.wikipedia.org/wiki/802.11> (Τελευταία πρόσβαση 18/06/2010)
- [53] <http://en.wikipedia.org/wiki/Wibro> (Τελευταία πρόσβαση 18/06/2010)
- [52] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wired\\_Equivalent\\_Privacy](http://en.wikipedia.org/wiki/Wired_Equivalent_Privacy) (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [54] <http://codeidol.com/telecommunications/telecommunications-essentials/WMANs,-WLANs,-and-WPANs/WMANs/> (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [55] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.20](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.20) (Τελευταία πρόσβαση 18/06/2010)
- [56] <http://3g4g.blogspot.com/2008/01/heard-of-mobilefi.html> (Τελευταία πρόσβαση 11/06/2010)
- [57] <http://egnatia.ee.auth.gr/~aalexiou/bloutoot.htm> (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [58] <http://en.wikipedia.org/wiki/HiperLAN> (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [59] [http://www.mpirical.com/companion/mpirical\\_companion.html#Generic/HiperAccess.htm](http://www.mpirical.com/companion/mpirical_companion.html#Generic/HiperAccess.htm) (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)



- [60] <http://en.wikipedia.org/wiki/HiperMAN> (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [61] <http://www.cs.uoi.gr/~εραρ/asurmata/downloads/lect6.pdf> (Τελευταία πρόσβαση 19/06/2010)
- [62] [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.22](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.22) (Τελευταία πρόσβαση 11/06/2010)
- [63] <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/ieee-802-22/ieee80222-wran-standard.php>  
(Τελευταία πρόσβαση 11/06/2010)
- [64] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive\\_radio](http://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio) (Τελευταία πρόσβαση 11/06/2010)



---

## **Κεφάλαιο 2**

# **Voice over IP & Video on Demand**

---



## 2.1 Εισαγωγή

Η Voice over IP είναι μια τεχνολογία για τη διανομή φωνής μέσα από IP δίκτυα. Η μετάδοση της φωνής καθίσταται εφικτή σε οποιοδήποτε συσκευή χρησιμοποιεί το IP πρωτόκολλο όπως είναι οι Η/Υ και οι διάφορες ασύρματες συσκευές οι οποίες υποστηρίζουν το Wi-Fi. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της είναι η φορητότητα και το χαμηλό κόστος ενώ για τη σύνδεση του συνδρομητή με τους φορείς παροχής των VoIP υπηρεσιών είναι απαραίτητη η χρήση μιας ATA (Analog Telephone Adapter) συσκευής για τη σύνδεση ενός αναλογικού τηλεφώνου σε ένα IP δίκτυο, η χρήση ενός VoIP τηλεφώνου για τη διεξαγωγή κλήσεων χωρίς τη χρήση κάποιου Η/Υ ή απλά η χρήση ενός λογισμικού που εγκαθίσταται στον Η/Υ.

Η Video on Demand υπηρεσία επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν και να παρακολουθήσουν ένα τηλεοπτικό πρόγραμμα, μια ταινία ή ένα μουσικό βίντεο κλιπ την επιθυμητή χρονική στιγμή. Τα VoD συστήματα διανέμουν το περιεχόμενο είτε σε έναν ψηφιακό μετασχηματιστή (Set Top Box - STB) για την αναπαραγωγή του από έναν τηλεοπτικό δέκτη, έναν Η/Υ ή άλλες συσκευές είτε επιτρέπουν τη μεταφόρτωση του σε έναν Η/Υ, μία συσκευή ψηφιακού καταγραφέα βίντεο (Digital Video Recorder - DVR) ή μια φορητή συσκευή αναπαραγωγής πολυμέσων για την προβολή του σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σήμερα η πλειονότητα των παρόχων προσφέρει τις VoD υπηρεσίες κατόπιν μιας μηνιαίας συνδρομής ή μέσω της ενοικίασης επιπλέον περιεχομένου (συνήθως ταινιών) για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο, για τη μετέπειτα προβολή τους την επιθυμητή χρονική στιγμή. Ωστόσο με τη χρήση του διαδικτύου και των Η/Υ είναι δυνατή και η δωρεάν αναπαραγωγή VoD περιεχομένου χωρίς να απαιτείται συνδρομή σε κάποιο φορέα παροχής VoD υπηρεσιών.

## 2.2 Voice over IP

Η VoIP τεχνολογία αποτελεί ένα γενικό όρο μιας οικογένειας τεχνολογιών μετάδοσης για τη διανομή των πακέτων φωνής μέσω των IP δικτύων. Άλλοι όροι συνώνυμοι της VoIP τεχνολογίας είναι η IP τηλεφωνία, η διαδικτυακή τηλεφωνία, το VoBB (Voice over Broadband) και η ευρυζωνική τηλεφωνία [1]. Η μετάδοση της φωνής μέσα από ροές δεδομένων καθίσταται εφικτή σε οποιοδήποτε συσκευή

χρησιμοποιεί το IP πρωτόκολλο, όπως είναι οι Η/Υ και οι διάφορες ασύρματες συσκευές [2].

Για την πραγματοποίηση μιας VoIP τηλεφωνικής κλήσης η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την ψηφιοποίηση των αναλογικών σημάτων φωνής, την απομόνωση των ανεπιθύμητων σημάτων θορύβου και κατόπιν τη συμπίεση/μετάφραση του ψηφιακού πλέον σήματος φωνής με τη χρήση αλγορίθμων συμπίεσης (codecs) στα IP πακέτα [1]. Κατόπιν της συμπίεσης τα πακέτα φωνής αποστέλλονται στο IP δίκτυο. Κάθε πακέτο χρειάζεται μία διεύθυνση προορισμού, έναν αριθμό ακολουθίας καθώς και δεδομένα για τον έλεγχο σφαλμάτων. Στο σημείο αυτό προστίθενται τα πρωτόκολλα σηματοδότησης για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων αλλά και των απαιτήσεων διαχείρισης των κλήσεων. Όταν ένα πακέτο φωνής φθάνει στον προορισμό του ο αριθμός ακολουθίας επιτρέπει στα πακέτα να τοποθετηθούν στη σωστή σειρά και έπειτα εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι αποσυμπίεσης για την ανάκτηση των δεδομένων από τα πακέτα. Κατόπιν πρέπει να ικανοποιηθούν οι ανάγκες συγχρονισμού και διαχείρισης της όποιας καθυστέρησης ενώ για την αντιμετώπιση της μεταβολής της καθυστέρησης (jitter) χρησιμοποιούνται περιοχές ενδιάμεσης αποθήκευσης (buffers). Στους buffers γίνεται αποθήκευση τα πακέτων που φθάνουν σε λάθος σειρά εξαιτίας της διαφορετικής δρομολόγησης που ακολουθούν, περιμένοντας τα υπόλοιπα πακέτα που καθυστερούν να φθάσουν [2].

Οι διαθέσιμοι μέθοδοι σύνδεσης με τους φορείς παροχής των VoIP υπηρεσιών είναι οι εξής:

- Μέσω μίας ATA (Analog Telephone Adapter) συσκευής για τη σύνδεση ενός αναλογικού τηλεφώνου σε ένα IP δίκτυο.
- Μέσω της χρήσης VoIP τηλεφώνων τα οποία επιτρέπουν τη διεξαγωγή VoIP κλήσεων χωρίς τη χρήση κάποιου Η/Υ αλλά απαραίτητως με μια ευρυζωνική σύνδεση ενεργή [3].
- Μέσω ενός softphone το οποίο είναι ένα λογισμικό που εγκαθίσταται σε έναν Η/Υ επιτρέποντας την πραγματοποίηση VoIP κλήσεων χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε επιπλέον συσκευής παρά μόνο ενός μικροφώνου [1, 3].

### 2.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Στα πλεονεκτήματα της VoIP τεχνολογίας μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

- **Χαμηλότερο κόστος.** Χάρη στη VoIP τεχνολογία είναι δυνατή η διεξαγωγή τηλεφωνικών κλήσεων μεταξύ δύο υπολογιστών ή μεταξύ ενός Η/Υ και μίας συσκευής τηλεφώνου. Οι κλήσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ των υπολογιστών είναι δωρεάν για οποιοδήποτε σημείο του κόσμου, ενώ για τις κλήσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ του Η/Υ και μίας συσκευής τηλεφώνου υπάρχει μια χρέωση η οποία είναι πολύ χαμηλότερη αυτής των συμβατικών κλήσεων. Ωστόσο κάποιοι πάροχοι χρεώνουν τις υπεραστικές κλήσεις όμοια με τους παρόχους των PSTN δικτύων [3]. Η χρέωση μπορεί να γίνεται ανά κλήση ή με την πληρωμή μιας μηνιαίας συνδρομής κατόπιν εγγραφής σε ένα φορέα παροχής υπηρεσιών. Η χρέωση βάσει μηνιαίας συνδρομής παρέχει σε αντάλλαγμα απεριόριστες κλήσεις στα πλαίσια μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής και συγκεκριμένο χρόνο κλήσεων για κάποιες άλλες γεωγραφικές περιοχές [2]. Σε αντίθεση με τα συμβατικά τηλεφωνικά δίκτυα όπου η χρέωση γίνεται ανά λεπτό ή ανά δευτερόλεπτο, οι VoIP κλήσεις τιμολογούνται ανά megabyte. Με άλλα λόγια οι VoIP κλήσεις τιμολογούνται βάσει των δεδομένων που αποστέλλονται μέσω του διαδικτύου και όχι βάσει της διάρκειας σύνδεσης του συνδρομητή στο δίκτυο. Ουσιαστικά η χρέωση της διανομής δεδομένων για μια δεδομένη χρονική περίοδο είναι πολύ μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί για το χρονικό διάστημα μιας κλήσης που συνδέεται σε μια συμβατική τηλεφωνική γραμμή. Επιπλέον κάποιοι πάροχοι επιτρέπουν στους συνδρομητές τους την επιλογή ενός κωδικού περιοχής διαφορετικό από αυτόν της περιοχής στην οποία ανήκουν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι χρήστες οι οποίοι καλούν κάποιο συγκεκριμένο συνδρομητή μπορεί να επιβαρύνονται με χρεώσεις υπεραστικής κλήσης, ανάλογα πάντα με τον κωδικό της περιοχής τους και την υπηρεσία την οποία χρησιμοποιούν [3].
- **Φορητότητα.** Η VoIP τεχνολογία επιτρέπει τη διεξαγωγή και τη λήψη τηλεφωνικών κλήσεων απ' όπου υπάρχει μια ευρυζωνική σύνδεση μόνο με την είσοδο του χρήστη στο VoIP λογαριασμό του [2].

- **Ασφάλεια.** Με τη VoIP τεχνολογία είναι δυνατή η πραγματοποίηση ασφαλών τηλεφωνικών κλήσεων με τη χρήση πρωτοκόλλων όπως είναι το SRTP (Secure Real Time Transport Protocol). Σε αντίθεση με ένα PSTN δίκτυο όπου τα δεδομένα δεν είναι ψηφιοποιημένα, στη VoIP τεχνολογία το μόνο που είναι απαραίτητο για τη διεξαγωγή ασφαλών τηλεφωνικών κλήσεων είναι η κρυπτογράφηση και η επικύρωση των ροών δεδομένων [1].
- **Άλλα πλεονεκτήματα.** Η VoIP τεχνολογία παρέχει επίσης ένα πλήθος προηγμένων χαρακτηριστικών επικοινωνίας χωρίς πρόσθετη χρέωση σε αντίθεση με αυτά των συμβατικών τηλεφωνικών υπηρεσιών. Παραδείγματα αυτών είναι η προώθηση και η αναμονή κλήσεων, το ταχυδρομείο φωνής (voicemail), η αναγνώριση κλήσεων, η τριμερής συνομιλία (three-way calling), κ.λπ. Επίσης παρέχει επιπλέον υπηρεσίες και χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια της συνομιλίας τα οποία είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε ένα PSTN τηλεφωνικό δίκτυο όπως είναι η δυνατότητα διαβίβασης περισσότερων από μίας τηλεφωνικών κλήσεων μέσα από μια ευρυζωνική σύνδεση καθώς και η ταυτόχρονη χρήση υπηρεσιών που είναι διαθέσιμες μέσω του διαδικτύου όπως είναι η συνομιλία μέσω βίντεο, η ανταλλαγή μηνυμάτων ή αρχείων [1].

Στα μειονεκτήματα της VoIP τεχνολογίας συγκαταλέγονται τα εξής:

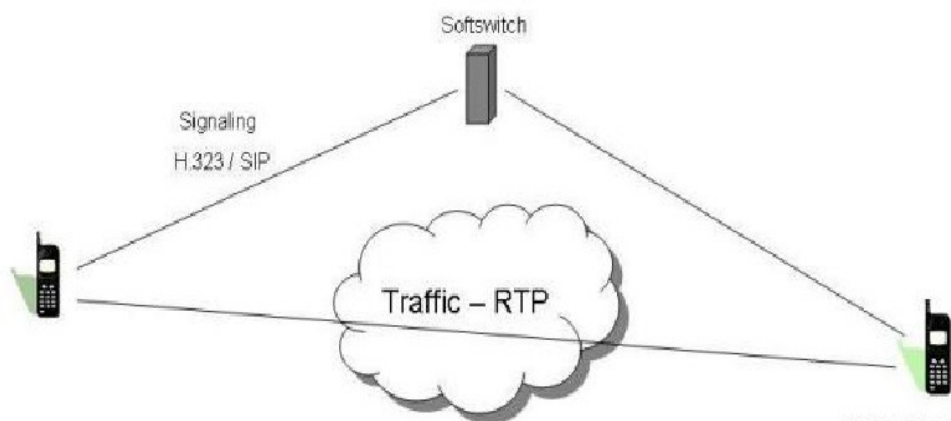
- **Απώλεια υπηρεσίας κατά τη διακοπής της ηλεκτρικής ενέργειας.** Μια λύση για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος αποτελεί η χρήση μπαταριών ή γεννητριών για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.
- **Κλήσεις έκτακτης ανάγκης.** Η VoIP τεχνολογία δε μπορεί να πραγματοποιήσει κλήσεις έκτακτης ανάγκης όπως συμβαίνει με μια συμβατική τηλεφωνική σύνδεση η οποία μπορεί ανιχνεύσει την τοποθεσία από την οποία γίνεται η κλήση στην περίπτωση που το άτομο δε μπορεί να μιλήσει. Αυτό συμβαίνει διότι μια VoIP κλήση αποτελεί ουσιαστικά μια μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο IP διευθύνσεων και όχι μεταξύ δύο φυσικών διευθύνσεων.



- **Αξιοπιστία.** Εξαιτίας του γεγονότος ότι η VoIP τεχνολογία βασίζεται σε μια διαδικτυακή σύνδεση, επηρεάζεται από την ποιότητα και την αξιοπιστία της ευρυζωνικής σύνδεσης καθώς και από τους περιορισμούς που τίθενται από τους Η/Υ. Οι συνδέσεις διαδικτύου χαμηλών ταχυτήτων καθώς και η συμφόρηση μπορούν να έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής. Επιπλέον εάν άλλες εφαρμογές χρησιμοποιούνται ταυτοχρόνως με την πραγματοποίηση μιας VoIP κλήσης, η ποιότητα φωνής της κλήσης αυτής ενδέχεται να επηρεαστεί.
- **Άλλα μειονεκτήματα.** Κάποια VoIP τηλέφωνα δεν είναι συμβατά με τους αναγνώστες οθόνης οι οποίοι χρησιμοποιούνται ειδικά από ανθρώπους που έχουν περιορισμένη όραση ή δυσκολίες ακοής [2].

### 2.2.2 Πρωτόκολλα σηματοδότησης

Για την εγκαθίδρυση της διαδρομής και τη μετάδοση της φωνής μέσα από το IP δίκτυο χρησιμοποιούνται τα H.323 και SIP (Session Initiation Protocol) πρωτόκολλα σηματοδότησης (σχήμα 2.1). Μόλις καθιερωθεί η διαδρομή χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα μεταφοράς όπως είναι το UDP (User Datagram Protocol), το TCP (Transmission Control Protocol) και το RTP (Real-time Transport Protocol) για τη διανομή των ρών δεδομένων [2].



**Σχήμα 2.1** Χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα για τη δρομολόγηση των ρών δεδομένων [2]

### 2.2.2.1 H.323

Το H.323 πρωτόκολλο δημοσιεύθηκε από την ITU-T για τη χρήση του σε πολυμεσικές εφαρμογές packet-based δικτύων. Το H.323 ανήκει στην ITU-T H.32x σειρά προτύπων τα οποία προορίζονται για την πολυμεσική επικοινωνία μέσω PSTN, ISDN και κινητών 3G δικτύων [4]. Αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογές τηλεδιάσκεψης μέσω τοπικών δικτύων αλλά αργότερα και για τη διαβίβαση φωνής μέσα από διάφορα δίκτυα IP συμπεριλαμβανομένων των WANs και του διαδικτύου (VoIP) σε συνδυασμό με τα PSTN ή ISDN δίκτυα. Το SIP πρωτόκολλο το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για τη VoIP τεχνολογία ανταγωνίζεται το H.323, ωστόσο το H.323 είναι πιο διαδεδομένο εξαιτίας της ύπαρξης του στα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα. Το πρότυπο αυτό είναι διαλειτουργικό και υποστηρίζει point-to-point και point-to-multipoint συνδέσεις. Το H.323 διαθέτει λειτουργίες ελέγχου της σηματοδότησης και των κλήσεων, του εύρους ζώνης, της μεταφοράς των πολυμεσικών δεδομένων [4], εγκαθίδρυσης καναλιού καθώς και αλγορίθμους συμπίεσης για τη real-time μετάδοση φωνής και βίντεο μέσω δικτύων τα οποία δεν εγγυώνται την ποιότητα της υπηρεσίας [2].

### 2.2.2.2 Session Initiation Protocol

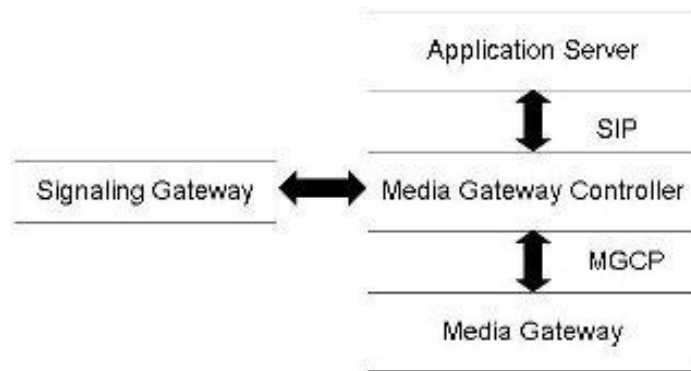
Το SIP είναι ένα ακόμη πρωτόκολλο για τη VoIP σηματοδότηση, το οποίο ανήκει στο επίπεδο εφαρμογών του OSI μοντέλου. Το Νοέμβριο του 2000 το SIP έγινε δεκτό ως μέλος της 3GPP οικογένειας πρωτοκόλλων σηματοδότησης για την IP διανομή πολυμεσικών υπηρεσιών στα κυψελοειδή συστήματα [5]. Ενσωματώνει πολλά στοιχεία του SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) και του HTTP (Hypertext Transfer Protocol) πρωτοκόλλου και η σύνταξή του βασίζεται στο κείμενο, συγκρίσιμη με αυτή που χρησιμοποιεί το HTTP στις διευθύνσεις ιστού. Μια διεύθυνση ιστού είναι συγκρίσιμη με έναν αριθμό τηλεφώνου σε ένα SIP δίκτυο. Οι αριθμοί τηλεφώνου ενός PSTN δικτύου είναι συμβατοί με ένα SIP δίκτυο, έτσι επιβεβαιώνεται η διασύνδεση με τα PSTN συστήματα. Το SIP πρωτόκολλο παρέχει επίσης λειτουργίες κινητικότητας στους χρήστες καθώς επίσης υποστηρίζεται κατά τη διάρκεια μιας κλήσης η ταυτόχρονη λειτουργία παιχνιδιών και η ανταλλαγή μηνυμάτων (instant messages). Συνεργάζεται με τα περισσότερα πρωτόκολλα όπως είναι το RTP, το SDP (Session Description

Protocol) και το SAP (Session Announcement Protocol). Επίσης απαιτούνται επιπλέον πρωτόκολλα για τις λειτουργίες της μεταφοράς και της σηματοδότησης όπως το RSVP (Resource Reservation Protocol), το LDAP και το RADIUS. Το SIP λειτουργεί βάση μιας client - server αρχιτεκτονικής, όπου ένας client προσφωνείται ως User Agent (UA). Ο UA αλληλεπιδρά με το server μέσω ενός Η/Υ ή μέσω ενός IP τηλεφώνου [2].

### 2.2.3 Softswitch

Σε ένα δίκτυο απαιτούνται τρεις βασικές λειτουργίες, η δρομολόγηση, η μετάδοση, και η τιμολόγηση. Οι ίδιες λειτουργίες απαιτούνται και στο διαδίκτυο στην περίπτωση που οι VoIP κλήσεις πραγματοποιούνται εξ' ολοκλήρου με τη χρήση αυτού. Για τα PSTN δίκτυα το μεγαλύτερο μέρος των λειτουργιών αυτών εκτελείται με τη χρήση μεταγωγέων (switches). Οι μεταγωγείς περιλαμβάνουν δύο βασικά στοιχεία, το switching fabric το οποίο υλοποιεί τη φυσική σύνδεση, και το switching logic το οποίο παρέχει τις λειτουργίες διαχείρισης, της δρομολόγησης, του ελέγχου των κλήσεων καθώς και διεπαφές σε άλλα συστήματα όπως αυτά της τιμολόγησης. Σήμερα μια νέα γενιά switches τα λεγόμενα softswitches, χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των PSTN και των VoIP δικτύων. Το softswitch είναι μία συσκευή πολύ οικονομικότερη στην αγορά και τη συντήρησή της σε σύγκριση με τα συμβατικά switches που χρησιμοποιούνται στα PSTN δίκτυα [2]. Ένα softswitch αντικαθιστά τις περισσότερες λειτουργίες μεταγωγής που απαιτούσαν τη χρήση υλικού με τη χρήση λειτουργιών λογισμικού. Επιπλέον το switching fabric διαχωρίζεται από το switching logic, επιτρέποντας την εκτέλεση των επιμέρους λειτουργιών τους από διαφορετικές συσκευές οι οποίες βρίσκονται πιθανώς σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Το softswitch είναι τοποθετημένο στο Central Office (CO) ενός φορέα παροχής υπηρεσιών τηλεφωνίας [6] και η αρχιτεκτονική του αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία, έναν call agent και μια media gateway. Ένας call agent ο οποίος αναφέρεται επίσης και ως media gateway controller ή call controller (σχήμα 2.2) χειρίζεται τη δρομολόγηση των κλήσεων, τη δρομολόγηση των μηνυμάτων σηματοδότησης στο δίκτυο, την τιμολόγηση καθώς και άλλες λογικές λειτουργίες. Μία media gateway παρέχει τη φυσική διασύνδεση των ροών που διανέμονται μεταξύ του PSTN και του VoIP δικτύου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για τη



Σχήμα 2.2 Συστατικά στοιχεία softswitch [2]

δημιουργία των πακέτων μιας ροής φωνής ενός PSTN δικτύου και ελέγχεται από το softswitch το οποίο παρέχει λειτουργίες σηματοδότησης και ελέγχου των κλήσεων. Επιπλέον διαθέτει διεπαφές για τη σύνδεση της σε ένα PSTN, ATM (Asynchronous Transfer Mode) ή IP δίκτυο ενώ στα μοντέρνα συστήματα διαθέτει Ethernet διεπαφές για τη σύνδεση των VoIP κλήσεων [1]. Ο call agent καθοδηγεί τη media gateway έτσι ώστε να συνδέσει τις ροές μεταξύ αυτών των διεπαφών για τη σύνδεση των κλήσεων με τους τελικούς χρήστες [7] καθώς επίσης διαθέτει ικανότητα ελέγχου περισσότερων από μία media gateway οι οποίες μπορεί να είναι γεωγραφικά διασκορπισμένες [8]. Η επικοινωνία μεταξύ της media gateway και του call agent επιτυγχάνεται μέσω των MGCP και SIP πρωτοκόλλων.

Το softswitch αποτελείται επίσης από μία signaling gateway και έναν application server. Η signaling gateway χρησιμοποιείται μεταξύ ενός IP και ενός PSTN δικτύου για τη διαλειτουργικότητα του SS7 πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται από τα PSTN δίκτυα και τα SIP/H.323 πρωτόκολλα. Ο application server είναι αρμόδιος για όλες τις υπηρεσίες που παρέχονται στον πελάτη όπως το φωνητικό ταχυδρομείο και η προώθηση κλήσεων [2].

Οι σύγχρονες media gateways οι οποίες χρησιμοποιούν το SIP είναι συχνά ανεξάρτητες μονάδες με τους μηχανισμούς ελέγχου των κλήσεων και τους μηχανισμούς σηματοδότησης ενσωματωμένους σε αυτές [7]. Το softswitch αποτελεί μια προηγμένη λύση έναντι της gatekeeper τεχνολογίας η οποία υποστήριζε το H.323, εξαιτίας του γεγονότος ότι το H.323 περιοριζόταν μόνο σε

LAN δίκτυα. Η λειτουργία της gatekeeper τεχνολογίας μπορούσε να διαχειριστεί μερικά μόνο gateways [2].

#### 2.2.4 Ποιότητα φωνής

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα της φωνής κατά τη διάρκεια μιας VoIP κλήσης είναι οι ακόλουθοι:

- **Καθυστέρηση.** Η ασύρματη διάδοση των πακέτων φωνής προξενεί καθυστέρηση η οποία μπορεί να είναι αποτέλεσμα της καθυστέρησης στην κωδικοποίηση του καναλιού στο φυσικό επίπεδο, της αναμονής των πακέτων στην ουρά στο επίπεδο δικτύου, της δημιουργίας πακέτων στο επίπεδο εφαρμογών, της αποκωδικοποίησης, κ.λπ. Κατόπιν διάφορων μελετών το συμπέρασμα είναι πως η καθυστέρηση της φωνής η οποία δεν ξεπερνά τα 100 ms είναι αποδεκτή ενώ εάν η καθυστέρηση αυτή ξεπερνά τα 150 ms τότε το σήμα της φωνής δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει την καθυστέρηση που προκαλείται κατά τη χρήση των διάφορων codecs.
- **Απώλεια πακέτων.** Η VoIP τεχνολογία παρουσιάζει ανεκτικότητα στην περίπτωση της απώλειας πακέτων αν και είναι υπερβολικά επιζήμια για τα σήματα φωνής καθώς η επαναμετάδοση δεν αποτελεί επιλογή κατά τη διαβίβαση φωνής. Μια απώλεια πακέτων της τάξης του 1% μπορεί να υποβιβάσει την ποιότητα μιας VoIP κλήσης κατά τη χρήση του G.711 αλγορίθμου συμπίεσης. Η ανεκτικότητα στην απώλεια πακέτων είναι ακόμη μικρότερη κατά τη χρήση άλλων πιο αποδοτικών αλγορίθμων συμπίεσης όπως ο G.729 ο οποίος απαιτεί απώλεια πακέτων σε ποσοστό πολύ μικρότερο του 1% για την επίτευξη καλής ακουστικής ποιότητας. Για τη διόρθωση του φαινομένου της απώλειας πακέτων χρησιμοποιούνται προηγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης και διορθώσεων σφαλμάτων για να καλύψουν τα κενά που δημιουργούνται από αυτή. Συγκεκριμένα ένα δείγμα της φωνής του ομιλητή αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται για την επαναδημιουργία ενός νέου ήχου από τον αλγόριθμο, ο οποίος προσπαθεί να προσεγγίσει το περιεχόμενο των απολεσθέντων πακέτων. Η συνολική απώλεια πακέτων μπορεί να

περιλαμβάνει την απώλεια που προκαλείται από τους παρόχους των VoIP υπηρεσιών ή το τοπικό δίκτυο του χρήστη [9].

- Jitter.** Εξαιτίας της μεταβλητής φύσης του ρυθμού μετάδοσης των πακέτων ενός βίντεο υπάρχει μία χρονική διακύμανση στην άφιξη τους η οποία είναι γνωστή ως μεταβολή της καθυστέρησης (jitter). Η μεταβολή καθυστέρησης μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους αλλά οι προμηθευτές εξοπλισμού και δικτύων συχνά δεν προσδιορίζουν ακριβώς πώς υπολογίζουν την τιμή αυτή [9]. Τα περισσότερα VoIP τηλέφωνα και οι ATA συσκευές διαθέτουν περιοχές ενδιάμεσης αποθήκευσης οι οποίες για την παραγωγή μιας ομαλής ροής φωνής προσαρμόζονται ανάλογα με την καθυστέρηση που προξενείται από το δίκτυο και ονομάζονται adaptive buffers [2]. Οι jitter buffers οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν την καθυστέρηση προσθέτουν επιπλέον καθυστέρηση και συνήθως είναι αποτελεσματικοί όταν αυτή είναι μικρότερη των 100 ms. Η μέγιστη τιμή της μεταβολής της καθυστέρησης που προσδιορίζεται από τους διάφορους προμηθευτές δικτύων κυμαίνεται από 0.5 έως 2 ms και η συνολική τιμή της μπορεί να περιλαμβάνει και τη μεταβολή της καθυστέρησης που προκαλείται από τους παρόχους των VoIP υπηρεσιών και το τοπικό δίκτυο του χρήστη [9].

**Πίνακας 2.1** Μετρήσεις καθυστέρησης κατά τη χρήση των διάφορων τύπων codecs [2]

| CODEC   | Bit Rate           | MOS  | Delay |
|---------|--------------------|------|-------|
|         | Kbps               |      | ms    |
| G.711   | 64                 | 4.5  | 0.125 |
| G.723.1 | 5.3                | 3.6  | 30    |
|         | 6.3                | 3.98 |       |
| G.726   | 16-24-32-40        | 4.2  | 0.125 |
|         | Most commonly used |      |       |
| G.728   | 32                 | 4.2  | 2.5   |
|         | 16                 |      |       |
| G.729   | 8                  | 4.2  | 10    |

## **2.2.5 Τεχνικές μέτρησης ποιότητας**

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ποιότητας του ήχου μιας VoIP κλήσης είναι η MOS (Mean Opinion Score) και η PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement).

### **2.2.5.1 MOS**

Κατά τη μέτρηση της ποιότητας της φωνής με τη MOS τεχνική γίνεται αξιολόγηση κάποιων παραμέτρων όπως είναι η αλλοίωση (distortion), η καθυστέρηση, η ηχώ, ο θόρυβος σε μια κλίμακα μέτρησης από 1 έως 5, όπου κατόπιν υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Για τις συμβατικές τηλεφωνικές γραμμές στις οποίες χρησιμοποιείται ο G.711 αλγόριθμος συμπίεσης και για ρυθμό μετάδοσης 64 Kbps η τιμή της MOS τεχνικής είναι 4.0. Στη VoIP τεχνολογία χρησιμοποιούνται κυρίως οι G.723 και G.729 αλγόριθμοι συμπίεσης. Ο G.729 χρησιμοποιείται ευρέως εξαιτίας των χαμηλών απαιτήσεων του σε εύρος ζώνης με την τιμή της MOS να είναι ίση με 4.0 για ρυθμό μετάδοσης 8 Kbps. Ο G.723 ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως στην τηλεοπτική τηλεφωνία, έχει τιμή MOS ίση με 3.8 για ρυθμό μετάδοσης ίσο με 5.3 ή 6.8 Kbps.

### **2.2.5.2 PSQM**

Η μέτρηση της ποιότητας της φωνής με τη PSQM τεχνική γίνεται με τη χρήση τεχνητής ομιλίας με την οποία υπολογίζεται η κατά προσέγγιση λεκτική σαφήνεια λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση του θορύβου, των σφαλμάτων κωδικοποίησης, τη φάση της μεταβολής της καθυστέρησης και την ταξινόμηση των πακέτων. Όταν η τιμή της PSQM είναι 0 δεν υπάρχει κάποια εξασθένιση ωστόσο όταν τιμή της διαμορφώνεται στο 6.5 το σήμα είναι ακατάλληλο προς χρήση. Αν και οι τιμές της PSQM τεχνικής δεν έχουν κάποιο άμεσο συσχετισμό με τις τιμές της MOS τεχνικής ωστόσο όταν η τιμή της PSQM είναι 0 αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην τιμή 5 της MOS τεχνικής και όταν η τιμή της PSQM είναι 6.5 αντιστοιχεί στην τιμή 1 της MOS τεχνικής [2].

### 2.2.6 Παραβιάσεις ασφαλείας

Κατά την αρχική περίοδο εφαρμογής της VoIP τεχνολογίας η προσοχή ήταν στραμμένη κυρίως σε θέματα κόστους, λειτουργικότητας και αξιοπιστίας. Μετά την ευρεία αποδοχή και επικράτησή της ως μία εκ των κύριων τεχνολογιών επικοινωνίας η ασφάλεια αποτελεί πλέον σημαντικό ζήτημα. Τα ζητήματα ασφαλείας αποκτούν ακόμη μεγαλύτερη βαρύτητα από τη στιγμή που αρχίζουν και αντικαθιστούν το παλαιότερο και ασφαλέστερο σύστημα τηλεφωνικής επικοινωνίας (γνωστό ως Plain Old Telephone System - POTS). Καθώς η κρυπτογράφηση δεν είναι συνήθης από το SIP πρωτόκολλο το οποίο ελέγχει την επικύρωση των VoIP κλήσεων οι χρήστες εκτίθενται στις ακόλουθες παραβιάσεις ασφαλείας:

- **Call tampering.** Η αλλοίωση της κλήσης είναι ένα είδος παραβίασης όπου ο «επιτιθέμενος» αλλοιώνει τη ποιότητα της κλήσης με την παρεμβολή πακέτων θορύβου μέσα στη ροή επικοινωνίας. Μπορεί επίσης να παρακρατήσει κάποια πακέτα που μεταδίδονται με συνέπεια οι συνομιλούντες να αντιμετωπίζουν μεγάλες περιόδους σιωπής κατά τη διάρκεια της κλήσης.
- **Denial Of Service (DOS).** Η DOS αναφέρεται στην παραβίαση ενός δικτύου ή μιας συσκευής μέσω της άρνησης της σύνδεσης αυτού ή αυτής στην υπηρεσία. Μπορεί να προκληθεί εξαιτίας της έλλειψης εύρους ζώνης ή εξαιτίας της υπερφόρτωσης του δικτύου και των εσωτερικών πόρων της συσκευής. Η παραβίαση αυτή επιτυγχάνεται με την τροφοδότηση ανεπιθύμητων SIP μηνυμάτων σηματοδότησης, προκαλώντας την πρόωρη διακοπή της κλήσης. Στόχος αυτής της παραβίασης είναι ο «επιτιθέμενος» να αποκτήσει τον έλεγχο του συστήματος.
- **Man-in-the-middle.** Αποτελεί μια κοινή παραβίαση ασφαλείας όπου ο «επιτιθέμενος» παρεμποδίζει την κίνηση των SIP μηνυμάτων σηματοδότησης της κλήσης μεταξύ δύο μερών τα οποία είναι γνωστά μεταξύ τους. Εν συνεχεία ο κακόβουλος host ελέγχει τη ροή της επικοινωνίας υποκρινόμενος τον αρχικό αποστολέα τον οποίο και εμπιστεύεται ο παραλήπτης. Καθώς αυτό δε γίνεται αντιληπτό από τον αρχικό αποστολέα ή τον παραλήπτη, ο «επιτιθέμενος» μπορεί αποσπάσει εμπιστευτικές πληροφορίες. Οι man-in-the-middle παραβιάσεις έχουν δύο μορφές, είτε την eavesdropping δηλαδή την ικανότητα του επιτιθέμενου να



ακούει είτε την αλλοίωση των μηνυμάτων. Η eavesdropping παραβίαση αναφέρεται στη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση τρίτων σε ονόματα χρηστών, κωδικούς πρόσβασης και τηλεφωνικούς αριθμούς που τους επιτρέπουν να έχουν τον έλεγχο του φωνητικού ταχυδρομείου, των κλήσεων, της προώθησης κλήσεων καθώς και των πληροφοριών χρέωσης. Αυτό οδηγεί στη συνέχεια στην κλοπή των υπηρεσιών. Η κλοπή των υπηρεσιών δεν είναι ο μόνος λόγος αυτής της παραβίασης καθώς συχνά αυτό που είναι επιθυμητό είναι η πρόσβαση σε επιχειρησιακά δεδομένα. Οι επιθέσεις κατά τις οποίες προκαλείται αλλοίωση βασίζονται στην eavesdropping παραβίαση. Ο επιτιθέμενος παίρνει αυτή την μη εξουσιοδοτημένη απόκριση, αλλάζοντας τα περιεχόμενα ώστε να ικανοποιούν έναν ορισμένο σκοπό, χρησιμοποιώντας πιθανώς μια ψευδή IP διεύθυνση για να μιμηθεί κάποιον άλλο host [10].

- **Vishing.** Η παραβίαση αυτή αποτελεί έναν εναλλακτικό όρο της VoIP phishing και αναφέρεται στην αποστολή μηνυμάτων μέσω του φωνητικού ταχυδρομείου προσποιούμενα ότι προέρχονται από αξιόπιστα μέρη όπως αυτά των τραπεζών και των online υπηρεσιών πληρωμής. Τέτοια μηνύματα απαιτούν προσωπικά δεδομένα όπως κωδικούς πρόσβασης και αριθμούς πιστωτικών καρτών.
- **Spamming over Internet Telephony.** Όπως ακριβώς και στην περίπτωση του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου το spamming μπορεί να εμφανιστεί και στη VoIP τεχνολογία. Κάθε VoIP λογαριασμός προσδιορίζεται από μία IP διεύθυνση και συνεπώς αν και δεν είναι πολύ σύνηθες ακόμη, είναι εύκολο να αποσταλούν τέτοια μηνύματά (voicemail) σε χιλιάδες διευθύνσεις IP. Επιπλέον τα μηνύματα αυτά μπορούν να φέρουν ιούς και spyware ακριβώς όπως συμβαίνει με τη phishing παραβίαση ασφαλείας.
- **Malware.** Ακριβώς όπως κάθε διαδικτυακή εφαρμογή, η χρήση του softphone στη VoIP τεχνολογία είναι τρωτή σε malware. Δεδομένου ότι οι softphone εφαρμογές τρέχουν σε συστήματα χρηστών όπως αυτά των Η/Υ και των PDAs, εκτίθενται και είναι τρωτές σε κακόβουλες επιθέσεις κώδικα των εφαρμογών φωνής [11].

### **2.2.7 Υποστήριξη υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης**

Στη VoIP τεχνολογία η υπηρεσία έκτακτης ανάγκης (η οποία για την περιοχή των Η.Π.Α. αντιστοιχεί στον αριθμό 911), είναι μια από τις πρωταρχικές απαιτήσεις που οι φορείς παροχής υπηρεσιών πρέπει να εξασφαλίσουν στους συνδρομητές τους. Η υπηρεσία αυτή είναι διαθέσιμη από την PSTN τηλεφωνία αφού ένας σταθερός τηλεφωνικός αριθμός συσχετίζεται με ένα ζευγάρι καλωδίων των οποίων η φυσική διεύθυνση σπάνια αλλάζει. Έτσι λοιπόν γίνεται καταχώρηση του σταθερού τηλεφωνικού αριθμού και της διεύθυνσης των συνδρομητών στην PSAP (Public Safety Answering Point) βάση δεδομένων του PSTN δικτύου. Συνεπώς εάν μια κλήση έκτακτης ανάγκης προέρχεται από έναν τέτοιο αριθμό τηλεφώνου η φυσική του θέση είναι γνωστή. Στην περίπτωση των κινητών τηλεφώνων η μέθοδος αυτή θα απαιτούσε την επανεγγραφή του αριθμού του τηλεφώνου κάθε φορά που αλλάζει γεωγραφική θέση ο συνδρομητής και για αυτό προτάθηκε η ενσωμάτωση chips GPS τεχνολογίας σε αυτά.

Στην περίπτωση των IP δικτύων δεδομένου ότι αυτά υποστηρίζουν την κινητικότητα, η φυσική θέση όπου τερματίζουν τα καλώδια δεν επιτρέπει απαραίτητως τη χαρτογράφηση της IP διεύθυνσης στη θέση εκείνη. Επομένως καθίσταται δύσκολος ο γεωγραφικός προσδιορισμός των χρηστών και συνεπώς οι κλήσεις έκτακτης ανάγκης δεν μπορούν εύκολα να καθοδηγηθούν σε ένα κοντινό PSAP κέντρο κλήσης [1]. Γενικά για τη χρήση της υπηρεσίας έκτακτης ανάγκης πρέπει να δηλωθεί η φυσική διεύθυνση από την οποία γίνεται η χρήση της VoIP υπηρεσίας και κάθε φορά που αλλάζει η τοποθεσία από την οποία χρησιμοποιείται η υπηρεσία αυτή πρέπει να δηλώνεται εκ νέου η διεύθυνση του συνδρομητή.

Οι περισσότεροι εκτός των Wi-Fi συνδρομητών και αυτών που χρησιμοποιούν το softphone VoIP χρηστών, έχουν πρόσβαση είτε στη βασική 911 είτε στην προηγμένη 911 (Enhanced 911 - E911) υπηρεσία έκτακτης ανάγκης. Η E911 είναι μια ακόμη υπηρεσία την οποία μπορεί να παρέχει ένας πάροχος προαιρετικά στους συνδρομητές του κατόπιν μιας πρόσθετης μηνιαίας χρέωσης [1]. Κατά την κλήση της E911 υπηρεσίας ο αριθμός τηλεφώνου και η καταχωρημένη διεύθυνσή του συνδρομητή αποστέλλονται ταυτόχρονα στο τοπικό κέντρο έκτακτης ανάγκης που ορίζεται για εκείνη τη θέση του συνδρομητή, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αποστολή βοήθειας ακόμη και αν αυτός δε μπορεί να μιλήσει ή να τον καλέσουν πίσω εάν αυτό είναι απαραίτητο. Οι συνδρομητές των περιοχών των οποίων το PSAP δεν είναι εξοπλισμένο να λαμβάνει τον αριθμό τηλεφώνου και τη διεύθυνσή

τους χρησιμοποιούν την απλή υπηρεσία έκτακτης ανάγκης (911) και πρέπει ο ίδιος να δώσουν τις πληροφορίες θέσης τους στο PSAP κέντρο. Ωστόσο έως ότου να δοθούν αυτές οι πληροφορίες από το συνδρομητή, η κλήση αυτή ενδέχεται να μην ολοκληρωθεί και η σύνδεση να διακοπεί. Στην περίπτωση αυτή μέσω κάποιων φορέων παροχής VoIP υπηρεσιών υπάρχει η δυνατότητα αναβάθμισης της 911 υπηρεσίας στην E911. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων η 911 κλήση αποστέλλεται στο κέντρο κλήσης έκτακτης ανάγκης του παρόχου όπου ζητούνται τα στοιχεία του συνδρομητή. Άλλα παραδείγματα στα οποία εφαρμόζεται η επικοινωνία με το κέντρο έκτακτης ανάγκης του παρόχου είναι όταν ο συνδρομητής βρίσκεται σε κάποια τοποθεσία η οποία δεν καλύπτεται από το 911 δίκτυο. Επιπλέον στην περίπτωση χρήσης του WiFi δικτύου ή του softphone εξαιτίας της φορητής φύσης αυτών, ανεξαρτήτως από το ποια διεύθυνση καταχωρείται οι 911 κλήσεις μπορούν να καθοδηγούνται στο κέντρο έκτακτης ανάγκης του παρόχου [12].

### **2.3 Video on Demand**

Η Video on Demand ή διαφορετικά η Audio Video on Demand (AVoD), αποτελεί μια υπηρεσία η οποία επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν και να παρακολουθήσουν το οπτικοακουστικό περιεχόμενο που επιθυμούν την επιθυμητή χρονική στιγμή. Το οπτικοακουστικό αυτό περιεχόμενο μπορεί να είναι ένα τηλεοπτικό πρόγραμμα, μια ταινία ή ένα μουσικό βίντεο κλιπ. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη διανομή του περιεχομένου αυτού είναι συνήθως η IPTV. Τα VoD συστήματα διανέμουν το περιεχόμενο σε ένα set-top box για την αναπαραγωγή από έναν τηλεοπτικό δέκτη, σε έναν Η/Υ ή άλλες συσκευές καθώς επίσης επιτρέπουν τη μεταφόρτωση του σε έναν Η/Υ, μια DVR συσκευή ή μια φορητή συσκευή αναπαραγωγής πολυμέσων (digital media player). Η έννοια του VoD δεν είναι νέα. Η πρώτη εμπορική VoD υπηρεσία προωθήθηκε στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του '90 ωστόσο περιορίστηκε από το διαθέσιμο εύρος ζώνης των δικτύων, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων συμφόρησης και το μεγάλο χρόνο μεταφόρτωσης του περιεχομένου [13].

Σήμερα η πλειονότητα των παρόχων προσφέρει τις VoD υπηρεσίες κατόπιν μιας μηνιαίας συνδρομής ή μέσω της ενοικίασης επιπλέον περιεχομένου - συνήθως

ταινιών για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο (pay-per-view). Ωστόσο με τη χρήση του διαδικτύου είναι δυνατή και η δωρεάν αναπαραγωγή VoD περιεχομένου με τη χρήση Η/Υ χωρίς να απαιτείται συνδρομή σε κάποιο φορέα παροχής VoD υπηρεσιών.

Η μεταφόρτωση και η διανομή του VoD περιεχομένου παρέχει στο χρήστη ένα πλήθος VCR (Video Cassette Recording) λειτουργιών όπως οι pause, fast forward, fast rewind, slow forward, slow rewind, κ.λπ. Κάθε τέτοια λειτουργία προσφωνείται και trick mode. Σε ένα disc-based συστήματα διανομής VoD περιεχομένου η εκτέλεση των trick mode λειτουργιών απαιτεί επιπλέον αποθηκευτικό χώρο και υπολογιστική ισχύς στο server, ενώ ένα memory-based σύστημα διανομής μπορεί να παρέχει τις λειτουργίες αυτές απευθείας από τη RAM χωρίς την απαίτηση επιπλέον αποθηκευτικού χώρου ή κύκλων εργασίας του επεξεργαστή [14].

### 2.3.1 Τύποι VoD υπηρεσιών

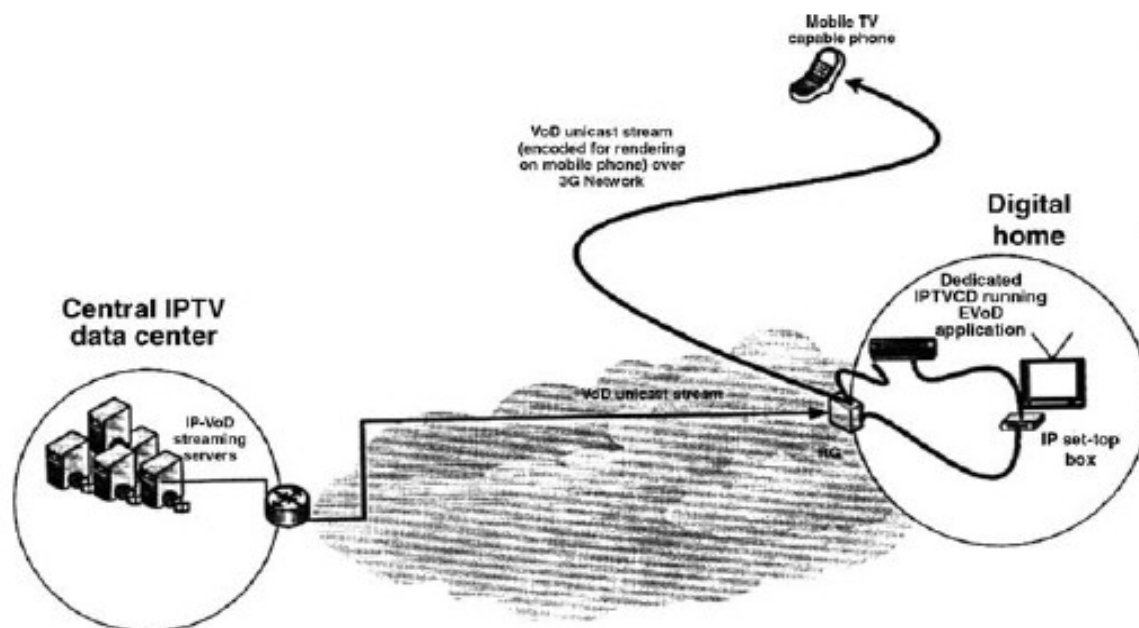
Η VoD τεχνολογία παρέχει στους χρήστες της ένα ευρύ φάσμα τύπων on demand εφαρμογών οι οποίοι είναι:

- **Push VoD.** Ο push VoD τύπος βασίζεται στην αποθήκευση του βίντεο περιεχομένου από ένα VoD server στο σκληρό δίσκο μιας IPTVCD (IPTV Consumer Device) συσκευής. Αυτή η μεταφορά του περιεχομένου πραγματοποιείται εκτός ωρών αιχμής όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή τα σαββατοκύριακα, έτσι ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης που μπορούν να εμφανιστούν όταν ένας χρήστης παρακολουθεί ταυτόχρονα κάποιο VoD περιεχόμενο. Το μέγεθος του VoD περιεχομένου που αποθηκεύεται στο set-top box του χρήστη εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο σχήμα συμπίεσης και το μέγεθος του δίσκου ενώ ο ρυθμός ανανέωσης του καθορίζεται από τις προτιμήσεις του χρήστη τις οποίες ορίζει κατά την εγγραφή του στην υπηρεσία.
- **Movie on Demand (MoD).** Ο MoD είναι ο πιο κοινός τύπος των VoD υπηρεσιών στον οποίο ορίζεται η on demand διανομή βίντεο DVD ποιότητας μέσα από ένα ψηφιακό δίκτυο με την υποστήριξη VCR λειτουργιών ελέγχου του περιεχομένου. Ο κατάλογος των διαθέσιμων

ταινιών καθώς και το χρονικό διάστημα της διαθεσιμότητας τους προσδιορίζεται ανάλογα με τη συνδρομή την οποία καταβάλλει ο χρήστης στο φορέα παροχής υπηρεσιών.

- **Television on Demand (ToD).** Ο ToD τύπος αποτελεί μία νέα μέθοδο παρακολούθησης τηλεόρασης. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται με την καταγραφή και αποθήκευση των real-time τηλεοπτικής μετάδοσης προγραμμάτων στους servers.
- **High Definition VoD (HDVoD).** Όπως υποδηλώνεται και από το όνομα του, αυτός ο τύπος VoD υπηρεσίας επιτρέπει στους συνδρομητές την πρόσβαση σε υψηλής ευκρίνειας περιεχόμενο για τη μετέπειτα προβολή του από τους HD δέκτες.
- **Subscription Music on Demand (SMoD).** Η υπηρεσία αυτή προσφέρεται κατόπιν μιας μηνιαίας συνδρομής στα πλαίσια των προσφερόμενων IPTV υπηρεσιών και έχει ως στόχο τη διαφοροποίηση της από τα διαθέσιμα διαδικτυακά καταστήματα μουσικής.
- **Network-Based Digital Video Recording (NDVR).** Το nDVR είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στους συνδρομητές την καταγραφή του περιεχομένου. Η διαφορά της τεχνολογίας αυτής έγκειται στο ότι η αποθήκευση του περιεχομένου γίνεται στο IPTV data center και όχι σε μια IPTVCD συσκευή, απαλλάσσοντας το χρήστη από την απαίτηση ύπαρξης ενός σκληρού δίσκου στην IPTVCD του. Στην πραγματικότητα η τεχνολογία αυτή συγκεντρώνει τις λειτουργίες ενός DVR και συνεπώς οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις DVR λειτουργίες ελέγχου όπως τη fast forward, τη pause, τη rewind και τη λειτουργία εγγραφής.
- **Free on Demand (FoD).** Στα πλαίσια του ανταγωνισμού μεταξύ των φορέων παροχής VoD υπηρεσιών η FoD υπηρεσία επιτρέπει στους χρήστες της την ελεύθερη πρόσβαση σε μια βιβλιοθήκη περιεχομένου η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ταινίες, μουσικά βίντεο, κ.λπ.
- **Bandwidth on Demand (BoD).** Αυτή η νέα υπηρεσία δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες της την κατά προτίμηση αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου τους για τη μεταφόρτωση συγκεκριμένων εφαρμογών περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας.

- **Internet VoD (IVoD).** Κατόπιν της ευρείας υιοθέτησης του διαδικτύου τα τελευταία χρόνια η IVoD υπηρεσία σε συνεργασία με τους παραγωγούς ταινιών δίνει την ευχέρεια στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε αυτό το περιεχόμενο μέσα από το διαδίκτυο. Το περιεχόμενο παρέχεται στους χρήστες σε μια pay-per-view βάση, το οποίο μπορούν να το παρακολουθήσουν μέσω ενός Η/Υ.
- **Advertising on Demand (AoD).** Η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει την προβολή διαφημίσεων πριν την έναρξη ή κατόπιν της λήξης της προβολής του VoD περιεχομένου.
- **Extended Video on Demand (EVoD).** Σύμφωνα με αυτό τον τύπο διανομής το κατ' απαίτηση περιεχόμενο αποστέλλεται αρχικά σε μία IPTVCD συσκευή η οποία εν συνεχεία εκτρέπει το περιεχόμενο της προς μια άλλη συσκευή η οποία βρίσκεται σε διαφορετική τοποθεσία. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.3 το IP set-top box συνδέεται σε μια ξεχωριστή συσκευή η οποία συνδέεται με το RG ή το ευρυζωνικό δίκτυο του χρήστη. Αυτή η συσκευή κωδικοποιεί το περιεχόμενο που λαμβάνει από το IP set-top box κατάλληλα έτσι ώστε να είναι διαθέσιμο από διάφορες τεχνολογίες πρόσβασης όπως είναι η 3G. Επιπλέον κάποια πιο προηγμένα EVoD συστήματα επιτρέπουν στους εν κινήσει IPTV συνδρομητές να έχουν τον απομακρυσμένο έλεγχο του A/V εξοπλισμού τους όπως είναι τα DVRs.
- **Everything on Demand (XoD).** Αυτός ο τύπος VoD υπηρεσίας επιτρέπει στους συνδρομητές τη χρήση των IPTVCDs για την αγορά του ψηφιακού περιεχομένου και να την παρακολουθήσει του από οπουδήποτε.
- **Near Video on Demand (NVoD) Services.** Με τη χρήση αυτού του τύπου VoD υπηρεσίας ένα συγκεκριμένο βίντεο αναπαράγεται μέσα από ένα διαφορετικό αριθμό καναλιών με μια διαφορά ως προς το χρόνο έναρξης του (π.χ. κάθε 10 λεπτά). Το χαρακτηριστικό αυτό γνώρισμα επιτρέπει στους συνδρομητές τη χρήση των fast forward και rewind λειτουργιών ανά 10 λεπτά σύμφωνα με το παράδειγμα. Δηλαδή ο συνδρομητής είναι σε θέση να εναλλάσσεται μεταξύ των καναλιών και να παρακολουθεί το πρόγραμμα από το σημείο που επιθυμεί. Επιπλέον ο συνδρομητής μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μενού οθόνης ή το EPG (Electronic Program Guide) σύστημα για να επιλέξει την επιθυμητή χρονική στιγμή παρακολούθησης



Σχήμα 2.3 Σύστημα διανομής EVoD [15]

του προγράμματος. Το μειονέκτημα ενός NvoD συστήματος είναι ότι οι χρήστες του πρέπει να περιμένουν αρκετό χρονικό διάστημα προκειμένου να ικανοποιηθεί το fast forward ή rewind αίτημά τους [15].

### 2.3.2 Λογισμικό VoD server

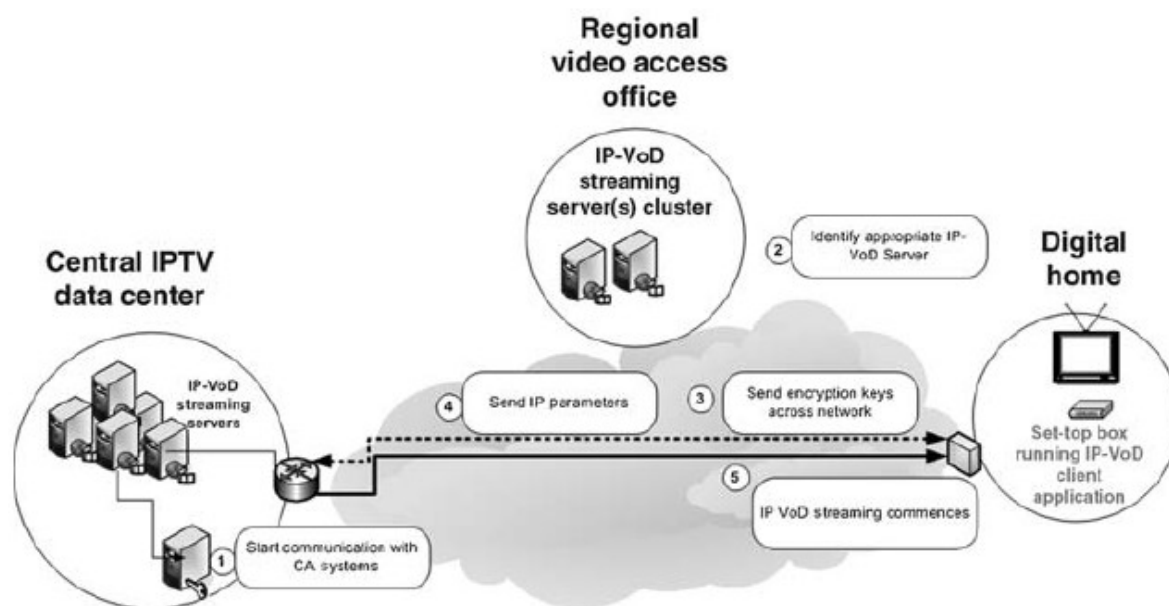
Ένα σύνολο VoD servers χρησιμοποιεί μια εφαρμογή λογισμικού για τη μέτρηση της απόδοσης του VoD συστήματος, τη βελτιστοποίηση των διεργασιών διανομής του VoD περιεχομένου καθώς και την απλοποίηση των καθημερινών λειτουργιών του. Μία τέτοια εφαρμογή λογισμικού εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες:

- **Διαχείριση ψηφιακών ροών.** Η εγκαθίδρυση, ο τερματισμός (teardown) και ο έλεγχος των session διανομής αποτελούν λειτουργίες του λογισμικού ενός VoD server. Το σχήμα 2.4 δείχνει τα βήματα τα οποία συσχετίζονται με την εγκαθίδρυση μιας τέτοιας ροής μεταξύ του IP set-top box του πελάτη και του VoD server. Τα βήματα αυτά είναι τα εξής:

- Έναρξη επικοινωνίας με το σύστημα CA υπό όρους πρόσβασης (Conditional Access). Κατά την παραλαβή ενός αιτήματος από το IP set-top box το λογισμικό του server επικοινωνεί με το CA σύστημα για να προσδιορίσει εάν ο IPTV συνδρομητής έχει την έγκριση (authorization) παρακολούθησης του VoD περιεχομένου.

- *Προσδιορισμός του κατάλληλου VoD server.* Κατόπιν της διαδικασίας της έγκρισης του χρήστη το λογισμικό προσδιορίζει τον κατάλληλο server για την εκπλήρωση του αιτήματός του.
- *Αποστολή κλειδιών κρυπτογράφησης στο δίκτυο.* Εν συνεχεία το λογισμικό αυτό ή το CA σύστημα αποστέλλει ένα κλειδί αποκρυπτογράφησης για την αποκρυπτογράφηση του VoD περιεχομένου.
- *Αποστολή IP παραμέτρων.* Οι παράμετροι αυτοί καθώς και η IP διεύθυνση αποστέλλονται στο IP set-top box.
- *Έναρξη αποστολής VoD ροών.* Κατόπιν της κατανομής εύρους ζώνης ξεκινά η αποστολή των ροών του VoD περιεχομένου. Το IP set-top box χρησιμοποιεί το RTSP (Real - Time Streaming Protocol) πρωτόκολλο για τη διαχείριση της διανομής των ροών αυτών.
  - **Ενημέρωση ψηφιακού περιεχομένου.** Το VoD λογισμικό πρέπει να είναι ικανό να διαχειρίζεται αυτόματα την ανανέωση του προς αποστολή VoD περιεχομένου.
  - **Διαχείριση αντιγραφής.** Στην περίπτωση που ένα νέο VoD περιεχόμενο είναι διαθέσιμο είναι ευθύνη του λογισμικού αυτού η αντιγραφή του για τη διανομή στους υπόλοιπους servers του δικτύου.
  - **Διαχείριση των μεταδεδομένων.** Για την αποθήκευση διάφορων λεπτομερειών που σχετίζονται με το ψηφιακό περιεχόμενο (μεταδεδομένα) χρησιμοποιείται μία βάση δεδομένων. Τα μεταδεδομένα έχουν τη μορφή ενός XML αρχείου και χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση και την περιήγηση στο VoD περιεχόμενο. Το περιεχόμενο των μεταδεδομένων που σχετίζεται με μια ταινία περιλαμβάνει το είδος, την περίληψη, τα ονόματα των παραγωγών και των ηθοποιών, την ημερομηνία προβολής, τις λεπτομέρειες χορήγησης αδείας της ταινίας, κ.λπ.
  - **Διαχείριση της πρόσβασης του ψηφιακού περιεχομένου.** Το λογισμικό του VoD server είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τον πάροχο των υπηρεσιών αυτών, για τη διευθέτηση ζητημάτων σχετικά με την υπό όρους πρόσβαση, τη διαχείριση των ψηφιακών δικαιωμάτων και την κοστολόγηση του προς διανομή VoD περιεχομένου [15].





Σχήμα 2.4 Εγκαθίδρυση VoD ροής [15]

### 2.3.3 VoD πρωτόκολλα διανομής

Οι IP VoD servers χρησιμοποιούν το RTP και το RTCP (Real -Time Control Protocol) πρωτόκολλο για τη διανομή των βίντεο ροών στις IPTVCDs. Εν συνεχεία χρησιμοποιείται το RTSP πρωτόκολλο για τον έλεγχο των ροών αυτών. Επιπλέον γίνεται χρήση του RSVP πρωτοκόλλου για τη διασφάλιση της ποιότητας μετάδοσης. Στις ακόλουθες παραγράφους δίνεται μια συνοπτική επισκόπηση των τριών αυτών πρωτοκόλλων [15].

#### 2.3.3.1 Real-Time Transport Protocol

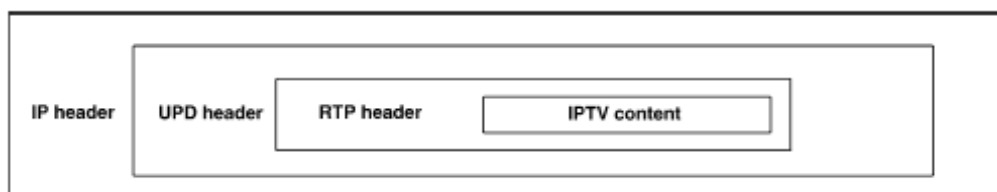
Το RTP είναι ένα πρότυπο του επιπέδου εφαρμογών του TCP/IP μοντέλου το οποίο δημοσιεύθηκε με στόχο τη διανομή σημάτων για ένας εύρος real-time εφαρμογών μονόδρομης ή και αμφίδρομης μετάδοσης [16] (VoIP, εφαρμογών τηλεδιάσκεψης). “Τρέχει” πάνω από τα επίπεδα των UDP και IP πρωτοκόλλων διότι παρέχει τους κατάλληλους QoS μηχανισμούς για τον εντοπισμό προβλημάτων που δεν είναι ανιχνεύσιμα από το UDP [15]. Αν και αρχικά σχεδιάστηκε για τη multicast διανομή real-time δεδομένων, μπορεί ωστόσο να χρησιμοποιηθεί και στη unicast μετάδοση [16].

Το RTP περιγράφει δύο υποπρωτόκολλα, το πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων το οποίο είναι αρμόδιο για το συγχρονισμό, την αναδημιουργία, τον έλεγχο διανομής, την ασφάλεια και την ανίχνευση των απολεσθέντων δεδομένων των real-time εφαρμογών και το RTCP το οποίο ελέγχει την ποιότητα των real-time υπηρεσιών και το συγχρονισμό μεταξύ των ροών [17].

Πιο συγκεκριμένα το RTP διανέμει τα δεδομένα ήχου και εικόνας σε δύο διαφορετικές ροές. Κατά τη λήψη των πακέτων ο χρήστης χρησιμοποιεί την time stamping λειτουργία του RTP για την αναπαραγωγή των δεδομένων στο σωστό ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον με τη χρήση της λειτουργίας αυτής διασφαλίζεται ότι μια IPTVCD μπορεί να συγχρονίσει τη ροή ήχου με τη ροή εικόνας [16], καθώς επίσης προσφέρεται η δυνατότητα διόρθωσης της μεταβολής της καθυστέρησης καθώς και η δυνατότητα ανίχνευσης των δεδομένων τα οποία φθάνουν με λανθασμένη σειρά. Το RTP εξετάζει επίσης το format του ωφέλιμου φορτίου (payload) το οποίο δείχνει το σχήμα κωδικοποίησης των δεδομένων [17]. Στα formats του ωφέλιμου φορτίου μιας ροής ήχου περιλαμβάνονται τα G.711, G.723, G.726, G.729, MP3, DTMF, κ.λπ., ενώ αντίστοιχα στα formats μιας ροής βίντεο περιλαμβάνονται τα H.261, H.263, H.264, MPEG (Moving Picture Experts Group), κ.λπ. [17].

Αν και το TCP πρωτόκολλο τυποποιήθηκε για χρήση από το RTP δε χρησιμοποιείται συχνά εξαιτίας της καθυστέρησης που εισάγει κατά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης και της διόρθωσης των σφαλμάτων. Αντ' αυτού το RTP βασίζεται στο UDP διότι στις real-time εφαρμογές η απώλεια κάποιων πακέτων είναι προτιμότερη από την αναμονή λήψης των καθυστερημένων πακέτων [18].

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η ενθυλάκωση των RTP πακέτων στα IP πακέτα. Ωστόσο το RTP έχει και κάποια μειονεκτήματα. Δε διαθέτει λειτουργίες ελέγχου της ροής και της συμφόρησης (flow and congestion control) για την εγγύηση του χρόνου μετάδοσης. Τις λειτουργίες αυτές αναλαμβάνουν πρωτόκολλα τα οποία



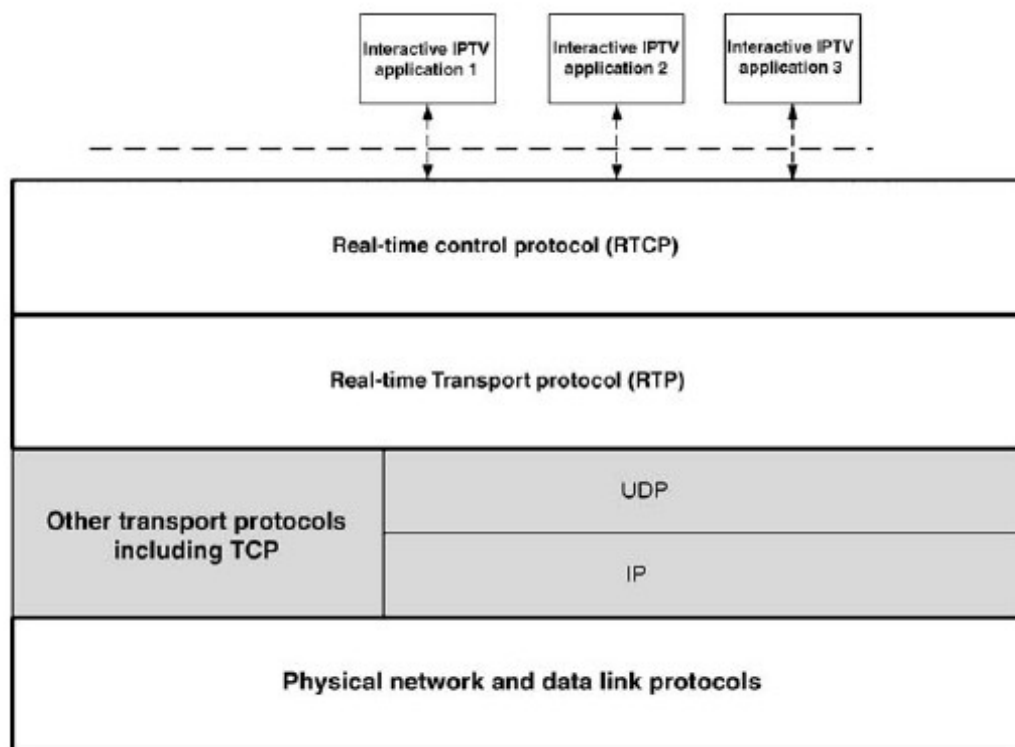
Σχήμα 2.5 Ενθυλάκωση RTP πακέτου [15]

είναι χαμηλότερου επιπέδου. Η μη διανομή των πακέτων και η τυχόν διανομή τους σε λάθος σειρά είναι εκτός των αρμοδιοτήτων του RTP πρωτοκόλλου. Επιπλέον το RTP δεν υποστηρίζει την πολύπλεξη (multiplexing) η οποία όμως υποστηρίζεται από το UDP και IP πρωτόκολλο [15].

Άλλα πρωτόκολλα μεταφοράς τα οποία έχουν σχεδιασθεί συγκεκριμένα για real-time εφαρμογές είναι το Stream Control Transmission Protocol (SCTP) το οποίο εφαρμόζει τη διόρθωση σφαλμάτων [18] και το Datagram Congestion Control Protocol (DCCP) αλλά η χρήση τους δεν είναι ακόμη διαδεδομένη. Στην περίπτωση των VoIP εφαρμογών το RTP ελέγχεται από το H.323 και το SIP πρωτόκολλο [17].

### **2.3.3.2 Real - Time Control Protocol**

Το RTCP συνεργάζεται με το RTP για τη διανομή των δεδομένων αλλά δε μεταφέρει μόνο του οποιαδήποτε δεδομένα. Στόχος του είναι ο έλεγχος της ποιότητας των real - time υπηρεσιών. Η κύρια λειτουργία του είναι να συνεργάζεται με πρωτόκολλα όπως το UDP για την περιοδική αποστολή feedback πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα των διανεμηθέντων δεδομένων καθώς και πληροφοριών ελέγχου της ροής και της συμφόρησης μιας RTP ροής στο IPTV data center. Το RTCP συλλέγει πληροφορίες οι οποίες περιλαμβάνονται στα RTCP πακέτα και σχετίζονται με το πλήθος των απολεσθέντων πακέτων, τη μεταβολή της καθυστέρησης και το χρόνο καθυστέρησης των διανεμηθέντων πακέτων. Κατόπιν μια αλληλεπιδραστική IPTV εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες αυτές για τον έλεγχο των QoS παραμέτρων έτσι ώστε να προβεί στη μείωση του ρυθμού μετάδοσης των frames από τον IPTV server ή την εξέταση της δυνατότητας χρήσης ενός υψηλότερου σχήματος συμπίεσης του προς μετάδοση περιεχομένου. Έτσι σε αντίθεση με το TCP πρωτόκολλο το οποίο κάνει αυτόματα τις ρυθμίσεις αυτές το RTP δίνει τον έλεγχο της επίλυσης του προβλήματος αυτού στην αλληλεπιδραστική IPTV εφαρμογή. Το RTCP δεν παρέχει μεθόδους κρυπτογράφησης ή επικύρωσης των ροών. Τέτοιες υπηρεσίες κρυπτογράφησης για τη μεταφορά του ωφέλιμου φορτίου παρέχονται με τη χρήση του SRTP πρωτοκόλλου [19]. Το ποσοστό του εύρους ζώνης που



Σχήμα 2.6 Στοιβά RTP πρωτοκόλλων [15]

καταλαμβάνει το RTCP συγκριτικά με το RTP είναι αρκετά μικρότερο, της τάξης του 5% [17]. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η RTP στοιβά πρωτοκόλλων.

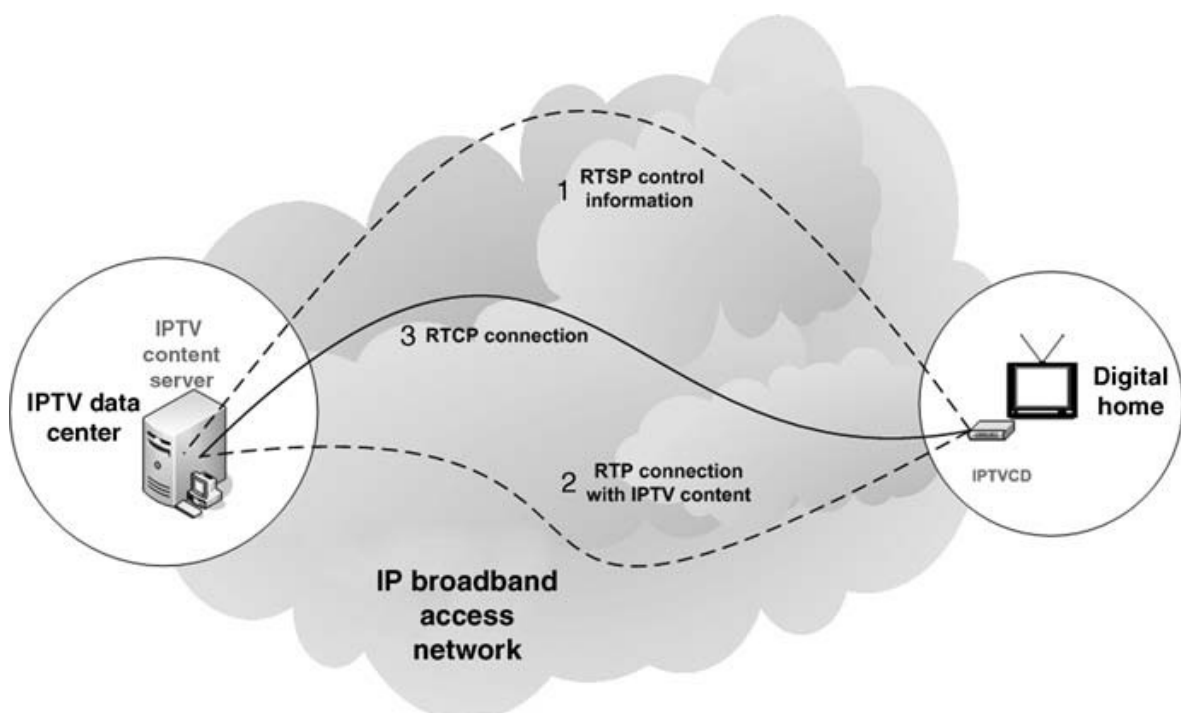
### 2.3.3.3 Real - Time Streaming Protocol

Το RTSP λειτουργεί σε συνδυασμό με το RTP για τη διανομή του IPTV περιεχομένου στο δίκτυο καθώς η μεταφορά αυτού του περιεχομένου δεν είναι αρμοδιότητα του RTSP [16]. Είναι ένα πρωτόκολλο του επιπέδου εφαρμογών του TCP/IP μοντέλου το οποίο επιτρέπει στις IPTVCDs την εγκαθίδρυση και τον έλεγχο των IPTV ροών. Επιτρέπει δηλαδή στις IPTVCDs τη χρήση VCR εντολών (play, pause record, teardown, κ.λπ.).

Το RTSP λειτουργεί με τη χρήση ενός client - server μοντέλου. Το μοντέλο αυτό το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7 χρησιμοποιεί τρεις συνδέσεις για την παροχή επικοινωνίας μεταξύ του RTSP client στην IPTVCD και του VoD server οι οποίες είναι οι εξής:

- Η πρώτη σύνδεση ορίζεται για την μεταφορά των RTSP πληροφοριών ελέγχου.
- Η δεύτερη σύνδεση είναι μια RTP σύνδεση για τη μεταφορά του κωδικοποιημένου IPTV περιεχομένου.
- Η τρίτη σύνδεση φέρει feedback πληροφορίες στο server για την ποιότητα της ροής που διενεμήθη σε μια IPTVCD [15].

Το RTSP υποστηρίζει τόσο τη unicast όσο και τη multicast διανομή για τον έλεγχο των on demand και των real-time ροών. Ωστόσο στη multicast διανομή δεν υποστηρίζονται οι rewind και fast forward λειτουργίες. Το RTSP στοχεύει να παρέχει τις ίδιες υπηρεσίες κατά τη διανομή βίντεο και ήχου με αυτές που προσφέρει το HTTP για τις ροές κειμένων και γραφικών. Ωστόσο σε αντίθεση με το HTTP το οποίο είναι ένα ασύμμετρο πρωτόκολλο στο οποίο ένας client αποστέλλει αιτήματα και ο server αποκρίνεται, στο RTSP είναι δυνατή η αποστολή αιτημάτων και από το server. Επιπλέον ενώ το HTTP χρησιμοποιεί το “http://” αναγνωριστικό, ενώ το RTSP χρησιμοποιεί το “rtsp” για τον εντοπισμό ενός συγκεκριμένου VoD περιεχομένου [16].



Σχήμα 2.7 RTSP μοντέλο επικοινωνίας [15]

#### 2.3.3.4 Resource Reservation Protocol

Το RSVP πρωτόκολλο το οποίο λειτουργεί πάνω από το IP, στο επίπεδο μεταφοράς του TCP/IP μοντέλου, στοχεύει στη διασφάλιση της ποιότητας μετάδοσης. Το RSVP δεν αποτελεί πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων, ωστόσο μοιάζει με το IGMP (Internet Group Membership Protocol) και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χωρίς ωστόσο να αποτελεί πρωτόκολλο δρομολόγησης αλλά ουσιαστικά είναι διαλειτουργικό με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Με το πρωτόκολλο αυτό ο χρήστης μπορεί να απαιτήσει από το δίκτυο την παροχή συγκεκριμένου εύρους ζώνης καθώς και τη μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να ανεχθεί για το περιεχόμενο που πρόκειται να λάβει. Οι real-time εφαρμογές χρησιμοποιούν το RSVP για τη δέσμευση των απαραίτητων πόρων στους δρομολογητές έτσι ώστε το απαιτούμενο εύρος ζώνης να είναι διαθέσιμο όταν ξεκινήσει η μετάδοση [16].

Τα κύρια χαρακτηριστικά του RSVP είναι τα εξής:

- **Υποστήριξη ετερογενών δεσμεύσεων.** Σε μια multicast διανομή κάθε δέκτης μπορεί να ζητήσει διαφορετικό επίπεδο ποιότητα υπηρεσίας.
- **Δυναμική μεταβολή της ποιότητας υπηρεσίας.** Ανά πάσα στιγμή κάθε δέκτης μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας μιας ροής χωρίς να είναι απαραίτητη η προσωρινή κατάργηση και η εκ νέου επανεγκατάστασή της.
- **Δέσμευση πόρων του δικτύου από το δέκτη της ροής και όχι από τον πομπό.** Ο δέκτης μπορεί να ζητήσει τη δέσμευση λιγότερων πόρων από ότι ορίζεται στο προφίλ κίνησης του πομπού.

Ο πομπός στέλνει ένα PATH μήνυμα προκειμένου να ενημερώσει το δέκτη αλλά και τους ενδιάμεσους δρομολογητές για τα χαρακτηριστικά της κίνησης που πρόκειται να εκπέμψει. Ένα συγκεκριμένο PATH μήνυμα μπορεί να αποστέλλεται σε περισσότερους του ενός δεκτών οι οποίοι θα πρέπει ανήκουν στην multicast ομάδα για να το λάβουν [16]. Εν συνεχεία ο δέκτης αποστέλλει ένα RESV μήνυμα για τη δέσμευση των αντιστοίχων πόρων. Το RESV μήνυμα περιέχει το μέγεθος των πόρων που απαιτεί ο δέκτης να δεσμεύσει από το δίκτυο για την ροή πακέτων που περιγράφεται από το PATH μήνυμα που έλαβε. Η επεξεργασία του RESV μηνύματος στους ενδιάμεσους δρομολογητές περιλαμβάνει δύο ελέγχους. Την

εξακρίβωση της ταυτότητας του δέκτη, τον έλεγχο του δικαιώματος του δέκτη δέσμευσης των πόρων από το δίκτυο (policy control) καθώς και την εξακρίβωση της ύπαρξης αρκετών διαθέσιμων εσωτερικών πόρων για την εξυπηρέτηση της συγκεκριμένης δέσμευσης (flow admission control). Εάν ένας από τους δύο ελέγχους αποτύχει τότε αποστέλλεται το κατάλληλο μήνυμα σφάλματος (RESV\_ERR) στο δέκτη που ζήτησε τη συγκεκριμένη δέσμευση πόρων. Σε αντίθετη περίπτωση το RESV μήνυμα αποστέλλεται στον επόμενο δρομολογητή. Κάποιοι δρομολογητές λαμβάνουν περισσότερα του ενός RESV μηνύματα για το ίδιο PATH μήνυμα. Στην περίπτωση αυτή ο δρομολογητής αποστέλλει στον επόμενο δρομολογητή μόνο ένα RESV μήνυμα του οποίου η τιμή για το εύρος ζώνης που πρέπει να δεσμευθεί θα είναι η μεγαλύτερη των υπολοίπων RESV μηνυμάτων που έλαβε ο συγκεκριμένος δρομολογητής.

## 2.4 Επίλογος

Η VoIP τεχνολογία χρησιμοποιεί το IP πρωτόκολλο για τη διανομή πακέτων φωνής μέσω των IP δικτύων. Για τη σύνδεση του συνδρομητή με τους φορείς παροχής των VoIP υπηρεσιών είναι απαραίτητη η χρήση μιας ATA συσκευής για τη σύνδεση ενός αναλογικού τηλεφώνου σε ένα IP δίκτυο, η χρήση ενός VoIP τηλεφώνου για τη διεξαγωγή VoIP κλήσεων χωρίς τη χρήση κάποιου Η/Υ ή απλά η χρήση ενός λογισμικού που εγκαθίσταται στον Η/Υ. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της είναι η φορητότητα και το χαμηλό κόστος ωστόσο η αξιοπιστία της επηρεάζεται από την ποιότητα της ευρυζωνικής σύνδεσης και από τους περιορισμούς που τίθενται από τους Η/Υ. Επιπλέον η υπηρεσία αυτή δεν καθίσταται διαθέσιμη στην περίπτωση διακοπής της ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εγκαθίδρυση μιας διαδρομής και τη μετάδοση της φωνής μέσα από ένα IP δίκτυο η VoIP τεχνολογία χρησιμοποιεί τα H.323 και SIP πρωτόκολλα σηματοδότησης. Οι τεχνικές μέτρησης της ποιότητας του ήχου μιας VoIP κλήσης είναι η MOS και η PSQM. Καθώς η κρυπτογράφηση δεν είναι πολύ συνήθης από το SIP πρωτόκολλο το οποίο ελέγχει την επικύρωση των VoIP κλήσεων, οι χρήστες εκτίθενται σε διάφορες παραβιάσεις ασφαλείας. Για τη χρήση της υπηρεσίας έκτακτης ανάγκης (911) από τους VoIP χρήστες, είναι απαραίτητο κάθε φορά που αλλάζει η τοποθεσία από την οποία χρησιμοποιείται η υπηρεσία αυτή να

δηλώνεται εκ νέου η φυσική διεύθυνση τους, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην περίπτωση των PSTN δικτύων.

Η Video on Demand υπηρεσία οποία επιτρέπει στους χρήστες να επιλέξουν και να παρακολουθήσουν το οπτικοακουστικό περιεχόμενο που επιθυμούν την επιθυμητή χρονική στιγμή. Τα VoD συστήματα συνήθως διανέμουν το περιεχόμενο σε ένα set-top box, για την αναπαραγωγή του από έναν τηλεοπτικό δέκτη ενώ ο χρήστης διαθέτει τη δυνατότητα χρήσης ενός πλήθους VCR λειτουργιών όπως η pause, η fast forward και η fast rewind. Η VoD τεχνολογία παρέχει ένα ευρύ φάσμα on demand εφαρμογών όπως είναι η αποθήκευση, η καταγραφή και η αγορά του ψηφιακού περιεχομένου από ένα VoD server στο σκληρό δίσκο του εξοπλισμού του συνδρομητή. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα της κατά προτίμησης αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου του για τη μεταφόρτωση εφαρμογών περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας καθώς και την πρόσβαση στο on demand περιεχόμενο μέσα από το διαδίκτυο. Οι VoD servers χρησιμοποιούν μια εφαρμογή λογισμικού για την εγκαθίδρυση, τον τερματισμό, τη βελτιστοποίηση των διεργασιών διανομής του VoD περιεχομένου, τον προσδιορισμό του κατάλληλου VoD server, τη μέτρηση της απόδοσης του VoD συστήματος, τη διαχείριση της αντιγραφής και την ενημέρωση του ψηφιακού περιεχομένου. Επιπλέον οι VoD servers χρησιμοποιούν διάφορα πρωτόκολλα όπως το Real-time Transport Protocol και το Real-Time Control Protocol για τη διανομή των ροών βίντεο στις IPTVCDs, το RTSP πρωτόκολλο για τον έλεγχο των ροών αυτών καθώς και το Resource Reservation Protocol για τη διασφάλιση της ποιότητας μετάδοσης.



## 2.5 Βιβλιογραφία

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Voice\\_over\\_Internet\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Voice_over_Internet_Protocol) (Τελευταία πρόσβαση 14/04/2010)
- [2] [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wimax\\_VoIP/index.html](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wimax_VoIP/index.html) (Τελ. πρόσβ. 14/04/2010)
- [3] <http://www.fcc.gov/VoIP/> (Τελευταία πρόσβαση 21/04/2010)
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/H.323> (Τελευταία πρόσβαση 14/04/2010)
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Session\\_Initiation\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Session_Initiation_Protocol) (Τελευταία πρόσβαση 18/04/2010)
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Softswitch> (Τελευταία πρόσβαση 16/04/2010)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Media\\_Gateway](http://en.wikipedia.org/wiki/Media_Gateway) (Τελευταία πρόσβαση 16/04/2010)
- [8] <http://www.VoIPplanet.com/backgrounders/article.php/3555296> (Τελ. πρόσβ. 16/04/2010)
- [9] <http://www.VoIP-info.org/wiki/view/QoS> (Τελευταία πρόσβαση 14/04/2010)
- [10] [http://el.wikipedia.org/wiki/Man-in-the-middle\\_attack](http://el.wikipedia.org/wiki/Man-in-the-middle_attack) (Τελευταία πρόσβαση 14/04/2010)
- [11] <http://VoIP.about.com/od/security/a/SecuThreats.html> (Τελευταία πρόσβαση 14/04/2010)
- [12] <http://www.vonage.com/9111/> (Τελευταία πρόσβαση 21/04/2010)
- [13] [http://searchtelecom.techtarget.com/sDefinition/0,,sid103\\_gci1264507,00.html](http://searchtelecom.techtarget.com/sDefinition/0,,sid103_gci1264507,00.html) (Τελευταία πρόσβαση 29/04/2010)
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Video\\_on\\_demand](http://en.wikipedia.org/wiki/Video_on_demand) (Τελευταία πρόσβαση 29/04/2010)
- [15] O'Driscoll G. (2008), Next Generation IPTV Services and Technologies, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [16] [http://www.cse.wustl.edu/~jain/cis788-97/ftp/ip\\_multimedia/index.htm#rtp](http://www.cse.wustl.edu/~jain/cis788-97/ftp/ip_multimedia/index.htm#rtp) (Τελευταία πρόσβαση 25/04/2010)
- [17] [http://en.wikipedia.org/wiki/Real-time\\_Transport\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_Transport_Protocol) (Τελευταία πρόσβαση 25/04/2010)
- [18] [http://en.wikipedia.org/wiki/User\\_Datagram\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/User_Datagram_Protocol) (Τελευταία πρόσβαση 25/04/2010)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/RTP\\_Control\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/RTP_Control_Protocol) (Τελευταία πρόσβαση 25/04/2010)



---

# Κεφάλαιο 3

## Internet Protocol Television

---



### 3.1 Εισαγωγή

Το ακρώνυμο IPTV, γνωστό και ως TELCO (Telephone Company) TV, ή ευρυζωνική τηλεόραση, περιγράφει την ασφαλή μετάδοση τηλεοπτικού σήματος υψηλής ποιότητας και ήχου διαμέσου ενός ιδιωτικού ευρυζωνικού δικτύου. Ο επίσημος ορισμός που αποδίδεται από την ITU FG IPTV (International Telecommunication Union Focus Group on IPTV), χαρακτηρίζει την IPTV τεχνολογία ως τη διανομή ενός συνόλου πολυμεσικών υπηρεσιών όπως αυτών της τηλεόρασης, του βίντεο, του ήχου, του κείμενου και των γραφικών που μεταδίδονται μέσω IP δικτύων, για την παροχή του απαιτούμενου επιπέδου ποιότητας υπηρεσίας, ποιότητας εμπειρίας (Quality of Experience - QoE), ασφάλειας, αλληλεπίδρασης και αξιοπιστίας.

Από την προοπτική του χρήστη η IPTV τεχνολογία μοιάζει να λειτουργεί ακριβώς όπως η υπηρεσία της συνδρομητικής τηλεόρασης, ενώ από την προοπτική ενός φορέα παροχής υπηρεσιών περιλαμβάνει τη λήψη, την επεξεργασία, και την ασφαλή διανομή περιεχομένου βίντεο διαμέσου ενός IP δικτύου.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της IPTV τεχνολογίας διακρίνονται στα εξής:

- **Υποστήριξη αλληλεπιδραστικής τηλεόρασης.** Οι διπλής κατεύθυνσης ικανότητες των IPTV συστημάτων επιτρέπουν στους φορείς παροχής υπηρεσιών τη μετάδοση ενός συνόλου αλληλεπιδραστικών εφαρμογών τηλεόρασης, όπως τη μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων (standard live TV) και προγραμμάτων υψηλής ευκρίνειας, εφαρμογές αλληλεπιδραστικών παιχνιδιών και την υψηλής ταχύτητας περιήγηση στο διαδίκτυο.
- **Time shifting.** Η IPTV τεχνολογία σε συνδυασμό με τη χρήση ενός ψηφιακού καταγραφέα βίντεο, επιτρέπει τη χρονική μετατόπιση του περιεχομένου ενός προγράμματος. Παρέχει δηλαδή ένα μηχανισμό καταγραφής και αποθήκευσης του IPTV περιεχομένου για τη προβολή του στην επιθυμητή χρονική στιγμή.
- **Προσωποποίηση συνηθειών του χρήστη.** Ένα IPTV σύστημα το οποίο υποστηρίζει την αμφίδρομη επικοινωνία επιτρέπει στους χρήστες του την προσωποποίηση των συνηθειών τους παρέχοντάς τους τη δυνατότητα να αποφασίζουν τι θέλουν να παρακολουθήσουν και πότε.

- **Χαμηλή απαίτηση εύρους ζώνης.** Σε αντίθεση με τη μετάδοση κάθε επιμέρους καναλιού στο χρήστη όπως συνέβαινε μέχρι τώρα από τα παραδοσιακά συστήματα τηλεόρασης, η IPTV τεχνολογία επιτρέπει στους φορείς παροχής υπηρεσιών τη μετάδοση μόνο των καναλιών τα οποία ο χρήστης επιθυμεί. Αυτό το ελκυστικό γνώρισμα επιτρέπει στους χειριστές δικτύων την εξοικονόμηση εύρους ζώνης των δικτύων τους.
- **Προσβασιμότητα από πλήθος διαφορετικών συσκευών.** Γενικά η μετάδοση του τηλεοπτικού περιεχομένου μέσω της τεχνολογίας αυτής δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση των τηλεοράσεων. Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτό και μέσω των Η/Υ τους, των κινητών τηλεφώνων ή άλλων φορητών συσκευών [1].

### 3.2 Διαφορές μεταξύ IPTV και Internet TV

Είναι σύνηθες να επικρατεί μία σύγχυση μεταξύ της IPTV μετάδοσης και της Internet TV μετάδοσης. Αν και τα δύο αυτά περιβάλλοντα βασίζονται στον ίδιο τεχνολογικό πυρήνα διαφέρουν στους εξής τομείς:

- **Διαφορετικές πλατφόρμες μετάδοσης υπηρεσιών.** Ενώ στην περίπτωση της τηλεόρασης μέσω Internet χρησιμοποιείται το διαδίκτυο για τη μετάδοση περιεχομένου στους χρήστες, η IPTV χρησιμοποιεί ασφαλή ιδιωτικά δίκτυα με τη λειτουργία τους να ρυθμίζεται από τον πάροχο των IPTV υπηρεσιών.
- **Γεωγραφική κάλυψη.** Τα δίκτυα που ελέγχονται από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς δεν είναι προσπελάσιμα από τους χρήστες του διαδικτύου και καλύπτουν κάποιες συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, εν αντιθέσει οι χρήστες του διαδικτύου δε συναντούν γεωγραφικούς περιορισμούς και μπορούν να έχουν πρόσβαση στις υπηρεσίες τηλεόρασης από κάθε σημείο του πλανήτη.
- **Ποιότητα μετάδοσης.** Όταν ένα τηλεοπτικό πρόγραμμα ή ένα βίντεο αποστέλλεται μέσω του διαδικτύου, κάποια από τα πακέτα ενδέχεται να καθυστερήσουν ή να χαθούν κατά τη μεταφορά τους σε κάποιο από τα δίκτυα από τα οποία απαρτίζεται το διαδίκτυο. Κατά συνέπεια οι προμηθευτές αυτών δεν μπορούν να εγγυηθούν την αντίστοιχη ποιότητα

μετάδοσης με αυτήν της επίγειας καλωδιακής ή της δορυφορικής τηλεόρασης.

- **Μηχανισμός προσπέλασης.** Για την προσπέλαση και την αποκωδικοποίηση του περιεχομένου που μεταδίδεται μέσω ενός IPTV συστήματος απαιτείται πάντοτε ένας ψηφιακός μετασχηματιστής, όπως ακριβώς απαιτείται σχεδόν πάντα ένας υπολογιστής για την προσπέλαση των υπηρεσιών της διαδικτυακής τηλεόρασης.
- **Κόστος.** Ενώ οι χρήστες της IPTV τεχνολογίας καλούνται να πληρώσουν κάποια συνδρομή, ένα μεγάλο μέρος του τηλεοπτικού περιεχομένου που διανέμεται μέσω του δημόσιου διαδικτύου διατίθεται στους χρήστες δωρεάν. Ωστόσο αυτό με την πάροδο του χρόνου αλλάζει καθώς ολοένα και αυξανόμενος είναι ο αριθμός των επιχειρήσεων που εισάγουν κάποια συνδρομή στις υπηρεσίες της Internet TV. Η κοστολόγηση των IPTV υπηρεσιών είναι όμοια με αυτή της μηνιαίας συνδρομής που εφαρμόζεται από τους προμηθευτές της συνδρομητικής τηλεόρασης. Ωστόσο αναλυτές επισημαίνουν ότι στο μέλλον θα υπάρξει σύγκλιση των εννοιών της IPTV και της Internet TV.
- **Μεθοδολογίες παραγωγής περιεχομένου.** Ένα μεγάλο μέρος του περιεχομένου που μεταδίδεται μέσω της Internet TV παράγεται από τους ίδιους τους χρήστες (User Generated Content - UGC), ενώ οι πάροχοι της IPTV τεχνολογίας περιορίζονται γενικότερα στη διανομή τηλεοπτικών προγραμμάτων και ταινιών οι οποίες παρέχονται από εταιρείες μέσω μαζικής ενημέρωσης [1].

### 3.3 Δομή ενός δικτύου IPTV

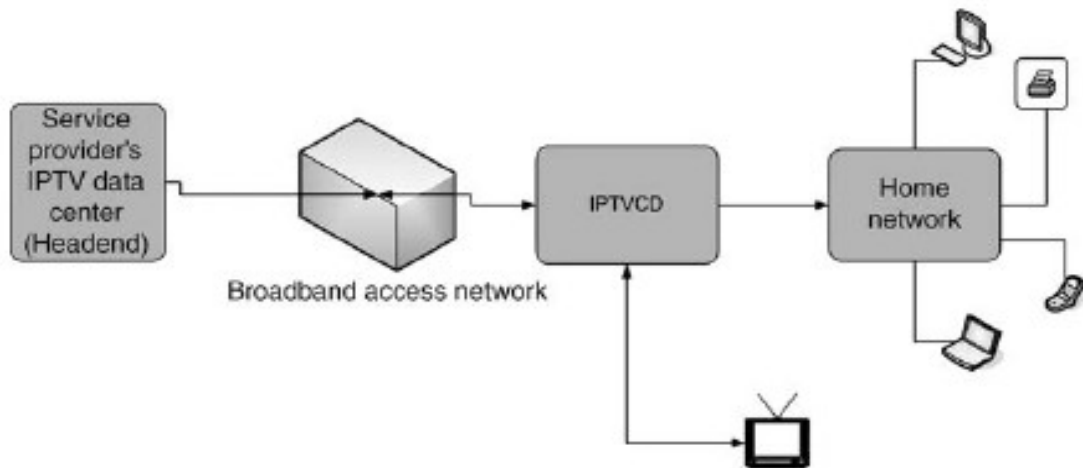
Οι οντότητες οι οποίες συνθέτουν ένα IPTV δίκτυο όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.1 είναι οι ακόλουθες:

- **IPTV Data Center.** Το κέντρο δεδομένων ενός IPTV συστήματος το οποίο είναι γνωστό επίσης και ως “άνω άκρο” (headend), λαμβάνει τα προς μετάδοση δεδομένα από ένα πλήθος πηγών όπως αυτές των παραγωγών περιεχομένου, των καλωδιακών και των δορυφορικών καναλιών. Κατόπιν της ολοκλήρωσης της λήψης του περιεχομένου ένα σύνολο συσκευών

όπως κωδικοποιητές, βίντεο servers, IP δρομολογητές καθώς και υλικό ασφαλείας χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία του προς μετάδοση τηλεοπτικού περιεχομένου μέσω του IP δικτύου. Η φυσική θέση του IPTV data center υπαγορεύεται από την υποδομή του δικτύου που χρησιμοποιείται από τον εκάστοτε φορέα παροχής υπηρεσιών. Επιπλέον απαιτείται ένα σύστημα διαχείρισης συνδρομητών για τη διαχείριση του προφίλ και του λογαριασμού συνδρομητών τους.

- **Broadband Delivery Network.** Η παροχή IPTV υπηρεσιών απαιτεί μια point-to-point σύνδεση για κάθε συνδρομητή με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις εύρους ζώνης του δικτύου να αυξάνονται σημαντικά. Η τεχνολογική πρόοδος των δικτύων τα τελευταία χρόνια επιτρέπει στους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους τη χρήση μεγάλων ευρυζωνικών δικτύων μετάδοσης για την κατάλληλη διανομή του IPTV περιεχομένου, όπως είναι αυτά των ομοαξονικών καλωδίων και των οπτικών ινών.
- **IPTV Consumer Devices.** Ο εξοπλισμός των IPTV συνδρομητών συνδέεται με το ευρυζωνικό δίκτυο επιτρέποντας έτσι την πρόσβαση τους στις IPTV υπηρεσίες. Παράδειγμα τέτοιων συσκευών αποτελούν τα IP set-top boxes και οι κονσόλες παιχνιδιών. Οι συσκευές αυτές είναι υπεύθυνες για την αποκωδικοποίηση και την επεξεργασία των εισερχόμενων ροών. Επίσης υποστηρίζουν προηγμένες τεχνολογίες που ελαχιστοποιούν ή εξαλείφουν πλήρως την επίδραση των προβλημάτων των δικτύων κατά την επεξεργασία του IPTV περιεχομένου. Με τη βελτίωση των ευρυζωνικών δικτύων απαιτείται και η αντίστοιχη βελτίωση των IPTVCDs.
- **Home Network.** Ένα οικιακό δίκτυο συνδέει τις διάφορες ψηφιακές συσκευές στα πλαίσια μιας μικρής γεωγραφικής περιοχής, παρέχοντας προσπέλαση σε πληροφορίες φωνής, ήχου και δεδομένων μέσα από ένα πλήθος διαφορετικών ψηφιακών συσκευών. Στόχος του είναι η βελτίωση της επικοινωνίας και η εξοικονόμηση χρημάτων μέσω του διαμοιρασμού των ψηφιακών πόρων [1].





Σχήμα 3.1 Απλοποιημένο διάγραμμα ενός IPTV συστήματος [1]

### 3.4 Βασικές υπηρεσίες IPTV

Οι δύο βασικοί τύποι εφαρμογών που παρέχονται από την IPTV τεχνολογία είναι αυτές της εκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης και της κατ' απαίτηση μετάδοση περιεχομένου (Content on Demand - CoD).

#### 3.4.1 Εκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης

Το 1941 η εθνική επιτροπή τηλεοπτικών συστημάτων (National Television System Committee - NTSC) των ΗΠΑ ανέπτυξε ένα σύνολο οδηγιών (πρότυπα εκπομπής) το οποίο υιοθετήθηκε από την ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC) και κατά αυτόν τον τρόπο ξεκίνησε η εκπομπή της τηλεόρασης. Το πρώτο NTSC πρότυπο το οποίο προοριζόταν για την ασπρόμαυρη μετάδοση αναπτύχθηκε το 1941 ενώ το 1953 μια δεύτερη τροποποιημένη έκδοση αυτού επέτρεπε την έγχρωμη εκπομπή μέσω των ίδιων ασπρόμαυρων δεκτών. Το NTSC αποτέλεσε το πρώτο ευρέως χρησιμοποιούμενο έγχρωμο σύστημα αναλογικής τηλεοπτικής μετάδοσης στις περισσότερες των περιοχών της Αμερικής, την Ιαπωνία, τη Νότια Κορέα και την Ταϊβάν. Η Ιαπωνία υιοθέτησε τα NTSC πρότυπα τη δεκαετία του '60 ενώ στο τέλος αυτής η Ευρώπη εισήγαγε δύο νέα πρότυπα αναλογικής τηλεοπτικής μετάδοσης, το SECAM (Systeme Electronique Couleur Avec Memoire) για τις περιοχές της Γαλλίας, της Ανατολικής Ευρώπης αλλά και της Μέσης Ανατολής καθώς και το PAL (Phase Alternating Line) το οποίο αποτελεί το κυρίαρχο πρότυπο μετάδοσης στην

Ευρώπη. Μετά από μια περίοδο χρήσης μεγαλύτερη των πενήντα ετών η πλειοψηφία των NTSC αναλογικών συστημάτων αντικαταστάθηκε από το ATSC (Advanced Television Systems Committee) σύστημα ψηφιακής μετάδοσης. Ο πρώτος τηλεοπτικός δέκτης με ενσωματωμένη τεχνολογία επεξεργασίας ψηφιακού σήματος ήταν διαθέσιμος στην αγορά το 1983 ενώ η αρχή για τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση έγινε με την υπογραφή ενός νόμου το 1996 (Telecommunications Act of 1996) [2]. Το ίδιο έτος η FCC όρισε το ATSC πρότυπο για την ψηφιακή τηλεοπτική μετάδοση.

#### 3.4.1.1 Οργανισμοί τυποποίησης ψηφιακής τηλεόρασης

Μερικοί από τους πιο γνωστούς διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης της ψηφιακής τηλεόρασης είναι οι:

- **ATSC.** Η προηγμένη επιτροπή τηλεοπτικών συστημάτων συστάθηκε το 1982 από τις οργανώσεις των μελών της JCIC (Joint Committee on Intersociety Coordination) όπως είναι το IEEE, για την καθιέρωση ενός συνόλου τεχνικών προτύπων αναμετάδοσης ψηφιακών τηλεοπτικών σημάτων. Σήμερα η ATSC αριθμεί 163 μέλη [3] τα οποία σχετίζονται με τον τομέα της εκπομπής, τον εξοπλισμό, τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα μέσα μετάδοσης όπως καλώδια και δορυφόροι. Η ψηφιακή τηλεόραση περιλαμβάνει 18 formats που έχουν γίνει αποδεκτά από την ATSC. Σε αυτά περιλαμβάνονται η SD και η HD τεχνικές εκπομπής. Ένα ATSC σύστημα μπορεί να υποστηρίξει τόσο τον ψηφιακό όσο και τον αναλογικό τρόπο μετάδοσης. Η επίσημη εφαρμογή της ψηφιακής τηλεόρασης στις ΗΠΑ έγινε στις 12 Ιουνίου 2009. Στον Καναδά το NTSC προβλέπεται να αντικατασταθεί μέχρι τις 31 Αυγούστου 2011 και μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2015 στο Μεξικό [4]. Επιπλέον η Νότια Κορέα, η Ταϊβάν και η Αργεντινή έχουν συμφωνήσει στη χρήση αυτών των προτύπων.
- **DVB (Digital Video Broadcasting).** Ο DVB οργανισμός εγκαινιάστηκε το 1993 και σήμερα αποτελεί μια κοινοπραξία τριακοσίων περίπου επιχειρήσεων στους τομείς της εκπομπής, της κατασκευής, της λειτουργίας δικτύων, και της καθιέρωσης κοινών διεθνών προτύπων για τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Το αποτέλεσμα της εργασίας

των μελών του είναι ένα σύνολο προδιαγραφών τα οποία καλύπτουν όλες τις πτυχές της ψηφιακής τηλεόρασης όπως τη μετάδοση μέσω διεπαφών, την ασφάλεια και την αλληλεπίδραση για το ψηφιακό βίντεο, τον ήχο, και τα δεδομένα. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις εκπομπής τηλεόρασης (καλωδιακή, επίγεια, δορυφορική) κάνουν χρήση διαφορετικών DVB προτύπων. Η διαφορά αυτών των προτύπων έγκειται στα διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης και στους διαφορετικούς κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων που χρησιμοποιούν. Τα DVB πρότυπα είναι ανοικτά και έτσι όλοι οι κατασκευαστές μπορούν να εγγυηθούν ότι ο ψηφιακός εξοπλισμός τους θα είναι διαλειτουργικός με τον εξοπλισμό άλλων κατασκευαστών. Τα πρότυπα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στην Ευρώπη ενώ κατά τη διάρκεια του 2008 ο DVB οργανισμός έχει μελετήσει τις πτυχές της παροχής τρισδιάστατης ψηφιακής τηλεόρασης. Μια τεχνική έκθεση αυτής της μελέτης που έχει οριστικοποιηθεί πρόσφατα οδήγησε στην επίσημη δημιουργία της TM-3DTV ομάδας [5].

- **ARIB (Association of Radio Industries and Businesses).** Ο ARIB είναι ένας οργανισμός τυποποίησης της Ιαπωνίας [6] ο οποίος πραγματοποιεί μελέτες και έρευνες, συνεργάζεται με άλλους διεθνείς οργανισμούς και ορίζει έναν αριθμό προτύπων που σχετίζονται με την κωδικοποίηση βίντεο, ήχου και την πολύπλεξη στο τομέα εκπομπής της ψηφιακής τηλεόρασης. Επίσης παρέχει υπηρεσίες για την αποδοτική χρήση του φάσματος και υπηρεσίες υποστήριξης αλλαγής των συχνοτήτων για την ομαλή εισαγωγή στην εκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης [1].

#### 3.4.1.2 Πλεονεκτήματα ψηφιακής μετάδοσης

Οι χρήστες της ψηφιακής τηλεόρασης απολαμβάνουν μια σειρά πλεονεκτημάτων έναντι αυτών της αναλογικής τα οποία είναι:

- **Βελτιωμένη εμπειρία τηλεθέασης.** Η τηλεθέαση βελτιώνεται μέσω εικόνων κινηματογραφικής ποιότητας και ήχου ποιότητας αντίστοιχης ενός CD. Ακόμη παρέχονται εκατοντάδες νέων καναλιών και η δυνατότητα αλλαγής της γωνίας θέασης-λήψης της κάμερας χωρίς την παρουσία των “ρωγμών” της εικόνας όπου συναντάται στα αναλογικά συστήματα τηλεόρασης.

- **Βελτιωμένη κάλυψη.** Τόσο τα αναλογικά όσο και τα ψηφιακά σήματα εξασθενούν με την αύξηση της απόστασης. Ωστόσο ενώ η εικόνα σε ένα αναλογικό σύστημα τηλεόρασης υποβαθμίζεται σταδιακά με την αύξηση της απόστασης από το σημείο εκπομπής, η ποιότητα εικόνας της ψηφιακής τηλεόρασης παραμένει σταθερή έως ότου η λήψη του ψηφιακού σήματος καθίσταται αδύνατη.
- **Αυξημένη χωρητικότητα και παροχή νέων υπηρεσιών.** Μέσω της ψηφιακής τεχνολογίας οι φορείς παροχής υπηρεσιών έχουν τη δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων πληροφοριών μέσω της συμπίεσης του περιεχομένου. Με τη συμπίεση τα δεδομένα καταλαμβάνουν μικρότερο εύρος ζώνης και το εναπομείναν εύρος ζώνης μπορεί να αξιοποιηθεί για VoD υπηρεσίες, για υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, διαδικτύου, αλληλεπιδραστικής εκπαίδευσης καθώς και για την παροχή αλληλεπιδραστικών εμπορικών υπηρεσιών. Επιπλέον ένα μεγάλο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης απελευθερώνεται εξαιτίας του ότι διαβιβάζονται μόνο τα τηλεοπτικά κανάλια που ο συνδρομητής απαιτεί στο set-top box συγκριτικά με τα αναλογικά συστήματα τηλεόρασης όπου όλα τα κανάλια μεταδίδονται στους συνδρομητές με το εύρος ζώνης να καταλαμβάνεται απ' τα κανάλια τα οποία δεν παρακολουθεί ο συνδρομητής.
- **Αυξημένη ευελιξία πρόσβασης.** Σε σύγκριση με τα αναλογικά συστήματα όπου η εκπομπή είναι δυνατή μόνο μέσω του παραδοσιακού τηλεοπτικού δέκτη, σήμερα η πρόσβαση αυτή διευρύνεται μέσα από ένα πλήθος νέων συσκευών όπως αυτές των κινητών τηλεφώνων και των ηλεκτρονικών υπολογιστών [1].
- **Άλλα πλεονεκτήματα.** Γίνεται να έλεγχος και μέτρηση επακριβώς του τι παρακολουθούν οι συνδρομητές. Αυτό είναι σημαντικό για τους διαχειριστές οι οποίοι θέλουν κερδίσουν έσοδα μέσω της διαφήμισης.

### 3.4.2 Video on Demand (VoD)

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεόρασης όπου το τηλεοπτικό περιεχόμενο μεταδίδεται βάση ενός προκαθορισμένου χρονικά προγράμματος, η

VoD υπηρεσία παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα να επιλέξουν, να μεταφορτώσουν και έπειτα να παρακολουθήσουν το πρόγραμμα που τους ενδιαφέρει μέσα από μία βιβλιοθήκη αποθηκευμένων τίτλων περιεχομένου.

### **3.5 Παράγοντες ανάπτυξης IPTV**

Πολλοί είναι οι παράγοντες που συμβάλουν έτσι ώστε η IPTV τεχνολογία να αποτελεί μια δυνατή πραγματικότητα. Στον τεχνολογικό τομέα η στροφή από τον αναλογικό στον ψηφιακό τρόπο μετάδοσης από τους φορείς παροχής υπηρεσιών, η χρήση ψηφιακών τεχνολογιών για την καταγραφή και την αποθήκευση του περιεχομένου η χρήση αποτελεσματικότερων τεχνολογιών συμπίεσης και η διαθεσιμότητα μεγαλύτερου εύρους ζώνης ικανοποιούν την ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση των χρηστών για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας. Στον εμπορικό τομέα ο ανταγωνισμός μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών οδήγησε στην παροχή καλύτερων IPTV υπηρεσιών στους συνδρομητές τους. Προς αυτή την κατεύθυνση βοήθησε η αύξηση του αριθμού των συνδρομητών των ευρυζωνικών συνδέσεων καθώς και το γεγονός ότι εκτός των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών η χρήση της IPTV τεχνολογίας είναι επιτρεπτή και διαμέσου εταιρειών δορυφορικής τεχνολογίας. Η μείωση του κόστους των Η/Υ, οι κονσόλες παιχνιδιών και οι τηλεοπτικοί δέκτες νέας τεχνολογίας μπορούν να κάνουν χρήση μιας κοινής ολοκληρωμένης υπηρεσίας μέσων ενημέρωσης και ψυχαγωγίας όπως είναι η IPTV [1].

### **3.6 Οργανισμοί τυποποίησης IPTV**

Όπως ισχύει στους τομείς της καλωδιακής και της συνδρομητικής τηλεόρασης, έτσι και στον τομέα της IPTV απαιτείται ο ορισμός ενός συνόλου προτύπων που θα προάγουν τον ανταγωνισμό, τη μείωση των δαπανών που υφίστανται οι συνδρομητές, τη μείωση της σύγχυσης που επικρατεί στην αγορά και γενικότερα τη βελτίωση των προς μετάδοση IPTV υπηρεσιών. Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός οργανισμών πιστοποίησης και βιομηχανιών κοινοπραξίας οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- **DSL Forum.** Το DSL Forum είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός ο οποίος περιλαμβάνει οδηγίες για την ανάπτυξη και την επέκταση των DSL δικτύων. Επίσης έχει ορίσει έναν αριθμό συστάσεων οι οποίες σχετίζονται με τον τομέα της βιομηχανίας της IPTV.
- **MPEG (Moving Pictures Experts Group).** Η MPEG είναι μία ομάδα εργασίας του ISO/IEC η οποία έχει υπό την ευθύνη της την ανάπτυξη διεθνών προτύπων συμπίεσης, αποσυμπίεσης, επεξεργασίας και κωδικοποιημένης αναπαράστασης βίντεο, ήχου ή και του συνδυασμού αυτών. Το 1993 η MPEG ολοκλήρωσε τον ορισμό των εννοιών του MPEG-2 βίντεο, του MPEG-2 ήχου, και των MPEG-2 συστημάτων.
- **ETSI.** Το 2003 το Ευρωπαϊκό Τεχνικό Ινστιτούτο Προτύπων συγκρότησε μια ομάδα ανάπτυξης προδιαγραφών τη λεγόμενη TISPAN (Telecoms & Internet converged Services & Protocols for Advanced Networks) για τις σταθερές και ασύρματες υποδομές δικτύωσης της επόμενης γενιάς. Η TISPAN αποτελείται από υποομάδες οι οποίες εργάζονται για την ανάπτυξη προδιαγραφών σε θέματα που είναι ιδιαίτερος σημαντικά για τον τομέα της IPTV βιομηχανίας, όπως αυτά της οικιακής δικτύωσης, της ασφάλειας, της διαχείρισης ενός δικτύου καθώς και της διευθυνσιοδότησης.
- **Open IPTV Forum.** Το Open IPTV Forum αποτελεί μια κοινοπραξία τυποποίησης που συγκροτήθηκε από μια ομάδα χειριστών δικτύων, προμηθευτών εξοπλισμού δικτύων υποδομής και προμηθευτών ηλεκτρονικών για τους καταναλωτές. Σκοπός αυτής της ομάδας είναι να συνεργαστεί με τις ήδη υπάρχουσες ομάδες πιστοποίησης ώστε να ορίσει τις προδιαγραφές για τη μετάδοση των IPTV υπηρεσιών διαμέσου ενός πλήθους διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύου.
- **WirelessHD Consortium.** Η WirelessHD κοινοπραξία η οποία συστάθηκε το 2006, είναι μία ομάδα επιχειρήσεων τεχνολογίας και ηλεκτρονικών ειδών. Εργάζεται πάνω στην πιστοποίηση μιας ασύρματης ψηφιακής διεπαφής για την αποστολή ασυμπίεστου IP περιεχομένου στις HD οθόνες. Αυτή η διεπαφή ενσωματώνεται σε συσκευές όπως τα IP set-top boxes και στις υψηλής ευκρίνειας επίπεδες οθόνες.

- **ITU-T FG IPTV.** Το 2006, συστάθηκε από την ITU η FG IPTV, για το συντονισμό και την προώθηση της ανάπτυξης καθολικών IPTV προτύπων. Η ομάδα αυτή επικεντρώνει τις ενέργειες της σε πέντε βασικούς τομείς:
  - Την αρχιτεκτονική.
  - Τη διαχείριση ψηφιακών δικαιωμάτων.
  - Τις μετρικές ποιότητας υπηρεσίας.
  - Τα μεταδεδομένα.
  - Τη διαλειτουργικότητα και τη δοκιμή (testing).
- **DVB-IPI.** Ο DVB οργανισμός συγκρότησε την DVB-IPI (DVB Technical Module Ad Hoc Group on IP Infrastructure) ομάδα, για την ανάπτυξη προτύπων σχετικών με τη μετάδοση υπηρεσιών ψηφιακής τηλεόρασης μέσω IP δικτύων. Στόχος της ομάδας αυτής είναι ο προσδιορισμός των τεχνολογιών οι οποίες θα επιτρέπουν στον καταναλωτή την αγορά ενός DVB-IPI set-top box, τη σύνδεση του σε ένα ευρυζωνικό δίκτυο και την άμεση λειτουργία του χωρίς πολύπλοκες ρυθμίσεις [1].

### 3.7 Τεχνολογίες δικτύων διανομής IPTV

Η διανομή των IPTV υπηρεσιών ικανοποιείται μέσω πέντε διαφορετικού τύπου ευρυζωνικών δικτύων τα οποία είναι τα ακόλουθα:

- Δίκτυα οπτικών ινών
- Δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης
- Δίκτυα DSL
- Δορυφορικά δίκτυα
- Ασύρματα δίκτυα

#### 3.7.1 IPTV διαμέσου οπτικών ινών

Η μετάδοση IP υπηρεσιών όπως αυτή της IPTV μέσω των δικτύων των οπτικών ινών παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον λόγω του υψηλού εύρους ζώνης, των μικρών απωλειών κατά τη μετάδοση, των χαμηλών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αλλά και της πρόσφατης μείωσης του κόστους του εξοπλισμού και

της ανάπτυξης αυτού. Η υλοποίηση αυτού του τύπου δικτύων γίνεται σύμφωνα με τις ακόλουθες αρχιτεκτονικές δικτύου:

- **Fiber To The Regional Office (FTTRO).** Η αρχιτεκτονική αυτή αναφέρεται στην εγκατάσταση οπτικής ίνας από το IPTV κέντρο δεδομένων στο πλησιέστερο Regional Office (RO). Στο υπόλοιπο τμήμα από το RO μέχρι τον τελικό χρήστη χρησιμοποιείται η ήδη υπάρχουσα καλωδίωση χαλκού.
- **Fiber To The Neighborhood (FTTN).** Γνωστό επίσης και ως fiber to the node, αναφέρεται στην εγκατάσταση οπτικής ίνας από το IPTV κέντρο δεδομένων μέχρι το splitter μιας γειτονιάς. Ο κόμβος αυτός πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση από το συνδρομητή μικρότερη του 1.5 Km. Για την τελική σύνδεση με τον πελάτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η DSL τεχνολογία.
- **Fiber To The Curb (FTTC).** Μια FTTC υποδομή δικτύωσης περιλαμβάνει την εγκατάσταση οπτικής ίνας μέχρι το κράσπεδο των πεζοδρομίων, με την οπτική ίνα να απέχει το πολύ 300 μέτρα από μία οικία ή μια επιχείρηση. Για τη σύνδεση από την οπτική ίνα μέχρι τις εγκαταστάσεις του IPTV συνδρομητή χρησιμοποιείται ένα ομοαξονικό καλώδιο ή καλώδιο χαλκού. Αυτού του είδους η αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται κυρίως κατά την κατασκευή συγκροτημάτων νέων κατοικιών.
- **Fiber To The Home (FTTH).** Σε αυτή την αρχιτεκτονική ολόκληρη η διαδρομή από το IPTV κέντρο δεδομένων μέχρι το εσωτερικό μιας οικίας καλύπτεται από οπτική ίνα. Αυτού του είδους τα συστήματα είναι ικανά να μεταφέρουν στους συνδρομητές δεδομένα μεγάλου όγκου και αποτελούν full-duplex συστήματα επικοινωνίας κατάλληλα για τη διαδραστική φύση των IPTV υπηρεσιών.
- **Fiber To The Apartment (FTTA).** Η αρχιτεκτονική αυτή κάνει χρήση οπτικών ινών στο εσωτερικό μέρος μιας πολυκατοικίας, στο σημείο μεταξύ ενός κεντρικού gateway hub το οποίο συνήθως βρίσκεται στο υπόγειο μιας πολυκατοικίας και κάθε επιμέρους διαμερίσματος[1].

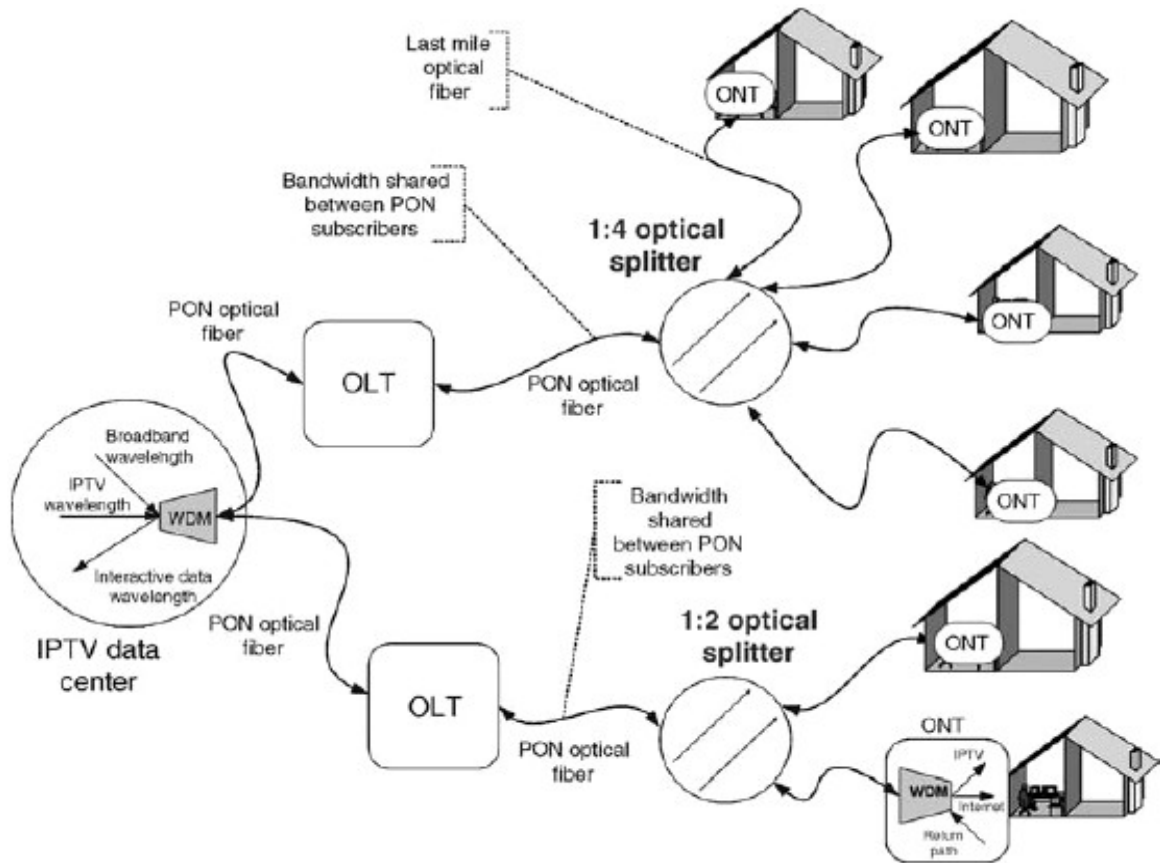
Η λειτουργία αυτών των αρχιτεκτονικών επιτρέπεται μέσω των PON (Passive Optical Network - PON) και των AON (Active Optical Networks - AON) δικτύων.



### 3.7.1.1 PON δίκτυα

Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο ακολουθεί την point-to-multipoint τοπολογία δικτύωσης. Χρησιμοποιεί κύματα φωτός για τη μεταφορά των δεδομένων στο δίκτυο και συνεπώς δεν απαιτεί ηλεκτρονικά στοιχεία μεταξύ του IPTV data center και του προορισμού των δεδομένων. Μια FTTx αρχιτεκτονική που βασίζεται στο PON δίκτυο συμβαδίζει με τα χαρακτηριστικά που ορίζει η G.983 προδιαγραφή, η οποία επιτρέπει στα PON δίκτυα τη μετάδοση σημάτων σε απόσταση έως 20 Km χωρίς τη χρήση ενισχυτών (amplifiers).

Ένα PON δίκτυο αποτελείται από ένα σημείο τερματισμού της οπτικής γραμμής (Optical Line Termination - OLT) το οποίο βρίσκεται στο IPTV data center και από διάφορα τερματικά του οπτικού δικτύου (Optical Network Terminals - ONTs ή Optical Network Units - ONUs), τα οποία τοποθετούνται στο εσωτερικό των εγκαταστάσεων των συνδρομητών ή στο σημείο που τελειώνει η οπτική ίνα σε κάθε γειτονιά (σχήμα 3.2). Στην περίπτωση όπου τα ONTs τοποθετούνται στο εξωτερικό μέρος των εγκαταστάσεων των συνδρομητών χρησιμοποιούνται



Σχήμα 3.2 IPTV FTTH δίκτυο με χρήση των PON τεχνολογιών [1]

καλώδια χαλκού υψηλών ταχυτήτων όπως είναι το DSL για τη μεταφορά των IPTV δεδομένων εντός της οικίας των συνδρομητών. Ένα OLT χρησιμοποιεί καλώδια οπτικών ινών και οπτικά splitters για τη δρομολόγηση των δεδομένων στα ONTs. Τα οπτικά splitters επιτρέπουν σε 32 έως 128 συνδρομητές να μοιραστούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης [7] διαχωρίζοντας ένα οπτικό σήμα (downstream signal) σε πολλαπλά οπτικά σήματα αλλά και συνθέτοντας πολλαπλά οπτικά σήματα σε ένα ενιαίο οπτικό σήμα (upstream signal). Στα δίκτυα αυτά τα καλώδια οπτικών ινών και τα οπτικά splitters είναι “παθητικά” και έτσι εξαιρείται η ανάγκη απομακρυσμένης τροφοδότησης με συνέπεια οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησής τους να περιορίζεται. Ο κύριος σκοπός ενός ONT είναι να παράσχει στους IPTV συνδρομητές μια διεπαφή στο PON δίκτυο. Λαμβάνει τα οπτικά σήματα και εξετάζοντας τη διεύθυνση που περιλαμβάνεται στα πακέτα του δικτύου τα μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα. Η πλειονότητα των ONTs περιλαμβάνει μια Ethernet διεπαφή για τη μεταφορά δεδομένων, μια RJ-11 σύνδεση για τη σύνδεση με το οικιακό τηλεφωνικό σύστημα και μία ομοαξονική διεπαφή για τη σύνδεση με την τηλεόραση.

Τα PON δίκτυα τα οποία υποστηρίζουν τόσο την παραδοσιακή εκπομπή τηλεόρασης όσο και την IPTV τεχνολογία διακρίνονται στις παρακάτω επιμέρους κατηγορίες:

- **BPON (Broadband PON).** Ένα BPON δίκτυο βασίζεται στο APON (ATM PON) και στην ITU-T G.983 προδιαγραφή. Τα ATM δίκτυα είναι δημοφιλή για τη μετάδοση εφαρμογών δεδομένων φωνής και βίντεο υψηλών ταχυτήτων. Το ATM αποτελεί ένα connection orientated πρωτόκολλο και η ικανότητα των ATM δικτύων να συντηρούν bandwidth για τις time-sensitive εφαρμογές, είναι ένα ιδιαίτερος χρήσιμο χαρακτηριστικό αυτών των δικτύων για τη μετάδοση των IPTV υπηρεσιών. Τα BPON δίκτυα υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 622 Mbps στην κάτω ζεύξη και μέχρι 155 Mbps στην άνω ζεύξη. Ο ασύμμετρος αυτός τύπος μετάδοσης οφείλεται στην point-to-point τοπολογία μεταξύ του OLT και κάθε ONT. Επίσης γίνεται ανάθεση συγκεκριμένων καναλιών για τις διαφορετικού τύπου υπηρεσίες η οποία βοηθά στην απομάκρυνση των παρεμβολών αλλά μειώνει τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της άνω ζεύξης. Τα BPONs δίκτυα ωστόσο υποστηρίζουν και το συμμετρικό τύπο μετάδοσης.

- **EPON (Ethernet PON).** Το EPON χρησιμοποιεί το Ethernet ως μηχανισμό μεταφοράς και οι ρυθμοί μετάδοσης που υποστηρίζει εξαρτώνται από την απόσταση μεταξύ του OLT και των ONTs.
- **GPON (Gigabit PON).** Το GPON αποτελεί βελτίωση του BPON και βασίζεται στην ITU-T G.984 προδιαγραφή. Υποστηρίζει συνεπώς το ATM καθώς το Ethernet και το SONET (Synchronous Optical Network) πρωτόκολλο και παρέχει επιπλέον χαρακτηριστικά ασφαλείας. Η υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων από το GPON επιτρέπει στους διαχειριστές των δικτύων τη συνέχιση της παροχής των παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών εκτός των IPTV υπηρεσιών επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης 2.5 Gbps στην κάτω ζεύξη, 1.5 Gbps στην άνω ζεύξη και κάλυψη περιοχών σε αποστάσεις έως 20 Km.
- **10G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON).** Το 10G-EPON είναι συμβατό με το EPON και υποστηρίζει τόσο τη συμμετρική όσο και την ασύμμετρη μετάδοση. Στη συμμετρική μετάδοση οι ρυθμοί που επιτυγχάνονται είναι 10 Gbps για την άνω και κάτω ζεύξη ενώ στην ασύμμετρη μετάδοση επιτυγχάνονται ρυθμοί 10 Gbps στην κάτω ζεύξη και 1 Gbps στην άνω ζεύξη. Το πρότυπο αυτό εγκρίθηκε το Σεπτέμβριο του 2009 και αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμο το 2010 [7].

Στον πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων PON τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των IPTV σημάτων.

**Πίνακας 3.1** Σύγκριση των διαφόρων PON τεχνολογιών [1]

|             | ITUT-T Specification | GPRS                                        | EDGE                                                                    |
|-------------|----------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>BPON</b> | G.983                | 622 Mbps downstream and 155 Mbps upstream   | Primarily ATM however IP over Ethernet will also operate on the network |
| <b>GPON</b> | G.984                | 2.5 Gbps downstream and 1.5 Gbps upstream   | Ethernet and SONET                                                      |
| <b>EPON</b> | P802.3ah             | 1.25 Gbps downstream and 1.25 Gbps upstream | Gigabit Ethernet                                                        |

### **3.7.1.2 AON δίκτυα**

Τα ενεργά οπτικά δίκτυα χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά μέρη μεταξύ του συνδρομητή και του IPTV κέντρου δεδομένων όπως είναι τα Ethernet switches.

### **3.7.2 IPTV διαμέσου DSL δικτύων**

Οι εταιρίες τηλεφωνίας (TELCOs) πέραν των υπηρεσιών τηλεφωνίας και διαδικτύου και προκειμένου να αντιμετωπίσουν τον ανταγωνισμό των παρόχων της καλωδιακής τηλεόρασης και των ασύρματων ευρυζωνικών παρόχων εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα της DSL υποδομής τους για την παροχή IPTV υπηρεσιών. Το κύριο πλεονέκτημα της DSL υποδομής για τα IPTV συστήματα είναι ότι χρησιμοποιούν την ήδη υπάρχουσα καλωδιακή υποδομή των δικτύων τηλεφωνίας η οποία χρησιμοποιείται στα περισσότερα σπίτια ανά τον κόσμο. Πολλά από τα δίκτυα που βασίζονται στη DSL τεχνολογία δεν υποστηρίζουν τις απαιτήσεις υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης των βίντεο. Ωστόσο αυτές οι απαιτήσεις ικανοποιούνται μέσω των ADSL, ADSL2+ και VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line) τεχνολογιών.

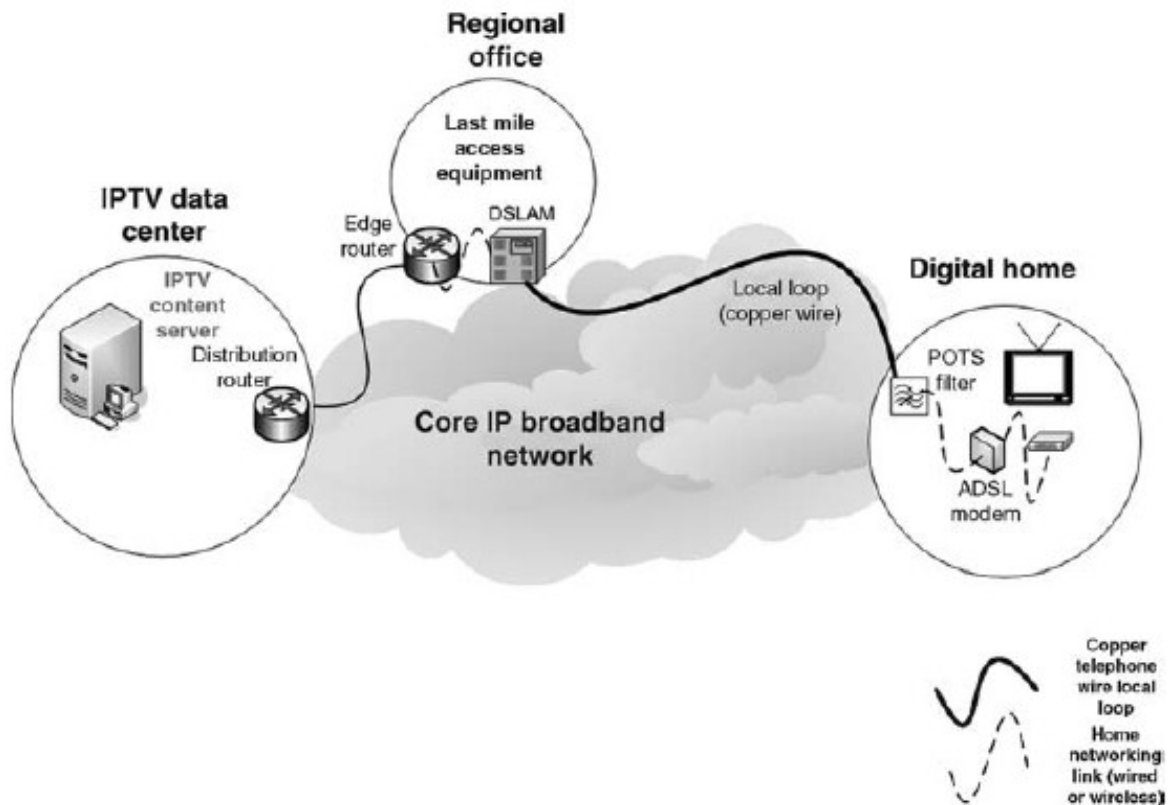
#### **3.7.2.1 ADSL**

Το ADSL είναι η δημοφιλέστερη εκδοχή της DSL τεχνολογίας για την παροχή ευρυζωνικών συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων. Υιοθετεί την point-to-point τοπολογία σύνδεσης χαρακτηριστικό που επιτρέπει στους παρόχους τη διανομή υπηρεσιών υψηλού εύρους ζώνης όπως είναι το IP βίντεο μέσω των υπαρχουσών τηλεφωνικών γραμμών. Ως ασύμμετρη τεχνολογία η μετάδοση δεδομένων από το IPTV data center σε μια IPTVCD είναι πιο γρήγορη από τη μετάδοση από μια IPTVCD στο IPTV data center, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 8 Mbps στη κάτω ζεύξη και 1.5 Mbps στην άνω ζεύξη. Συγκεκριμένα μια ADSL σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει δύο MPEG-2 SDTV κανάλια και μια υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο διαδίκτυο. Το κύριο μειονέκτημα μιας ADSL σύνδεσης είναι ότι η διαθεσιμότητα της εξαρτάται από την απόσταση των συνδρομητών από το κέντρο του παρόχου (CO). Οι συνδρομητές οι οποίοι απέχουν από το κέντρο του παρόχου σε απόσταση μικρότερη των 5.5 χιλιομέτρων χαίρουν ADSL

υπηρεσιών ικανοποιητικής ποιότητας. Οι τηλεφωνικές γραμμές είναι σχεδιασμένες ώστε να υποστηρίζουν υπηρεσίες φωνής χαμηλών συχνοτήτων. Η λειτουργία των γραμμών (για τη μετάδοση δεδομένων) σε υψηλές συχνότητες προκαλεί συνήθως παραμόρφωση και παρεμβολές γι' αυτό θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη κατανομή του εύρους ζώνης για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών και την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Ο διαχωρισμός των σημάτων φωνής χαμηλής συχνότητας από τα υψίσυχνα σήματα δεδομένων γίνεται με τη βοήθεια ενός splitter.

Καθώς ο ADSL εξοπλισμός παρέχει ψηφιακή σύνδεση μέσω του PSTN δικτύου τα σήματα που διανέμονται κατά μήκος αυτού διαμορφώνονται σε αναλογικά σήματα. Συνεπώς τα modems που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση με τις IPTVCDs όσο και για τη σύνδεση με το IPTV data center μετατρέπουν τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά και το αντίστροφο αντιστοίχως. Πολλά modems ενσωματώνουν ένα δρομολογητή για την παροχή υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων υψηλών ταχυτήτων. Για τη διαμόρφωση των ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά σήματα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές, η CAP (Carrierless Amplitude and Phase) και η DMT (Discrete Multitone). Το CAP σχήμα διαμόρφωσης είναι παρεμφερές της QAM διαμόρφωσης και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές καλωδιακής και δορυφορικής τηλεόρασης. Το DMT σχήμα διαμόρφωσης το οποίο είναι παρεμφερές της OFDM τεχνικής, είναι προτιμότερο της CAP τεχνικής καθώς υποδιαιρεί το φάσμα συχνοτήτων σε υποκανάλια προσαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά κάθε τηλεφωνικής γραμμής και μεγιστοποιώντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Η DMT είναι παρεμφερής διαμόρφωσης. Η ADSL τεχνολογία χρησιμοποιεί επίσης DSLAMs (Digital Subscriber Line Access Multiplexers) τα οποία είναι εγκατεστημένα στο regional office του παρόχου των IPTV υπηρεσιών συνδέεται με τους συνδρομητές μέσω καλωδίων χαλκού, αθροίζει την κίνηση και συνδέεται κατόπιν με το IPTV κέντρο δεδομένων μέσω οπτικών ινών (σχήμα 3.3). Τα DSLAMs διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα Layer 2 DSLAMs και τα IP-aware DSLAMs. Τα Layer 2 DSLAMs ονομάζονται έτσι εξαιτίας του ότι λειτουργούν στο δεύτερο επίπεδο του OSI μοντέλου μεταφράζοντας την Ethernet κίνηση στο ATM ενώ τα IP-aware DSLAMs υποστηρίζουν την αντιγραφή των καναλιών έτσι ώστε να μην απαιτείται η αποστολή του ίδιου καναλιού ξεχωριστά σε κάθε συνδρομητή (multicasting).

Η ADSL τεχνολογία δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση για τη μετάδοση IPTV περιεχομένου. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ρυθμοί μετάδοσης των 8 Mbps δεν



Σχήμα 3.3 Αρχιτεκτονική IPTV με χρήση εξοπλισμού ADSL [1]

ικανοποιούν τις απαιτήσεις των ρυθμών μετάδοσης των HDTV καναλιών αλλά και στο ότι ο ασύμμετρος ρυθμός μετάδοσης δεν είναι ιδανικός για αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες οι οποίες απαιτούν τους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη [1].

### 3.7.2.2 ADSL2

Η αρχική έκδοση του ADSL2 εγκρίθηκε από το ITU το 2003 και περιλαμβάνει πλήθος βελτιώσεων του αρχικού ADSL προτύπου όπως υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης στην κάτω ζεύξη και την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων από το CO έως το modem του συνδρομητή. Επιπλέον του ADSL2 υπάρχουν οι εξής δύο εκδόσεις:

- **ADSL2+** Σύντομα μετά την τυποποίηση του ADSL2 υιοθετήθηκε από την ITU το ADSL2+. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στο ADSL2 και επιτρέπει στους φορείς παροχής υπηρεσιών την παροχή ρυθμών μετάδοσης μέχρι 20

Mbps σε αποστάσεις έως 1.5 Km περίπου από το CO. Το ADSL2+ κάνει χρήση σημάτων εύρους ζώνης 138 kHz έως 2.208 MHz.

- **ADSL-Reach Extended** Η ADSL-Reach Extended τεχνολογία γνωστή και ως RE-ADSL2 τυποποιήθηκε το 2003 για να επιτρέψει στους φορείς παροχής των IPTV υπηρεσιών την κάλυψη συνδρομητών που βρίσκονται σε απόσταση μέχρι 6 Km από το CO.

### 3.7.3.3 VDSL

Το VDSL βασίζεται στην ίδια τεχνολογία με το ADSL2+. Εξαλείφει τη συμφόρηση (last mile bottleneck) που προκαλείται στο δίκτυο από προηγούμενες εκδόσεις και υποστηρίζει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης που επιτρέπουν την παροχή στους IPTV συνδρομητές μιας πληθώρας υπηρεσιών όπως η VoD καθώς και την εκπομπή HDTV καναλιών. Η VDSL τεχνολογία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή της παλιάς ATM υποδομής των παρόχων σε IP. Οι εκδόσεις της VDSL τεχνολογίας είναι οι εξής:

- **VDSL1** Το VDSL1 επικυρώθηκε το 2004 και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως 55 Mbps στην κάτω ζεύξη και έως 15 Mbps στην άνω ζεύξη. Ωστόσο έχει περιορισμένο εύρος κάλυψης και η χρήση του είναι περιορισμένη.
- **VDSL2.** Αυτή η έκδοση αποτελεί βελτίωση της VDSL1 και υποδιαιρείται σε δύο επιμέρους εκδόσεις, τη VDSL2 Long Reach και τη VDSL2 Short Reach.
  - *VDSL2 Long Reach.* Η VDSL2 Long Reach έκδοση δημιουργήθηκε ούτως ώστε να εξυπηρετηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο πλήθος συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων. Επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης 30 Mbps σε αποστάσεις 1.2 - 1.5 Km από το CO, με εύρος κάλυψης 1.5 Km. Για την υποστήριξη αυτών των ταχυτήτων κάνει χρήση εύρους ζώνης 30 MHz σε αντίθεση με το VDSL1 το οποίο κάνει χρήση εύρους ζώνης 12 MHz. Υποστηρίζει επίσης προηγμένους μηχανισμούς διόρθωσης σφαλμάτων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας αυτού του είδους των συνδέσεων.
  - *VDSL2 Short Reach.* Η VDSL2 Short Reach βασίζεται στο DMT σχήμα διαμόρφωσης. Η λειτουργία του ενδείκνυται για αποστάσεις έως 350 m από το CO και είναι 12 φορές ταχύτερο συγκριτικά με το ADSL. Το πρότυπο αυτό με την

τεχνική της συνένωσης καναλιών επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης έως 100 Mbps στην κάτω ζεύξη ενώ στην άνω ζεύξη οι ρυθμοί μετάδοσης υπερβαίνουν κατά πολύ τους ρυθμούς μετάδοσης των ADSL2+ δικτύων. Οι τιμές αυτές είναι ρεαλιστικές στην περίπτωση απουσίας παρεμβολών και στην περίπτωση καλής ποιότητας των καλωδίων χαλκού. Στα νέα χαρακτηριστικά της VDSL2 συγκαταλέγονται οι QoS μηχανισμοί, η ικανότητα διαχωρισμού των ευαίσθητων στην καθυστέρηση δεδομένων (dual latency), καθώς και οι βελτιωμένες τεχνικές κωδικοποίησης. Η συμβατότητα του VDSL (backward compatibility) με τις προηγούμενες εκδόσεις του ADSL επιτρέπει στους IPTV παρόχους την ομαλή μετάβαση τους στη VDSL τεχνολογία. Οι IPTV πάροχοι χρησιμοποιούν δύο προσεγγίσεις για την ενσωμάτωση του VDSL στην υπάρχουσα υποδομή τους. Η πρώτη προσέγγιση αναφέρεται στην τοποθέτηση νέου VDSL2 εξοπλισμού στο regional office των παρόχων η οποία θα επιτρέπει παράλληλα τη λειτουργία του DSLAM με τις ήδη υπάρχουσες ADSL και ADSL2 τεχνολογίες. Η δεύτερη προσέγγιση αναφέρεται στην τοποθέτηση του εξοπλισμού αυτού στην πλευρά του IPTV συνδρομητή [1].

### **3.7.3 IPTV διαμέσου δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης**

Οι επιχειρήσεις καλωδιακής τηλεόρασης έχουν προβεί στην επένδυση σημαντικών ποσών για την αναβάθμιση των δικτύων τους προκειμένου να υποστηρίξουν προηγμένες υπηρεσίες όπως είναι η IPTV. Η αναβάθμιση αυτών των δικτύων περιλαμβάνει τη χρήση υβριδικών δικτύων που βασίζονται στην οπτική ίνα και την ομοαξονική καλωδίωση (Hybrid Fiber/Coax - HFC).

#### **3.7.3.1 Σύνοψη HFC δικτύων**

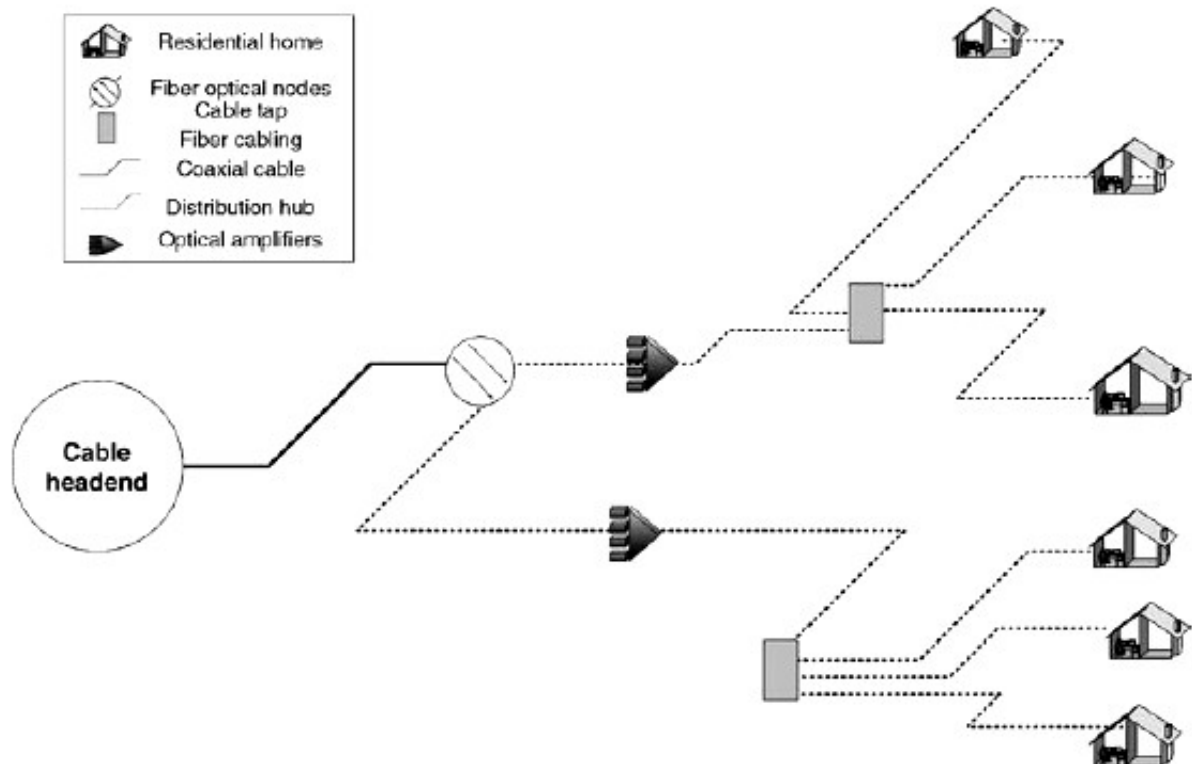
Σε μια περιοχή που διαθέτει ένα καλωδιακό σύστημα τηλεόρασης οι κάτοικοί της μπορούν να έχουν πρόσβαση στις IPTV υπηρεσίες μέσω των HFC δικτύων. Τα δίκτυα που βασίζονται στην HFC τεχνολογία μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα αναλογικές και ψηφιακές υπηρεσίες, χαρακτηριστικό σημαντικό για τους διαχειριστές δικτύων που αναπτύσσουν τις IPTV υπηρεσίες σε μια σταδιακή βάση. Η HFC τεχνολογία ικανοποιεί την ανάγκη για επέκταση της χωρητικότητας και τις



ανάγκες αξιοπιστίας ενός IPTV συστήματος. Επίσης τα φυσικά χαρακτηριστικά των καλωδίων χαλκού και των οπτικών ινών υποστηρίζουν τη λειτουργία του δικτύου σε πολλά gigabits ανά δευτερόλεπτο.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.4 σε ένα HFC δίκτυο το μέρος του δικτύου που βασίζεται στην οπτική ίνα συνδέεται μέσω ενός οπτικού κόμβου με το ομοαξονικό δίκτυο ο οποίος ενεργεί ως διεπαφή για τη σύνδεση των ετερογενών αυτών δικτύων. Οι οπτικοί κόμβοι διανέμουν τα σήματα κατά μήκος του ομοαξονικού δικτύου το οποίο περιλαμβάνει συσκευές ενισχυτών και ειδικών συσκευές που ονομάζονται taps για τη σύνδεση του ομοαξονικού δικτύου με τους συνδρομητές μέσω της tree-and-branch τοπολογίας [1].

Από τεχνικής απόψεως ένα HFC καλωδιακό IPTV σύστημα αποτελείται από ένα συνδυασμό RF και IP συσκευών οι οποίες είναι:

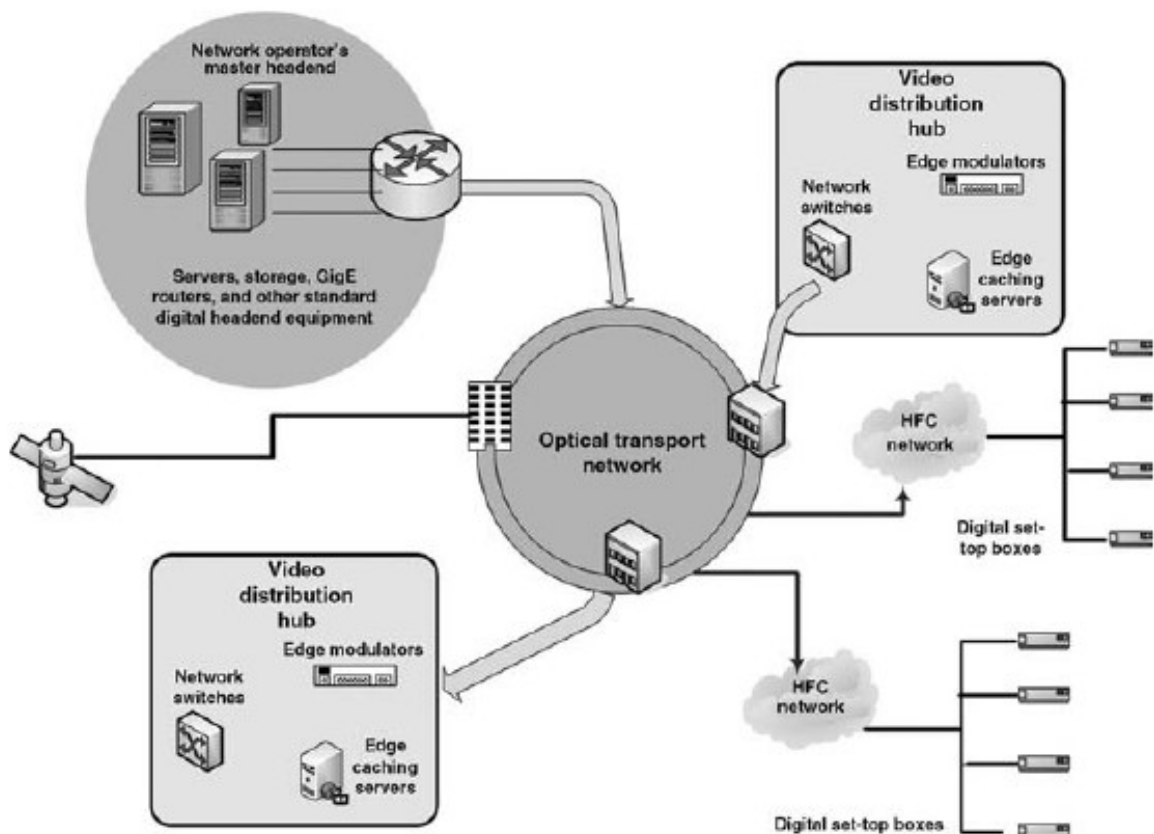


Σχήμα 3.4 Παράδειγμα HFC δικτύου [1]

- **GigE switches ή δρομολογητές.** Το Gigabit Ethernet (GigE) είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς το οποίο χρησιμοποιείται από εφαρμογές με

υψηλής απαιτήσεις χωρητικότητας όπως είναι το VoD. Ο GigE δρομολογητής αθροίζει την IPTV κίνηση την οποία διασυνδέει με το δίκτυο πυρήνα.

- **Optical transport network.** Το δίκτυο πυρήνα είναι το μονοπάτι μεταξύ των βίντεο servers στο IPTV data center και των διαμορφωτών (modulators) που βρίσκονται στο regional office (σχήμα 3.5). Το SONET και το ATM αποτελούν παραδείγματα τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το δίκτυο πυρήνα.
- **Edge modulators.** Οι διαμορφωτές που βρίσκονται στα regional offices λαμβάνουν το IPTV περιεχόμενο από το δίκτυο πυρήνα, το μετατρέπουν από IP πακέτα σε RF πακέτα και το διανέμουν στα set-top boxes.



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα HFC IPTV αρχιτεκτονικής [1]

### 3.7.3.2 IPTV διαμέσου DOCSIS

Το DOCSIS® (Data Over Cable Service Interface Specification) και το EuroDOCSIS είναι δύο διεθνή τηλεπικοινωνιακά πρότυπα τα οποία σχεδιάστηκαν αρχικά για την παροχή υψηλών ταχυτήτων υπηρεσιών Internet μέσω WANs

δικτύων [1]. Σήμερα η προδιαγραφή αυτή προσδιορίζει τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την παροχή IP ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω ενός δικτύου καλωδιακής τηλεόρασης. Την πρώτη DOCSIS προδιαγραφή αποτέλεσε η έκδοση 1.0, η οποία εκδόθηκε το Μάρτιο του 1997 ενώ τον Απρίλιο του 1999 τη διαδέχεται η 1.1 αναθεωρημένη έκδοση η οποία περιέχει χαρακτηριστικά για την υποστήριξη QoS. Εξαιτίας των αυξανόμενων απαιτήσεων για συμμετρικές υπηρεσίες όπως η IP τηλεφωνία η προδιαγραφή αναθεωρείται ξανά με την έκδοση του DOCSIS 2.0 το Δεκέμβριο του 2001 για την ενίσχυση των υποστηριζόμενων ταχυτήτων μετάδοσης της άνω ζεύξης. Σήμερα η πιο πρόσφατη έκδοση του DOCSIS (DOCSIS 3.0) αφίχθη τον Αύγουστο του 2006 και παρέχει αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη καθώς εισάγει την υποστήριξη για το IPv6. Στο τέλος του 2010 το DOCSIS αναμένεται να προσφέρει πραγματικές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 120 Mbps και 30 Mbps στην κάτω και την άνω ζεύξη αντίστοιχα [8]. Στον πίνακα 3.2 συνοψίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των εκδόσεων του DOCSIS ενώ στον πίνακα 3.3 απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ του DOCSIS και του EuroDoCSIS.

Η αρχιτεκτονική του DOCSIS περιλαμβάνει δύο κύρια στοιχεία. Ένα cable modem στο χώρο του συνδρομητή και το CMTS (Cable Modem Termination System) το οποίο συναντάται στο IPTV κέντρο δεδομένων το οποίο δρομολογεί την κίνηση μεταξύ του HFC δικτύου και του Internet (σχήμα 3.6) με πολλές εκ των λειτουργιών ενός CMTS να είναι όμοιες με αυτές του DSLAM σε ένα DSL σύστημα. Το IPTV κέντρο δεδομένων υποστηρίζει 6-12 CMTSs, με κάθε CMTS να εξυπηρετήσει από 4.000 έως 150.000 cable modems. Το CMTS μπορεί να ενεργήσει και σαν δρομολογητής ή σαν bridge καθώς ένα cable modem δε μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με άλλα modems [9]. Αρμοδιότητα του CMTS είναι επίσης η συγκέντρωση στατιστικών στοιχείων για την τιμολόγηση των υπηρεσιών που χρησιμοποιούν οι συνδρομητές του [1].

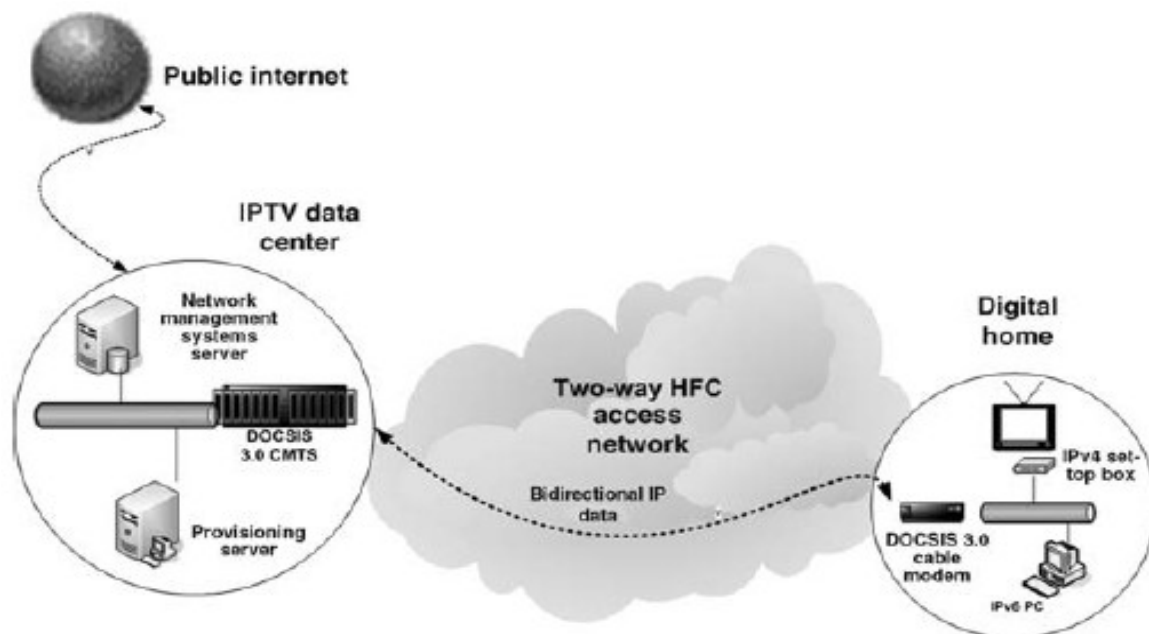
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά εκδόσεων του DOCSIS [8]

|                                              | DOCSIS 1.0 | DOCSIS 1.1 | DOCSIS 2.0 | DOCSIS 3.0 |
|----------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Maximum downstream broadband capacity</b> | 40 and 55  | 40 and 55  | 40 and 55  | 160        |

|                                                   |                                             |                                             |                                                      |                                                                                                             |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>(Mbps)</b>                                     |                                             |                                             |                                                      |                                                                                                             |
| <b>Downstream frequency range (MHz)</b>           | 50-750                                      | 50-750                                      | 88-870                                               | 88-1002                                                                                                     |
| <b>Maximum upstream broadband capacity (Mbps)</b> | 10                                          | 10                                          | 30                                                   | 120 and above                                                                                               |
| <b>Upstream frequency range (MHz)</b>             | 5-42                                        | 5-42                                        | 5-42                                                 | Support for 5-42 MHz is mandatory. Manufacturers also have an option of using the 5-85 MHz frequency range  |
| <b>Modulation scheme</b>                          | QPSK and 16 QAM                             | QPSK and 16 QAM                             | QPSK, 8 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, and 128 QAM     | QPSK, 8 QAM, 16 QAM, 32 QAM, 64 QAM, and 128 QAM                                                            |
| <b>Upstream channel bandwidth</b>                 | 200 kHz, 400 kHz, 800 kHz, 1.6 MHz, 3.2 MHz | 200 kHz, 400 kHz, 800 kHz, 1.6 MHz, 3.2 MHz | 200 kHz, 400 kHz, 800 kHz, 1.6 MHz, 3.2 MHz, 6.4 MHz | 1.6, 3.2 and 6.4 MHz. Note that support for the 0.2, 0.4 and 0.8 MHz channels are optional for this version |

**Πίνακας 3.3** Διαφορές μεταξύ DOCSIS και EuroDOCSIS [8]

| Channel configuration         |                             | Downstream throughput |            | Upstream throughput |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------|---------------------|
| Number of downstream channels | Number of upstream channels | DOCSIS                | EuroDOCSIS |                     |
| 4                             | 4                           | 152 Mbit/s            | 200 Mbit/s | 108 Mbit/s          |
| 8                             | 4                           | 304 Mbit/s            | 400 Mbit/s | 108 Mbit/s          |



Σχήμα 3.6 Δικτυακή υποδομή DOCSIS 3.0 [1]

Στο φυσικό επίπεδο οι DOCSIS 1.0/1.1 προδιαγραφές ορίζουν την TDMA μέθοδο πρόσβασης στο κανάλι ενώ οι DOCSIS 2.0 και DOCSIS 3.0 προδιαγραφές υποστηρίζουν και τη SCDMA (Synchronous Code Division Multiple Access) μέθοδο. Το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη μέθοδο πρόσβασης στο κανάλι αλλά και από την κατεύθυνση της κίνησης στο δίκτυο (δηλαδή την άνω ή την κάτω ζεύξη). Όλες οι εκδόσεις του DOCSIS υποστηρίζουν τα 64QAM και 256QAM σχήματα διαμόρφωσης στην κάτω ζεύξη και τα QPSK, 16QAM στην άνω ζεύξη. Οι εκδόσεις 2.0 και 3.0 του DOCSIS υποστηρίζουν επίσης τα 32QAM και 128QAM σχήματα διαμόρφωσης για την άνω ζεύξη [8].

Στο MAC επίπεδο υποστηρίζεται η λειτουργία της πολυεκπομπής (multicasting) με τη χρήση της τεχνικής συνένωσης των καναλιών και της εξισορρόπησης φορτίου (load balancing). Η πολυεκπομπή μειώνει το εύρος ζώνης που απαιτείται για την αποστολή των ίδιων καναλιών στους IPTV συνδρομητές χρησιμοποιώντας μοντέλα επικοινωνίας και πρωτόκολλα όπως το SSM (Source Specific Multicast), το IGMP και το MLD (Multicast Listener Discovery). Η τεχνική της συνένωσης καναλιών εφαρμόζεται τόσο στην άνω όσο και την κάτω ζεύξη ενός καλωδιακού δικτύου τηλεόρασης, επιτρέποντας τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου εύρους ζώνης καναλιού με σκοπό την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και τη μείωση των καθυστερήσεων που προκαλούνται λόγω της συμφόρησης των πακέτων που

αποστέλλονται μέσα από ένα μόνο κανάλι στο HFC δίκτυο. Η κατανομή και η διαχείριση των καναλιών συνένωσης είναι υπό την ευθύνη του CMTS. Η εξισορρόπηση φορτίου είναι ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό γνώρισμα των μεγάλων δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης που κάνουν χρήση εκατοντάδων και σε μερικές περιπτώσεις χιλιάδων modems. Η DOCSIS 3.0 προδιαγραφή μέσω της εξισορρόπησης φορτίου λαμβάνει μέτρα για την αντιμετώπιση των δεδομένων μεγάλου όγκου που διακινούνται εξαιτίας των πολυμεσικών IPTV εφαρμογών.

Το DOCSIS 3.0 για τη διαχείριση σφαλμάτων των MAC, PHY και IP επιπέδων χρησιμοποιεί το SNMP (Simple Network Management Protocol) πρωτόκολλο [1]. Στο επίπεδο ασφαλείας η αποτροπή της κλοπής των IPTV υπηρεσιών επιτυγχάνεται με την κρυπτογράφηση των ροών δεδομένων μεταξύ του CMTS και του cable modem. Αυτό επιτυγχάνεται από τη DOCSIS 1.0 προδιαγραφή μέσω της χρήσης του BPI (Baseline Privacy Plus) σχήματος, από τις 1.1 και 2.0 εκδόσεις του DOCSIS μέσω του BPI+ σχήματος ενώ το DOCSIS 3.0 εισάγει κάποιες βελτιώσεις στο BPI το οποίο ονομάζεται SEC (Security) [8]. το οποίο απαρτίζεται από δύο πρωτόκολλα, ένα πρωτόκολλο ενθυλάκωσης και ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού. Το πρωτόκολλο ενθυλάκωσης κρυπτογραφεί τα πακέτα που προορίζονται για τους IPTV και τους triple-play συνδρομητές. Επιπλέον χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση πληροφοριών που σχετίζονται με το DHCP πρωτόκολλο καθώς και των διάφορων μηνυμάτων διαχείρισης που μεταφέρονται μέσω του MAC επιπέδου. Το πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού του BPI σχήματος δεν επικυρώνει τα cable modems σε αντίθεση με το BPI+ το οποίο υποστηρίζει την επικύρωση με τη χρήση των ψηφιακών πιστοποιητικών [8]. Το πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού το οποίο υποστηρίζει την ασφαλή διανομή των στοιχείων διαμόρφωσης (keying data) μεταξύ των cable modems και του CMTS ονομάζεται BPKM (Baseline Privacy Key Management) και παρέχει ψηφιακά πιστοποιητικά και αλγόριθμους κρυπτογράφησης του δημόσιου κλειδιού. Τα BPI και BPI+ σχήματα υποστηρίζουν τον 56-bit DES αλγόριθμο κρυπτογράφησης ενώ ο SEC υποστηρίζει τον 128 bit AES (Advanced Encryption Standard) αλγόριθμο κρυπτογράφησης [8]. Τα μηνύματα διαχείρισης στα οποία προαναφερθήκαμε χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών του BPKM πρωτοκόλλου. Ωστόσο ένα δίκτυο DOCSIS δεν είναι αρκετά ασφαλές όταν το CMTS παραμετροποιείται ώστε να είναι συμβατό με τα modems που χρησιμοποιούνταν στις προηγούμενες εκδόσεις του DOCSIS 1.1 [8].

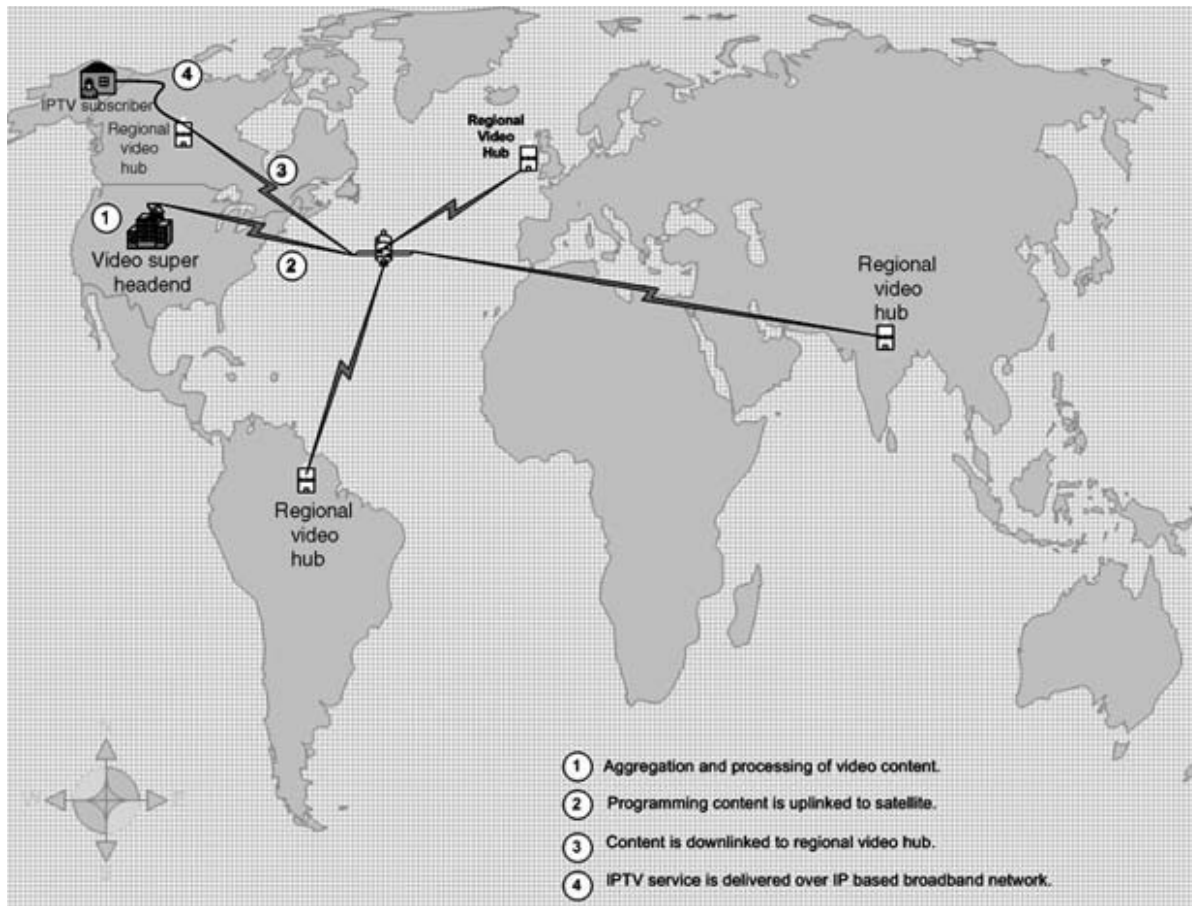
Η κύρια διαφορά του EuroDOCSIS από το DOCSIS είναι η πρόσβαση των set-top boxes σε κανάλια εύρους ζώνης 8 MHz έναντι των 6 MHz από το DOCSIS παρέχοντας υπηρεσίες με περίπου 33% περισσότερο εύρος ζώνης.

#### **3.7.4 IPTV διαμέσου δορυφορικών δικτύων**

Το υψηλότερο εύρος ζώνης των δορυφορικών συνδέσεων σε σχέση με αυτό των επίγειων μέσων μετάδοσης τις καθιστούν ως μία από τις πιθανές επιλογές για τη μετάδοση triple play υπηρεσιών.

Οι προμηθευτές των δορυφορικών δικτύων λαμβάνουν το αρχικό περιεχόμενο το οποίο εν συνεχεία κωδικοποιείται και κρυπτογραφείται στο κέντρο λειτουργιών του διαχειριστή του δορυφόρου (video super headend) και κατόπιν αποστέλλεται σε ένα δορυφόρο. Ο δορυφόρος επικοινωνεί με έναν επίγειο σταθμό που ονομάζεται video hub (σχήμα 3.7) το οποίο βρίσκεται στο IPTV data center. Τα video hubs χρησιμοποιούνται από τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών όπου κατόπιν με τη χρήση της δικής τους δικτυακής υποδομής προβαίνουν στη διανομή των IPTV υπηρεσιών στους συνδρομητές τους [1]. Το video hub διαθέτει επίσης μία εξωτερική μονάδα (Outdoor Unit - ODU) η οποία είναι ένα «πιάτο» για τη λήψη και τη μετάδοση των σημάτων μεταξύ του δορυφόρου και των modems των συνδρομητών.

Όσον αφορά την απευθείας μετάδοση των IPTV υπηρεσιών (χωρίς τη μεσολάβηση των παρόχων) ο συνδρομητής θα πρέπει να διαθέτει μια εσωτερική μονάδα (Indoor Unit - IDU). Η εσωτερική αυτή μονάδα είναι ένα satellite modem για τη διασύνδεση της ODU («πιάτου») του συνδρομητή με το υβριδικό satellite set-top box, το VoIP τηλέφωνο και τον Η/Υ του. Τα satellite modems είναι συμβατά με το DVB-RCS (Digital Video Broadcast, Receive Channel via Satellite) πρότυπο το οποίο μέσω ενός καναλιού επιστροφής επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία. Η χρήση του DVB-RCS επιτρέπει τη χρήση του ίδιου πιάτου για τη μετάδοση τόσο των απλών συμβατικών δορυφορικών καναλιών όσο και για τη μετάδοση των IPTV καναλιών [10].



Σχήμα 3.7 IPTV διανομή μέσω δορυφόρων [1]

### 3.7.5 IPTV διαμέσου ασύρματων τεχνολογιών

Τα νέα ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα παρέχουν μια εναλλακτική πλατφόρμα μετάδοσης IPTV υπηρεσιών. Οι διαθέσιμες επιλογές περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους.

#### 3.7.5.1 Fixed & mobile WiMAX

Στο σταθερό WiMAX προτιμούνται οι αδειοδοτούμενες ζώνες συχνότητας για τη μετάδοση IPTV εφαρμογών πραγματικού χρόνου εξαιτίας των μικρών παρεμβολών που υφίσταται η συγκεκριμένη ασύρματη τεχνολογία. Στο φυσικό επίπεδο το OFDMA αποτελεί ιδανική επιλογή εξαιτίας της υποκαναλοποίησης στην άνω ζεύξη ενώ στο υπόστρωμα ασφαλείας του MAC επιπέδου διαχειρίζεται την επικύρωση των IPTV συνδρομητών και την κρυπτογράφηση του τηλεοπτικού



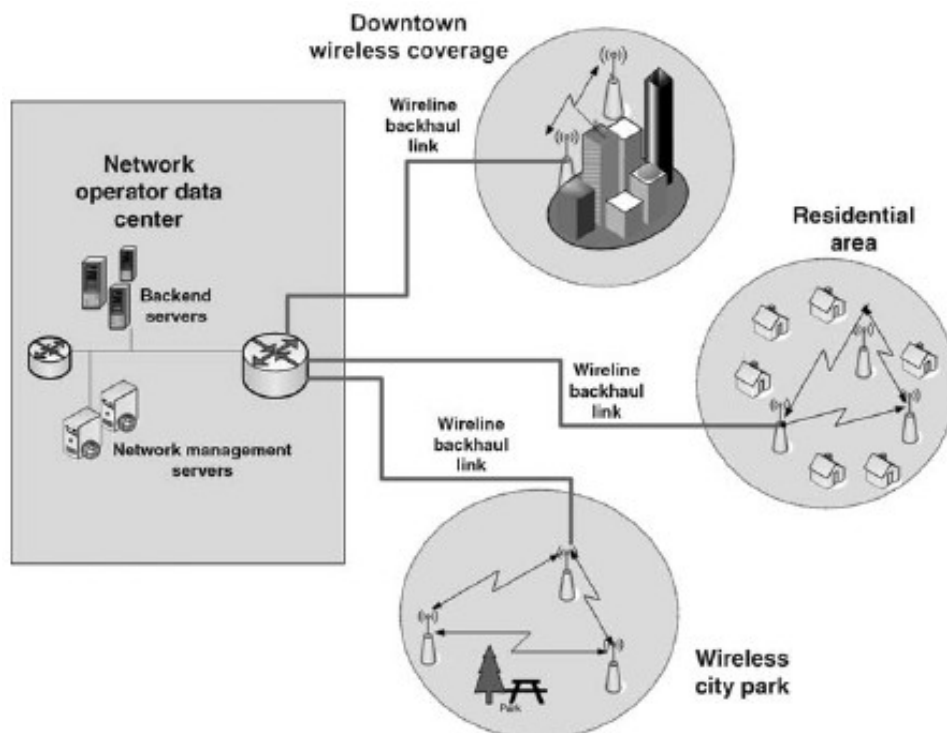
περιεχομένου. Οι γεωγραφικές τοπολογίες σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες όπως οι προδιαγραφές του εξοπλισμού και οι καιρικές συνθήκες μπορεί να έχουν επίδραση στην επικοινωνία μεταξύ ενός IPTVCD και ενός WiMAX σταθμού βάσης. Το WiMAX έχει μια θεωρητική μέγιστη ταχύτητα της τάξης των 60 Mbps σε μια περιοχή κάλυψης 6-10 χιλιομέτρων ανάλογα με τις υλοποιήσεις και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Οι τιμές αυτές επιτρέπουν στους συνδρομητές να έχουν πρόσβαση στις IPTV υπηρεσίες στις περιοχές όπου καλύπτονται από το Wimax.

Το mobile WiMAX περιλαμβάνει διάφορα χαρακτηριστικά τα οποία είναι απαραίτητα για τη διανομή IPTV υπηρεσιών και εφαρμογών. Η τεχνολογία αυτή παρέχει ρυθμούς μετάδοσης μεγέθους 32-46 Mbps. Εάν αυτές οι ταχύτητες χρησιμοποιηθούν σωστά επιτρέπουν τη μετάδοση συμπιεσμένου IP περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας σε κινητούς δέκτες. Η χρήση του OFDMA και των μεταπομπών επιτρέπει τη διανομή multicast καναλιών στους συνδρομητές, σε γεωγραφικές περιοχές που είναι ευπαθείς στην επίδραση της πολυδιόδευσης. Το mobile WiMAX ενσωματώνεται με το IMS, το οποίο απλοποιεί την αλληλεπίδραση μεταξύ των IPTV εφαρμογών και των άλλων IP υπηρεσιών όπως η υψηλών ταχυτήτων πρόσβαση στο Internet και το VoIP. Το IMS αποτελεί μία αρχιτεκτονική η οποία επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύων την επιτάχυνση και την απλοποίηση των IP υπηρεσιών. Τέλος το mobile WiMAX παρέχει αυξημένο επίπεδο υποστήριξης ποιότητας υπηρεσιών (advanced QoS), χαρακτηριστικό ωφέλιμο για IPTV εφαρμογές πραγματικού χρόνου [1].

### **3.7.5.2 Ασύρματα δημοτικά δίκτυα βρόχου**

Τα ασύρματα δημοτικά δίκτυα βρόχου (Wireless Municipal Mesh Networks) είναι μία ακόμη ασύρματη πλατφόρμα που υπόσχεται τη διανομή των IPTV υπηρεσιών. Ένας μεγάλος αριθμός αυτών αυτού του τύπου δικτύων έχει δημιουργηθεί σε πάρα πολλές πόλεις ανά τον κόσμο. Λειτουργούν σε υπαίθριο περιβάλλον είτε στην «ελεύθερη» ζώνη των 2.4 GHz είτε στα 5 Ghz. Το Wi-Fi είναι η τεχνολογία που επιλέχθηκε για τη δημιουργία αυτών των δικτύων εξαιτίας του ότι οι περισσότεροι φορητοί Η/Υ κατασκευάζονται με ενσωματωμένες Wi-Fi διεπαφές. Η κατασκευή των Wi-Fi δικτύων σε υπαίθριο περιβάλλον απαιτεί τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού access points συνδεδεμένων μεταξύ τους αλλά και

συνδεδεμένων μέσω μιας ενσύρματης σύνδεσης (wired backhaul connectivity) η οποία παρέχει τη συνδεσιμότητα με τον πάροχο των ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η ενσύρματη backhaul σύνδεση απαιτείται για την επικοινωνία με το IP κέντρο δεδομένων και στη συνέχεια με το Internet. Συνήθως χρησιμοποιείται η VLAN (virtual LAN) τεχνολογία για το διαχωρισμό των υπηρεσιών όπως συμβαίνει με τους δρομολογητές στα LANs δίκτυα. Τα mesh access points τα οποία χρησιμοποιούνται από τα δημοτικά δίκτυα καλύπτουν μία πολύ μεγάλη έκταση σε σχέση με τα συμβατικά εσωτερικά access points και συνήθως είναι συνδεδεμένα σε σταθερές φυσικές κατασκευές όπως είναι οι στύλοι φωτοδότησης, τα ψηλά κτήρια και οι πύργοι τηλεπικοινωνιών έτσι ώστε να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ τους. Το κόστος της σύνδεσης των mesh access points σε ένα κεντρικό σημείο με τη χρήση κάποιου τύπου φυσικής καλωδίωσης είναι συνήθως απαγορευτικό και έτσι διασυνδέονται μεταξύ τους. Ένας από τους κόμβους με τους οποίους διασυνδέονται είναι ο gateway AP. Το gateway AP λαμβάνει όλα τα σήματα από τα υπόλοιπα mesh access points και συνδέεται μέσω Ethernet στη backhaul σύνδεση (σχήμα 3.8). Οι δύο κατηγορίες access points που συναντώνται σε αυτόν τον τύπο δικτύων είναι τα Single Wi-Fi radio-mesh APs τα οποία διαθέτουν ένα κανάλι επικοινωνίας και τα Dual Wi-Fi radio-mesh APs τα οποία διαθέτουν δύο



Σχήμα 3.8 Αρχιτεκτονική ασύρματου δημοτικού δικτύου βρόχου [1]

κανάλια επικοινωνίας και άρα είναι καταλληλότερα για time-sensitive εφαρμογές όπως η IPTV.

- **Single Wi-Fi radio-mesh APs** Αυτός ο τύπος κάνει χρήση ενός μόνου καναλιού για την υποστήριξη πρόσβασης συσκευών χρηστών πολλαπλών τύπων, καθώς και για τη μεταφορά της κίνησης από και προς το δίκτυο βρόχου. Για την ελαχιστοποίηση των περιορισμών που προκύπτουν και τη αύξηση της αποδοτικότητας αυτά τα APs ομαδοποιούνται σε σύνολα (clusters) με κάθε σύνολο να λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες από ένα γειτονικό του.
- **Dual Wi-Fi radio-mesh APs** Ο τύπος αυτός χρησιμοποιεί διαφορετικά κανάλια για τη μεταφορά της κίνησης βρόχου, αλλά και για την πρόσβαση στις Wi-Fi συσκευές χρηστών, στη 2.4 GHz ζώνη συχνοτήτων. Η χρήση δύο διαφορετικών καναλιών με το καθένα να έχει διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας προσφέρει αυξημένα επίπεδα απόδοσης και μειωμένα επίπεδα καθυστέρησης, κάτι το οποίο καθιστά τα dual channel APs καταλληλότερα για την μεταφορά IPTV εφαρμογών πραγματικού χρόνου.

Η μέση ταχύτητα κάτω ζεύξης περιορίζεται στο 1 Mbps, η οποία είναι αρκετή για τη χρήση εφαρμογών διαδικτύου ωστόσο όμως δεν επαρκεί για τη διανομή IPTV υπηρεσιών με αποτέλεσμα η χρήση αυτών των δικτύων να περιορίζεται στη μετάδοση IPTV περιεχομένου από Wi-Fi κάμερες.

### 3.7.5.3 3G τεχνολογίες δικτύου

Τα 3G κινητά δίκτυα όπως το EV-DO και το HSDPA είναι ικανά για τη μετάδοση κινητών IPTV υπηρεσιών, με το EV-DO να υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως 4.9 Mbps και το HSDPA έως 14 Mbps. Αν και τα δίκτυα αυτά δεν αποτελούν την ιδανική πλατφόρμα μετάδοσης IPTV υπηρεσιών επιτρέπουν τη διανομή αυτών σε συνδρομητές που ζουν σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται επαρκώς από τα DSL ή τα ευρυζωνικά καλωδιακά συστήματα [1].

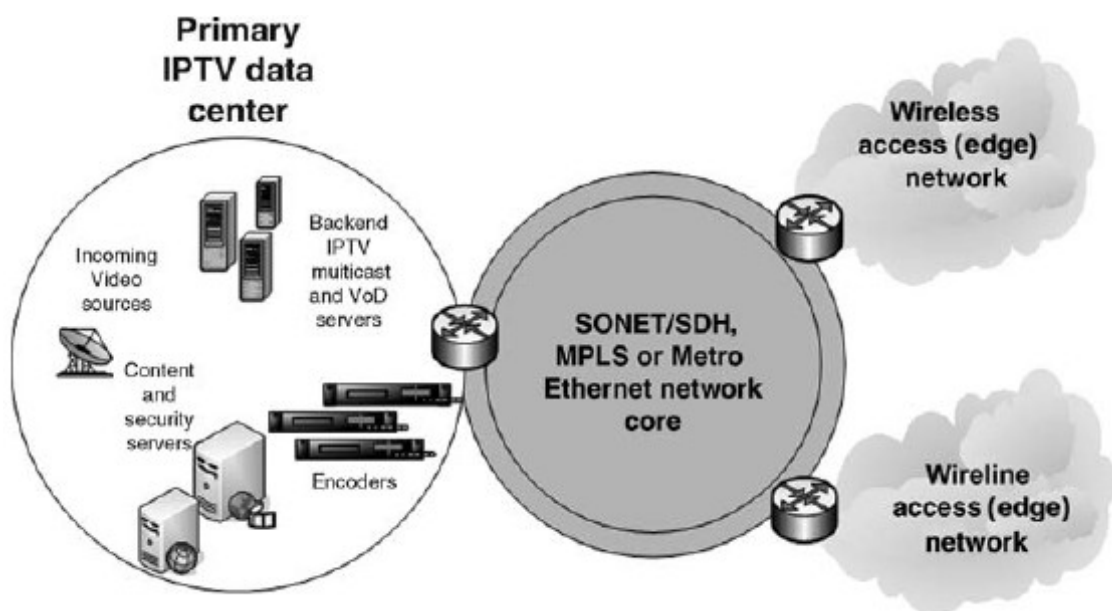
### 3.8 Τεχνολογίες πυρήνα δικτύου IPTV

Ο πυρήνας (core/backbone) ενός IPTV δικτύου επωμίζεται τη διανομή τηλεοπτικού περιεχομένου μεγάλου όγκου μεταξύ του IPTV data center και του last mile δικτύου διανομής σε υψηλές ταχύτητες (σχήμα 3.9). Το μέρος αυτού του δικτύου χρησιμοποιεί διάφορα πρότυπα τα οποία στοχεύουν στην πολυδιόδευση (multipath) και την προστασία της σύνδεσης για να εξασφαλιστεί η υψηλή αξιοπιστία του. Κάθε ένα από αυτά τα πρότυπα προσφέρει διαφορετική εξελισιμότητά (scalability) και ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι τεχνολογιών μετάδοσης που χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα ενός IPTV δικτύου είναι οι εξής:

- ATM και SONET/SDH
- IP και MPLS
- Metro Ethernet

#### 3.8.1 ATM και SONET/SDH

Η ATM τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων υλοποιείται ως ένα πρωτόκολλο δικτύου το οποίο μπορεί να υποστηρίξει τη διανομή των απαιτητικών σε εύρος ζώνης IPTV εφαρμογών με χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης. Το ATM βρίσκεται



Σχήμα 3.9 Υποδομή IPTV δικτύου πυρήνα [1]

εφαρμογή σε δίκτυα ομοαξονικών και συνεστραμμένων καλωδίων αλλά η εφαρμογή του προτιμάται στα δίκτυα οπτικών ινών λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων που επιτυγχάνει. Το SONET είναι ένα πρωτόκολλο για την υψηλών ταχυτήτων μετάδοση μέσω οπτικών ινών και χρησιμοποιείται στις περιοχές των ΗΠΑ και του Καναδά. Το SDH (Synchronous Digital Hierarchy) είναι ένα πρωτόκολλο αντίστοιχο του SONET για τη μετάδοση σε δίκτυα οπτικών ινών σε περιοχές εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών. Το SONET/SDH επιλέγεται για τη μεταφορά των ATM frames. Συνεπώς κατά μία έννοια δεν αποτελεί πρωτόκολλο επικοινωνίας αλλά πρωτόκολλο μεταφοράς. Με το SONET/SDH η σύνθετη δομή του ATM αντικαθίσταται από ένα μεγάλο frame στο οποίο τοποθετούνται τα ATM frames [12]. Το SONET χρησιμοποιεί πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (TDM) για την ταυτόχρονη αποστολή των ροών δεδομένων. Οι SONET συσκευές λαμβάνουν έναν αριθμό ροών δεδομένων τις οποίες συνδυάζουν σε μία ενιαία εξερχόμενη ροή την οποία εν συνεχεία αποστέλλουν στο δίκτυο οπτικών ινών. Ο ρυθμός μετάδοσης της εξερχόμενης ροής είναι ίσος με το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης των εισερχόμενων ροών στο SONET εξοπλισμό [1].

### **3.8.2 IP και MPLS**

Το IP δε σχεδιάστηκε εξ' αρχής για την υποστήριξη QoS μηχανισμών, ούτε για το διαχωρισμό της κυκλοφορίας των δεδομένων ανάλογα με τον τύπο τους (βίντεο, ήχος, δεδομένα). Ωστόσο το IP μπορεί να υποστηρίξει επαρκώς τη μετάδοση διάφορων υπηρεσιών τις παραπάνω λειτουργίες όταν συνδυαστεί με την MPLS (Multiprotocol Label Switching) τεχνολογία [1]. Όπως δείχνει το σχήμα 3.11 μια MPLS πλατφόρμα χρησιμοποιεί δρομολογητές μεταγωγής ετικέτας (Label Switch Routers - LSRs). Αυτό οι δρομολογητές είναι αρμόδιοι για την εγκαθίδρυση connection-oriented μονοπατιών συγκεκριμένου προορισμού στο IPTV δίκτυο. Αυτά τα εικονικά μονοπάτια αποκαλούνται LSPs (Label Switched Paths) και παραμετροποιούνται με τη χρήση πολλών πόρων για την ομαλή μεταφορά των IPTV δεδομένων στο MPLS. Η χρήση των LSPs απλοποιεί και επιταχύνει τη δρομολόγηση των πακέτων στο δίκτυο, επειδή ο έλεγχος των πακέτων γίνεται μόνο κατά την είσοδο τους στο δίκτυο χωρίς να απαιτείται περαιτέρω έλεγχος κατά τη μετάβαση από τον ένα δρομολογητή στον άλλο. Μια άλλη κύρια λειτουργία των

LSRs είναι ο προσδιορισμός του τύπου της κίνησης στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη μιας MPLS κεφαλίδας στην αρχή κάθε IPTV πακέτου. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.11 η κεφαλίδα προστίθεται το LSR εισόδου και αφαιρείται από το LSR εξόδου, καθώς εξέρχεται από το MPLS δίκτυο. Καθώς το IPTV περιεχόμενο διασχίζει τους MPLS δρομολογητές, δημιουργείται ένας αριθμός τοπικών πινάκων που ονομάζονται LIBs (Label Information Bases) και χρησιμοποιούνται για να παίρνονται οι αποφάσεις της δρομολόγησης των πακέτων. Ένα άλλο πλεονέκτημα των MPLS δικτύων είναι η ανθεκτικότητα τους κατά την εμφάνιση σφαλμάτων [1].

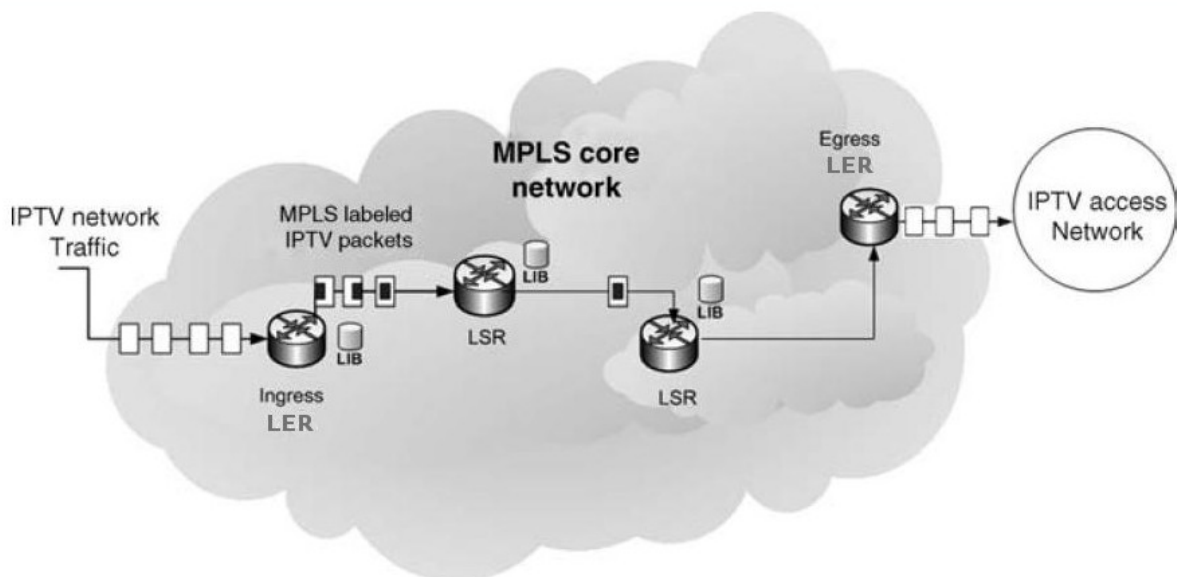
Το IP δε σχεδιάστηκε εξ' αρχής για την υποστήριξη QoS μηχανισμών ούτε για το διαχωρισμό της κυκλοφορίας των δεδομένων ανάλογα με τον τύπο τους (βίντεο, ήχος, δεδομένα). Ωστόσο μπορεί να υποστηρίξει επαρκώς τις παραπάνω λειτουργίες όταν συνδυαστεί με την MPLS (Multiprotocol Label Switching) τεχνολογία [1].

Το MPLS λειτουργεί μεταξύ του δευτέρου και του τρίτου επιπέδου του OSI μοντέλου, σε οποιοδήποτε μέσο μεταφοράς δημιουργώντας εικονικές συνδέσεις μεταξύ των απομακρυσμένων κόμβων. Τα layer 2-3 πρωτόκολλα εικονικών συνδέσεων όπως είναι το MPLS είναι connection oriented που σημαίνει ότι μια ακολουθία πακέτων μεταδίδεται πάντα μέσω της ίδια διαδρομής στο δίκτυο (δηλαδή μέσω των ίδιων κόμβων). Αυτή η διαδρομή ονομάζεται μονοπάτι μεταγωγής ετικέτας (Label Switch Path - LSP) και προσδιορίζεται από την τοποθέτηση στα πακέτα μιας MPLS κεφαλίδας. Η κεφαλίδα περιέχει μία ή περισσότερες ετικέτες και ονομάζεται label stack. Οι ετικέτες αυτές περιέχουν πληροφορίες όπως την τιμή της ετικέτας και την QoS προτεραιότητα και τον τύπο της κίνησης. Έτσι με την εξέταση του περιεχομένου των ετικετών η δρομολόγηση σε ένα MPLS δίκτυο είναι γρηγορότερη καθώς εξετάζεται μόνο η ετικέτα των πακέτων και όχι η IP διεύθυνση του πίνακα δρομολόγησης τους σε κάθε δρομολογητή για να αποφασιστεί ποιος είναι ο επόμενος κόμβος στον οποίο θα προωθήσει το πακέτο. Επιπλέον η εξέταση του περιεχομένου των ετικετών επιτρέπει τη λειτουργία του δικτύου ανεξάρτητα από το ποια τεχνολογία δευτέρου επιπέδου χρησιμοποιείται ενθυλακώνοντας έτσι πακέτα διάφορων πρωτοκόλλων (ATM, frame relay, SONET, Ethernet). Συνεπώς οι συνδρομητές με διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης μπορούν να συγκεντρωθούν κάτω από την ίδια MPLS

πλατφόρμα χωρίς να χρειαστεί να αλλάξουν την τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Οι δρομολογητές εισόδου και εξόδου σε ένα MPLS δίκτυο ονομάζονται LER (Label Edge Router) δρομολογητές (σχήμα 3.10) και τοποθετούν μία MPLS ετικέτα στο εισερχόμενο πακέτο την οποία κατόπιν αφαιρούν καθώς αυτό εξέρχεται από το δρομολογητή. Η ανάθεση της ετικέτας στον LER δρομολογητή κατά την είσοδο των πακέτων στο δίκτυο περιέχει επίσης και τη source IP διεύθυνση. Οι ενδιάμεσοι δρομολογητές οι οποίοι εκτελούν τη δρομολόγηση βασιζόμενοι σε αυτή την ετικέτα ονομάζονται LSR (Label Switch Router) δρομολογητές.

### 3.8.3 Metro Ethernet

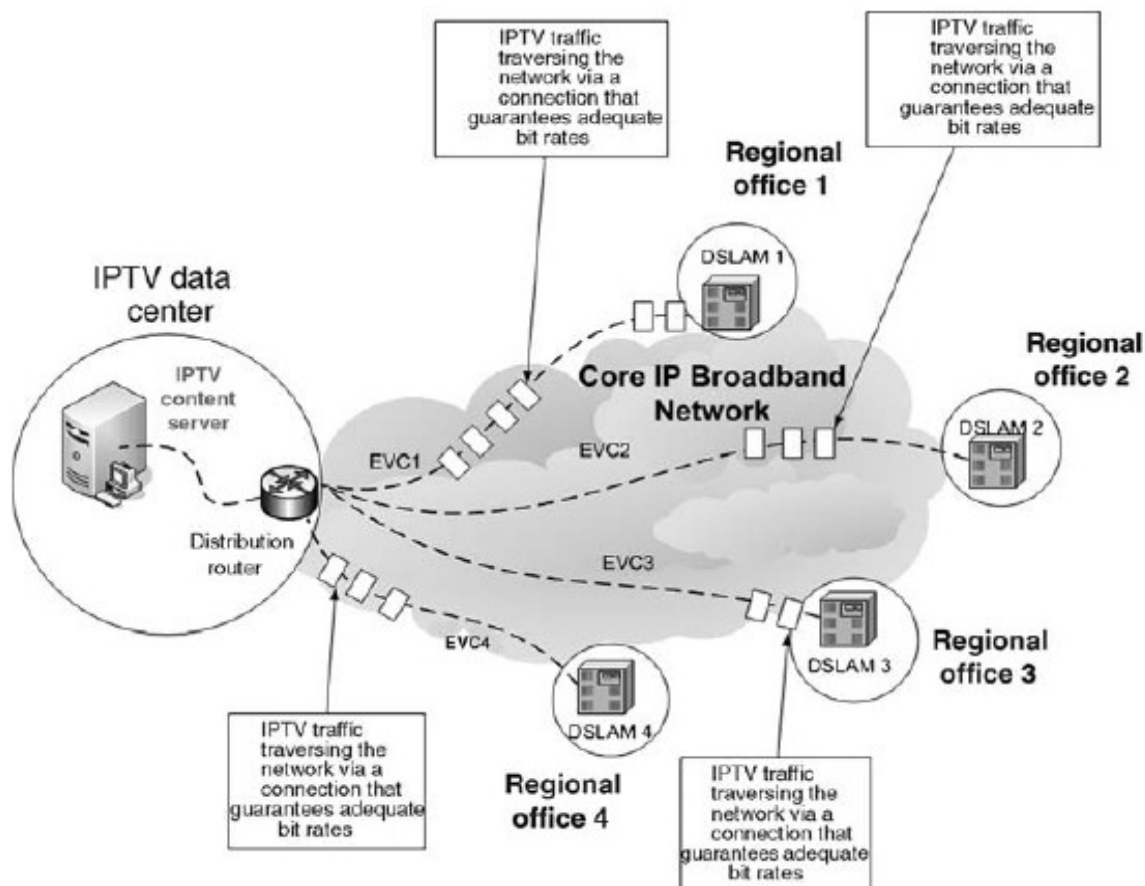
Μία ακόμη τεχνολογία που μπορεί χρησιμοποιηθεί από ένα δίκτυο πυρήνα είναι το Metro Ethernet το οποίο βασίζεται στο Ethernet και προορίζεται για μητροπολιτικά δίκτυα. Το Metro Ethernet Forum (MEF) είναι μια ένωση φορέων παροχής υπηρεσιών, προμηθευτών εξοπλισμού καθώς και άλλων διακεκριμένων επιχειρήσεων στον τομέα των δικτύων, αρμόδια για την καθιέρωση των προδιαγραφών και την ενσωμάτωση των Ethernet τεχνολογιών



Σχήμα 3.10 MPLS τοπολογία δικτύου πυρήνα [1]

στα υψηλής χωρητικότητας δίκτυα πυρήνα. Το MEF πιστοποιεί επίσης τον Ethernet εξοπλισμό για τη χρήση του στα δίκτυα πυρήνα από τους διάφορους φορείς παροχής υπηρεσιών. Τα κύρια τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του Metro Ethernet εκπληρώνουν τις απαιτήσεις ενός δικτύου πυρήνα ως προς την ανθεκτικότητα, την υψηλή απόδοση και την επεκτασιμότητα. Αποτελεί οικονομικότερη λύση συγκριτικά με το SONET/SDH και μπορεί να συνδεθεί εύκολα σε ένα συνδρομητικό δίκτυο λόγω της τάσης που επικρατεί στα εταιρικά και στα οικιακά δίκτυα να χρησιμοποιούν το Ethernet [13]. Επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης έως 100 Gbps κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων καθιστώντας ιδανική τη μετάδοση IPTV υπηρεσιών στα διάφορα διασκορπισμένα γεωγραφικά κέντρα (regional offices). Προσφέρει ένα μηχανισμό αποκατάστασης του δικτύου σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας του παρέχοντας έτσι την απρόσκοπτη λειτουργία των IPTV υπηρεσιών. Επιπλέον τα μικρά ποσοστά καθυστέρησης και απώλειας πακέτων το καθιστούν ιδανική τεχνολογία δικτύου για τη μετάδοση αυτών των υπηρεσιών. Η τεχνολογία του Metro Ethernet υποστηρίζει τη χρήση connection orientated εικονικών συνδέσεων κυκλωμάτων (virtual connection orientated) για τη διανομή υψηλής ποιότητας βίντεο περιεχομένου στο δίκτυο πυρήνα. Αυτά τα εικονικά κυκλώματα καλούνται και Ethernet εικονικές συνδέσεις (Ethernet Virtual Connections - EVCs) μεταξύ του IPTV κέντρου δεδομένων και των regional offices (σχήμα 3.11).





Σχήμα 3.11 Χρήση Ethernet εικονικών συνδέσεων για τη διασύνδεση κατά μήκος του δικτύου πυρήνα [1]

### 3.9 Παράγοντες δικτύου που επηρεάζουν την ανάπτυξη της IPTV

Οι παράγοντες που θα πρέπει να εξεταστούν πριν προωθηθούν οι IPTV υπηρεσίες στο εμπόριο είναι:

- **Το μέγεθος του δικτύου.** Το συνολικό εύρος ζώνης που απαιτείται για την παροχή των IPTV υπηρεσιών εξαρτάται από τον αριθμό των προσφερόμενων multicast καναλιών. Συνήθως ένα SD κανάλι σε συνδυασμό με την H.264 τεχνική συμπίεσης απαιτεί εύρος ζώνης τουλάχιστον 2 Mbps. Ωστόσο αυτή η απαίτηση εύρους ζώνης μπορεί να μειωθεί με τη χρήση της IGMP snooping τεχνικής. Οι διαστάσεις του δικτύου περιπλέκονται περαιτέρω στην περίπτωση που παρέχονται και VoD υπηρεσίες οι οποίες αποτελούν unicast εφαρμογές η υποστήριξη των οποίων απαιτεί υψηλό εύρος ζώνης συνήθως πολλαπλάσιο από αυτό που απαιτείται για την υποστήριξη VoIP υπηρεσιών και υπηρεσιών διαδικτύου.

- **Η αξιοπιστία.** Η υποδομή ενός IPTV δικτύου πρέπει να είναι αξιόπιστη έτσι ώστε η διανομή των IPTV υπηρεσιών να μη μπορεί να διακοπεί από ένα ενδεχόμενο σφάλμα κάποιας συσκευής στην περίπτωση μιας unicast ή μιας multicast εφαρμογής. Για αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη εφεδρικών συνδέσεων ώστε να μπορούν χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε χρειαστούν.
- **Η γρήγορη απόκριση.** Το δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει τους ελάχιστους δυνατούς χρόνους απόκρισης έτσι ώστε η μετάβαση από το ένα κανάλι στο άλλο να είναι άμεση χωρίς χρονικές καθυστερήσεις.
- **Η πρόβλεψη επίδοσης.** Οι διαχειριστές των IPTV υπηρεσιών πρέπει να ορίζουν τους κατάλληλους πόρους δικτύου όσο δύσκολη και αν είναι η πρόβλεψη των απαιτήσεων της διανομής ενός βίντεο και ειδικά όταν πρόκειται για βίντεο πραγματικού χρόνου έτσι ώστε ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (video bit rate) των πιο σύνθετων σκηνών του βίντεο να είναι μικρότερος ή ίσος του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζει το μέσο διανομής.
- **Το επίπεδο QoS.** Βάσει του γεγονότος ότι οι περισσότερες IPTV υπηρεσίες προσφέρονται μέσω ενός ιδιωτικού ευρυζωνικού δικτύου με τους χρήστες να επιβαρύνονται με κάποια συνδρομή, είναι απαραίτητη η επιβολή κάποιας πολιτικής όσον αφορά την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η επιβολή QoS μηχανισμών συντηρεί το τηλεοπτικό σήμα και μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων κατά τη διαβίβαση του σε μεγάλες αποστάσεις ή κατά την πολυεκπομπή. Ένα QoS σύστημα περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές δικτύου και υποστηρίζει πρωτόκολλα τα οποία εγγυώνται στους IPTV συνδρομητές υψηλού επιπέδου ποιότητα τηλεθέασης [1].

### 3.10 Πραγματικόχρονη κωδικοποίηση

Πριν την ανάλυση της διαδικασίας της κωδικοποίησης είναι χρήσιμη η κατανόηση των διαδικασιών που συμβαίνουν πριν πριν από αυτή. Η πρώτη διαδικασία είναι αυτή της καταγραφής του βίντεο με μια κάμερα σε αναλογική μορφή. Η δεύτερη διαδικασία είναι αυτή της ψηφιοποίησης του αναλογικού σήματος. Η ψηφιοποίηση γίνεται με τη βοήθεια ενός ψηφιακού μετατροπέα (Analog to Digital / AD

converter). Κατά την επεξεργασία του σήματος εφαρμόζονται οι τεχνικές της δειγματοληψίας (sampling) και της κβαντοποίησης (quantization). Η δειγματοληψία αναφέρεται στον αριθμό των δειγμάτων που λαμβάνονται από το εισερχόμενο αναλογικό σήμα ανά δευτερόλεπτο ενώ η κβαντοποίηση είναι το δεύτερο μέρος της διαδικασίας μετατροπής και περιλαμβάνει την ανάθεση ενός αριθμού bits κομματιών για κάθε δείγμα σήματος που λαμβάνεται. Μετά και από αυτή τη διαδικασία το ασυμπιεστο ψηφιακής μορφής πλέον βίντεο είναι έτοιμο για κωδικοποίηση. Η κωδικοποίηση των ψηφιοποιημένων bit ροών απαιτεί τη χρήση ειδικών συσκευών που ονομάζονται κωδικοποιητές και γίνεται στο IPTV κέντρο δεδομένων.

Στα πλεονεκτήματα της κωδικοποίησης συγκαταλέγονται ο μειωμένος αποθηκευτικός χώρος που απαιτείται για τα αρχεία των video, η μειωμένη απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς καθώς το συμπιεσμένο βίντεο απαιτεί λιγότερες οδηγίες από τον επεξεργαστή για την προβολή του αλλά και ο χρόνος μικρότερος χρόνος μετάδοσης που απαιτείται. Επίσης η χρήση των IPTV υπηρεσιών είναι πλέον εφικτή και μέσω ευρυζωνικών συνδέσεων μικρής χωρητικότητας αν αναλογιστεί κανείς πως με τις παλιές μεθόδους συμπίεσης ένα SDTV κανάλι απαιτούσε εύρος ζώνης 3.5 Mbps και ένα HDTV 20 - 25 Mbps ενώ πλέον απαιτούν εύρος ζώνης 1.5 και 8 Mbps αντιστοίχως. Στα μειονεκτήματα της διαδικασίας της κωδικοποίησης συγκαταλέγονται οι καθυστερήσεις που εισάγονται από τις τεχνικές συμπίεσης και αποσυμπίεσης των σημάτων καθώς και η χαμηλότερη ποιότητα της εικόνας λόγω της απώλειας κάποιων πληροφοριών κατά τη συμπίεση έναντι αυτής των ασυμπιεστων σημάτων [1].

### **3.10.1 MPEG συμπίεση**

Οι μέθοδοι συμπίεσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τη συμπίεση χωρίς απώλειες (lossless compression) και τη συμπίεση με απώλειες (lossy compression). Η συμπίεση χωρίς απώλειες επιτρέπει σε μια IPTVCD την ακριβή επαναδημιουργία της εικόνας στην οθόνη χωρίς απώλειες στην ποιότητα της εξαιτίας της συμπίεσης και της μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει σπάνια μιας και όλοι οι αλγόριθμοι συμπίεσης προκαλούν απώλειες κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης με αποτέλεσμα αυτοί οι αλγόριθμοι να χρησιμοποιούνται κυρίως

για την κωδικοποίηση εικόνων και όχι real time περιεχομένου. Οι σύγχρονοι αλγόριθμοι συμπίεσης με απώλειες διασφαλίζουν ότι κατά τη συμπίεση καταστρέφεται μόνο μία ορισμένη ποσότητα δεδομένων. Στην περίπτωση της συμπίεσης με απώλειες χρησιμοποιούνται κυρίως οι MPEG και VC-1 (Video Codec 1) τεχνικές συμπίεσης. Το ακρώνυμο MPEG προέρχεται από την Moving Pictures Experts Group βιομηχανική ομάδα η οποία αναπτύσσει πρότυπα συμπίεσης για τη μετάδοση βίντεο και εφαρμόζεται στα δορυφορικά, επίγεια και καλωδιακά συστήματα τηλεόρασης. Τα πρότυπα που έχουν συσταθεί από αυτή την ομάδα είναι τα MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4 (Part 2 και 10), MPEG-7 και MPEG-21. Από τους παραπάνω τύπους συμπίεσης οι MPEG-2 και MPEG-4 Part 10 (ή αλλιώς H.264/AVC) τεχνικές είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένες από τους φορείς παροχής υπηρεσιών.

### **3.10.1.1 MPEG-2**

Το MPEG-2 είναι το κυρίαρχο πρότυπο μεταφοράς και κωδικοποίησης το οποίο χρησιμοποιείται για την ψηφιακή συμπίεση σημάτων ήχου και βίντεο. Το MPEG-2 μπορεί να κωδικοποιήσει SDTV ροές με ρυθμούς μετάδοσης 3-15 Mbps και HDTV ροές με ρυθμούς 15-30 Mbps [14].

Το βίντεο στην πιο απλή του μορφή αποτελείται από μια ακολουθία εικόνων κάθε μία από τις οποίες ονομάζεται frame. Σε μια ροή από bits τα frames προσδιορίζονται το καθένα ξεχωριστά από μια κεφαλίδα. Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να παρακολουθήσει σε έναν τηλεοπτικό δέκτη περίπου 25 fps (frames per second). Το πρώτο στάδιο της συμπίεσης περιλαμβάνει τη διαδικασία της υποδειγματοληψίας (subsampling), η οποία μειώνει το μέγεθος του κάθε frame εξαλείφοντας έναν αριθμό από bits με στόχο τη μείωση του εύρους ζώνης που απαιτείται για τη μεταφορά του σήματος. Στο δεύτερο στάδιο της συμπίεσης του βίντεο-σήματος ένα frame διαιρείται σε μπλοκ με 8X8 pixels το καθένα τα οποία αποτελούν τη μικρότερη μονάδα κωδικοποίησης του MPEG αλγορίθμου. Εν συνεχεία εφαρμόζεται ο DCT (Discrete Cosine Transform) αλγόριθμος σε κάθε μπλοκ ξεχωριστά. Ο αλγόριθμος αυτός διαχωρίζει τα μπλοκ μεταξύ τους ανάλογα με τη σπουδαιότητα τους. Τα σημαντικά μπλοκ συντηρούνται για περαιτέρω επεξεργασία ενώ τα υπόλοιπα απορρίπτονται. Τα μπλοκ που ο αλγόριθμος

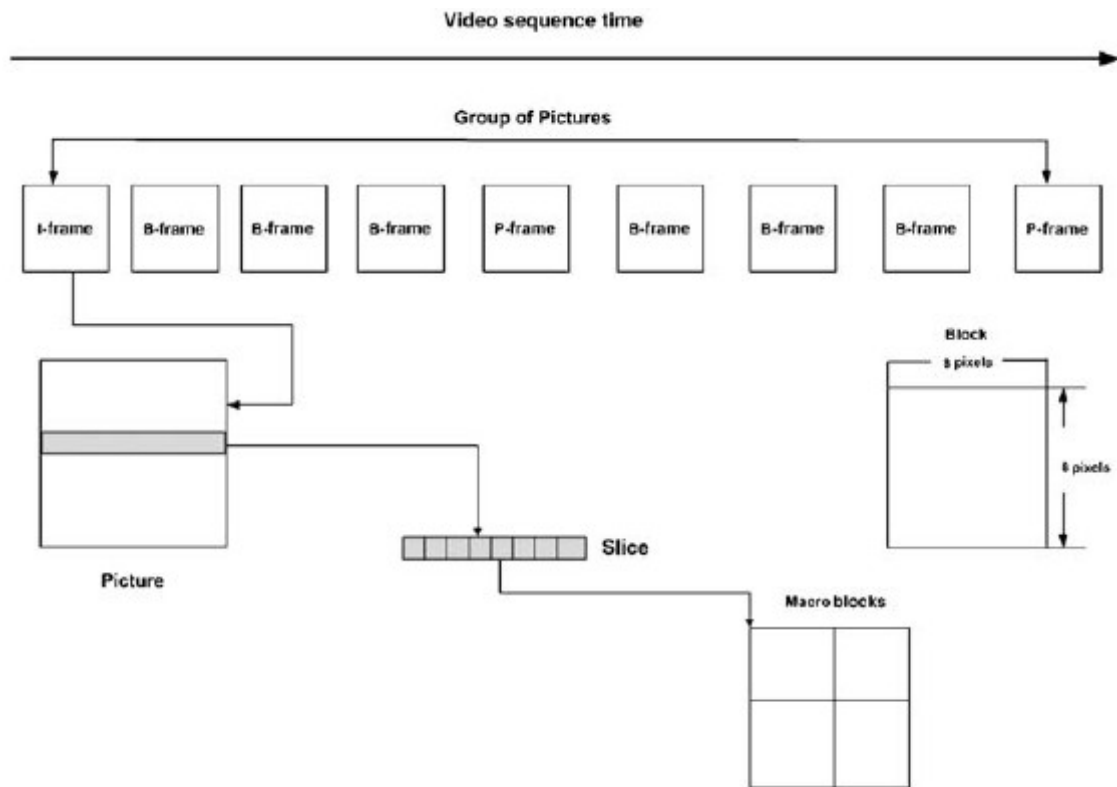
απορρίπτει είναι συνήθως αυτά που το ανθρώπινο μάτι δεν παρατηρεί. Το επόμενο στάδιο της MPEG κωδικοποίησης είναι η κβαντοποίηση. Η κβαντοποίηση αναφέρεται στη μείωση του αριθμού των bits που απαιτούνται για την αναπαράσταση των μπλοκ που περιέχονται σε ένα frame. Εάν το επίπεδο κβαντοποίησης είναι υψηλό, τότε επιτυγχάνονται υψηλότερα ποσοστά συμπίεσης και άρα αφαιρείται ένας μεγάλος αριθμός από pixels. Η υψηλού επιπέδου κβαντοποίηση γίνεται εμφανής στην οθόνη των IPTV συνδρομητών με την υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας. Note that video blockiness is an example of high quantization levels. Αφότου τα blocks έχουν συμπιεσθεί, το MPEG διασπά το frame σε ένα νέο σύνολο από blocks που ονομάζονται macroblocks. Κάθε macroblock αποτελείται από έναν 16X16 πίνακα από pixels. Κατόπιν γίνεται σύγκριση μεταξύ των macroblocks δύο γειτονικών frames και αποστέλλονται μόνο τα macroblocks που διαφέρουν. Αν υπάρχει διαφορά στα τρέχοντα και στα αρχικά blocks του frame τότε η MPEG συμπίεση μετακινεί τα blocks που διαφέρουν σε μια νέα τοποθεσία του τρέχοντος frame. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη μετάδοσης ενός εξολοκλήρου νέου frame, μειώνοντας συνεπώς ουσιαστικά τις απαιτήσεις εύρους ζώνης. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνεται με τους εξής δύο τρόπους:

- **Τη χωρική συμπίεση (spatial compression).** Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στα πλαίσια ενός frame. Στην περίπτωση γειτονικών pixel με όμοιες τιμές, αντί της κωδικοποίησης κάθε μεμονωμένου pixel η χωρική συμπίεση κωδικοποιεί τα γειτονικά pixels που είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Συνεπώς το πλήθος των bits που απαιτείται για τη συμπίεση αυτή είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων μικρότερο αυτού που απαιτείται για τη συμπίεση κάθε pixel ξεχωριστά.
- **Τη χρονική συμπίεση (temporal compression).** Η χρονική συμπίεση αναφέρεται στη μείωση των bits μεταξύ των διαδοχικών frames. Συγκεκριμένα κωδικοποιούνται μόνο οι αλλαγές που συμβαίνουν μεταξύ διαδοχικών frames καθώς συχνά ένα μεγάλο μέρος των pixels παραμένει το ίδιο μεταξύ αυτών των frames όπως είναι για παράδειγμα η απεικόνιση ενός τοίχου επί 30 frames συνεχόμενα. Για παράδειγμα αν μια πληροφορία (για παράδειγμα η απεικόνιση ενός τοίχου) απεικονίζεται επί 30 συνεχόμενα frames, δηλαδή για περισσότερο από 1 δευτερόλεπτο η χρονική συμπίεση στέλνει μόνο τις πληροφορίες για τις προβλέψεις των κινήσεων μεταξύ των frames. Στην περίπτωση τοίχου, η πρόβλεψη κινήσεων είναι μηδέν.

Το επόμενο στάδιο της MPEG συμπίεσης είναι η κωδικοποίηση των macroblocks σε οριζόντιες λωρίδες (slices) εικόνων από τα αριστερά προς τα δεξιά. Ο συνδυασμός των slices μας δίνει την εικόνα με κάθε slice να κωδικοποιείται ξεχωριστά για τον περιορισμό των σφαλμάτων. Οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων που προαναφέραμε απεικονίζονται στο σχήμα 3.12. Το MPEG πρότυπο καθορίζει τρία είδη εικόνων οι οποίες είναι οι:

- **Intra-frames (I-frames).** Οι τεχνικές συμπίεσης εκτελούνται στις πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο τρέχον frame και όχι σε οποιοδήποτε άλλο frame της ακολουθίας των frames που συνθέτουν το βίντεο. Με άλλα λόγια δεν εφαρμόζεται η χρονική συμπίεση καμία χρονική επεξεργασία δεν εκτελείται έξω από το τρέχων frame. Αυτός ο τύπος frame χρησιμοποιείται σαν βάση για την παραγωγή άλλων τύπων frames.
- **Forward predicted frames (P-frames).** Ένα P-frame βασίζεται σε παρελθοντικά I frames. Ξεκινώντας με ένα I-frame ο κωδικοποιητής μπορεί να προβλέψει το μελλοντικό P-frame το οποίο μπορεί επίσης να προβλεφθεί από άλλα P-frames. Ουσιαστικά ένα P-frame δεν είναι μια κωδικοποιημένη εικόνα αλλά περιέχει πληροφορίες κίνησης οι οποίες επιτρέπουν σε μια IPTVCD να επανασχηματίσει το frame. Τα P-frames απαιτούν λιγότερο εύρος ζώνης από τα I-frames, χαρακτηριστικό σημαντικό για τα δίκτυα που παρέχουν IPTV υπηρεσίες.
- **Bi-directional predicted frames (B-frames).** Τα B-frames αποτελούνται από πληροφορίες των I και P-frames Όπως φανερώνει και το όνομα τους τα B-frames είναι αμφίδρομα και βασίζονται στα frames που προηγούνται, που έπονται αυτών (ή και τα δύο) είτε αυτά είναι τα I-frames είτε τα P-frames. Περιέχουν μόνο τα δεδομένα που έχουν αλλάξει από το προηγούμενο frame ή τα δεδομένα που είναι διαφορετικά αυτών του επόμενου frame. Δεδομένου ότι τα B-frames δε χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των μελλοντικών frames τα σφάλματα που προκύπτουν δε μεταδίδονται περαιτέρω στην ακολουθία. Καταλαμβάνουν μικρότερο εύρος ζώνης από τα I-frames ή τα P-frames και συνεπώς σε ένα IPTV περιβάλλον μία ροή που περιέχει μεγάλο πλήθος B-frames απαιτεί λιγότερο εύρος ζώνης συγκριτικά με ψηφιακές ροές οι οποίες περιέχουν μεγάλο πλήθος I και P frames. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής κωδικοποίησης είναι οι καθυστερήσεις Χρονικές καθυστερήσεις που δημιουργούνται καθώς μια

IPTVCD θα πρέπει να περιμένει να εξετάσει δύο frames αναφοράς (προηγούμενα) προτού επεξεργαστεί ένα B-frame.



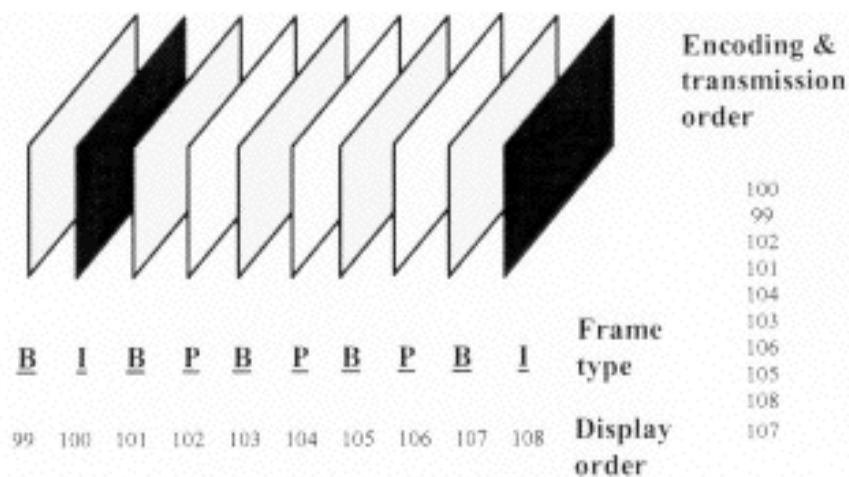
Σχήμα 3.12 Ιεραρχική δομή μιας MPEG ροής βίντεο [1]

Αυτοί οι τρεις τύποι εικόνων συνδυάζονται για να διαμορφώσουν μια ακολουθία από frames τη λεγόμενη ομάδα εικόνων (Group Of Pictures - GOP). Κάθε GOP αποτελείται κατά μέσο όρο από 12 - 15 frames και αρχίζει με ένα I-frame. Ένα τυπικό παράδειγμα μιας MPEG ομάδας εικόνων έχει την ακόλουθη δομή:

**[I B B B P B B B P B B B P B B B P]**

Η διάταξη των πλαισίων που διαβιβάζονται στο δίκτυο είναι διαφορετική από αυτή των πλαισίων που περιλαμβάνονται στην ασυμπιεστη ροή που τροφοδοτεί τον κωδικοποιητή (reordering διαδικασία). Αυτό συμβαίνει διότι στην IPTVCD η αποκωδικοποίηση απαιτεί πρώτα την επεξεργασία των I και P frames πριν την επανασυγκρότηση των B-frames. Στο σχήμα 3.13 η σειρά κωδικοποίησης και μεταφοράς των frames έχει ως εξής: Το πρώτο B-frame προβλέπεται από το

πρώτο I-frame και το πρώτο P-frame. Το δεύτερο B-frame προβλέπεται από το δεύτερο και τρίτο P-frame, ενώ το τρίτο B-frame από το τρίτο P-frame και το πρώτο I-frame της επόμενης ομάδας εικόνων [15]. Οι ομάδες εικόνων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις ανοικτές και τις κλειστές. Σε μία κλειστή ομάδα εικόνων το τελευταίο B-frame δεν απαιτεί ένα I-frame από την επόμενη ομάδα εικόνων για την αποκωδικοποίηση όπως συμβαίνει σε μια ανοιχτή ομάδα. Οι ομάδες εικόνων στη συνέχεια συνενώνονται για να παραχθεί το βίντεο.



Σχήμα 3.13 Σειρά κωδικοποίησης και μεταφοράς των frames μιας ακολουθίας [15]

Το MPEG-2 χρησιμοποιεί κάποια προφίλ κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Ένα προφίλ ορίζει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας της κωδικοποίησης. Δύο από τα προφίλ το MPEG-2 ορίζει είναι τα εξής:

- **Απλό προφίλ.** Στον απλό τύπο προφίλ δε χρησιμοποιούνται B-frames και συνεπώς δεν είναι εφαρμόζεται η reordering λειτουργία η οποία προσθέτει μια καθυστέρηση κωδικοποίησης περίπου 120 ms. Αυτό το προφίλ είναι κατάλληλο για εφαρμογές μικρής καθυστέρησης όπως η τηλεδιάσκεψη όπου η συνολική καθυστέρηση είναι περίπου 100 ms [14].
- **Κύριο προφίλ.** Αυτό το προφίλ χρησιμοποιεί όλους τους τύπους των frames (I, P και B). Είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο προφίλ με τη χρήση των B-frames να αυξάνει τη ποιότητα εικόνας αλλά να προσθέτει



καθυστέρηση λόγω της reordering λειτουργίας. Χρησιμοποιείται συνήθως για multicast IPTV υπηρεσίες [14].

- **SNR (Signal-to-noise ratio).** Το SNR προφίλ ανάλογα με το επίπεδο της κβαντοποίησης που χρησιμοποιεί κωδικοποιεί τις ροές σε μία χωρική ανάλυση αλλά σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας της εικόνας με τις ροές που έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα να περιέχουν δεδομένα του βασικού επιπέδου ποιότητας. [16].
- **Χωρικό προφίλ.** Το χωρικό προφίλ χρησιμοποιεί τη χωρικής εξελισιμότητας (spatial enhancement scalability) για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της εικόνας.
- **Υψηλό προφίλ.** Το υψηλό προφίλ προορίζεται για HDTV εφαρμογές.

Στους ρυθμούς των bit ροών υπάρχουν δύο παραλλαγές. Ο CBR και ο VBR (Variable Bit Rate). Μία CBR ροή λειτουργεί με σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης των frames ανεξαρτήτως της πολυπλοκότητας του τηλεοπτικού περιεχομένου. Αυτός ο τύπος είναι ιδανικός για DSL δίκτυα των οποίων το εύρος ζώνης είναι σταθερό. Τα frames σε μια VBR ροή κωδικοποιούνται χρησιμοποιώντας μεταβλητούς bit ρυθμούς καθώς ένα πολύπλοκο frame απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό από bit ενώ τα λιγότερο σύνθετα frames χρησιμοποιούν ένα μικρότερο αριθμό για την αναπαράσταση της εικόνας. Η VBR τεχνική χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με τη διαδικασία της στατιστικής πολύπλεξης. Με τη χρήση της στατιστικής πολύπλεξης ένα κανάλι το οποίο μεταδίδει μια σκηνή με γρήγορες εναλλαγές και άρα ο ρυθμός των bit ροών είναι μεγάλος, μπορεί να δανειστεί επιπλέον εύρος ζώνης από κάποιο άλλο κανάλι το οποίο μεταδίδει μία απλή σκηνή. Ωστόσο η DSL τεχνολογία δεν επιτρέπει τη χρήση των διαμοιραζόμενων καναλιών η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η CBR.

Αν και η MPEG-2 κωδικοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στα καλωδιακά και δορυφορικά δίκτυα δεν είναι κατάλληλη για δίκτυα περιορισμένου εύρους ζώνης, με το τηλεφωνικό δίκτυο να αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα συστήματος που δεν μπορεί να μεταφέρει MPEG-2 ροές τηλεοπτικού περιεχομένου. Για τον παραπάνω λόγο αναπτύχθηκαν νέα βελτιωμένα σχήματα συμπίεσης με σκοπό τη μετάδοση τηλεοπτικού περιεχομένου σε δίκτυα με περιορισμένο εύρος ζώνης. Τα πιο σημαντικά εξ' αυτών είναι το MPEG-4 (part 10) και το VC-1 [1].

### 3.10.1.2 MPEG-4 Part 10 AVC/H.264

Ο πολλαπλασιασμός της χρήσης των νέων τύπων εφαρμογών (HDTV, VoD) απαιτεί τεράστια χρήση εύρους ζώνης. Για παράδειγμα ένα HD κανάλι μπορεί να απαιτεί το εύρος ζώνης που απαιτείται για έξι SD κανάλια συνολικά. Για την ικανοποίηση αυτών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης εισήχθη το 2002 η MPEG-4 Part 10 προδιαγραφή συμπίεσης η οποία είναι γνωστή και ως H.264/AVC ή ως εξελικτική κωδικοποίηση βίντεο (Scalable Video Coding - SVC) τα κύρια πλεονεκτήματα της οποίας είναι:

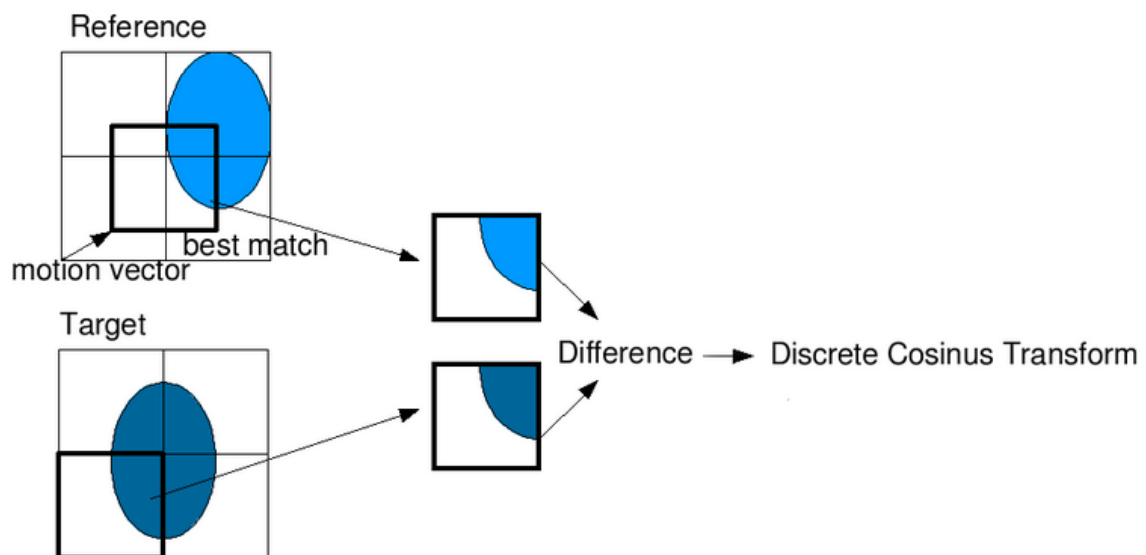
- Οι αυξημένες ικανότητες συμπίεσης αυτής της προδιαγραφής την καθιστά κατάλληλη για τη διανομή υπηρεσιών βίντεο υψηλής ποιότητας καθώς απαιτεί λιγότερο εύρος ζώνης για τη διανομή σήματος ίδιας ποιότητας με το MPEG-2 συνεπώς η χρήση της είναι ιδανικής για δίκτυα με περιορισμένο εύρος ζώνης καθώς επίσης απαιτεί μικρότερο χώρο αποθήκευσης από τους servers.
- Η διανομή του H.264/AVC περιεχομένου υποστηρίζεται από διάφορα πρωτόκολλα όπως είναι το ATM, το RTP, το UDP και το TCP.
- Προσαρμόζεται εύκολα σε δίκτυα χαμηλής ποιότητας χάριν των ενσωματωμένων μηχανισμών απόκρυψης και αποκατάστασης λαθών.
- Υιοθετείται από πλήθος διαφορετικών εφαρμογών όπως είναι αυτές της IPTV, της τηλεδιάσκεψης και της ψυχαγωγίας μέσω φορητών κονσόλων [1].
- Χρησιμοποιεί ένα Deblocking Loop φίλτρο για την αποτροπή της εμφάνισης pixels που δεν ανήκουν στην εικόνα (artifacts) [1].

Η αρχιτεκτονική της H.264/AVC συμπίεσης περιλαμβάνει τις εξής τεχνικές:

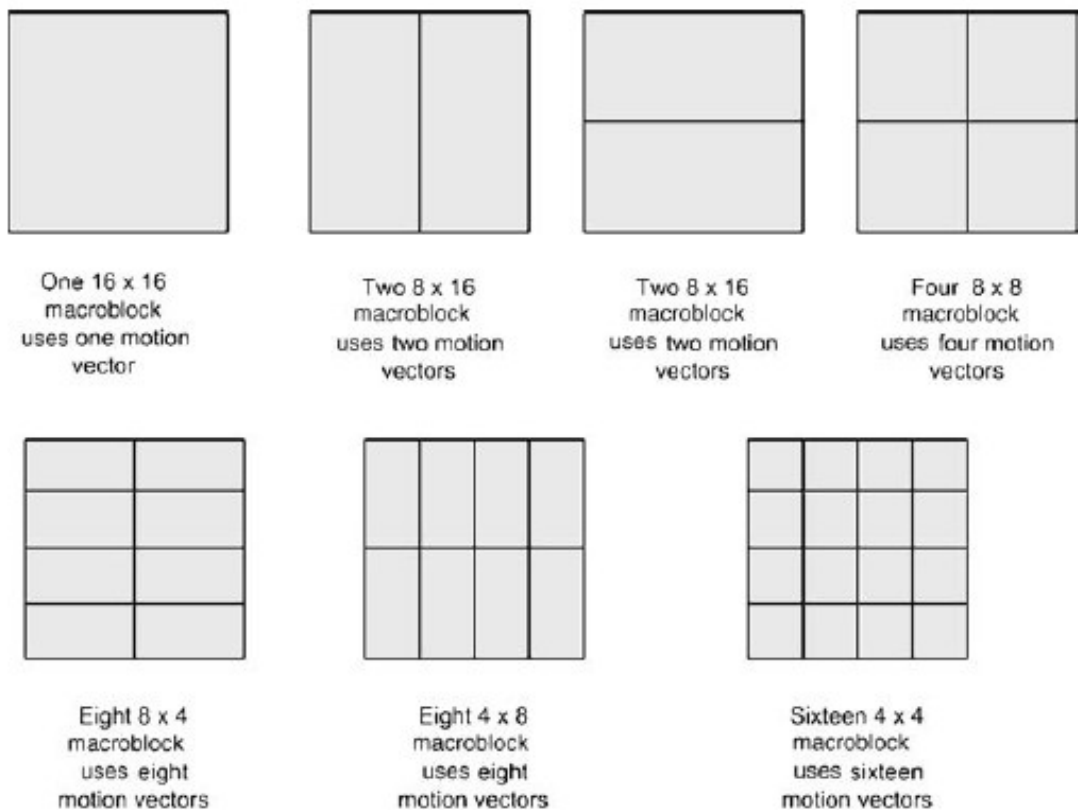
- **Intraprediction.** Το H.264/AVC εκμεταλλεύεται το χωρικό πλεονασμό (spatial redundancy) και είναι όμοιο με το MPEG-2 ως προς το ότι η κωδικοποίηση εφαρμόζεται σε κάθε frame. Ωστόσο οι ομοιότητες μεταξύ αυτών των δύο σταματούν εδώ. Στο MPEG-2 ο DCT εφαρμόζεται σε κάθε macroblock του frame ξεχωριστά ενώ στο H.264/AVC ο DCT αλγόριθμος κωδικοποιεί κάθε macroblock βάσει του ήδη κωδικοποιημένου γειτονικού του macroblock (reference macroblock) υπό την προϋπόθεση ότι οι διαφορές τους είναι ελάχιστες.
- **Interprediction.** Ο μηχανισμός αυτός κωδικοποιεί τις διαφορές μεταξύ των γειτονικών frames και βασίζεται στην εκτίμηση κίνησης (motion estimation)

για την εκμετάλλευση του χρονικού πλεονασμού μεταξύ των frames μιας ακολουθίας [1]. Ο κωδικοποιητής σε ένα ήδη κωδικοποιημένο frame (reference frame) προσπαθεί να βρει ένα όμοιο block με αυτό που πρόκειται να κωδικοποιηθεί. Εάν αυτή η διαδικασία είναι επιτυχής το block θα κωδικοποιηθεί απευθείας από ένα διάνυσμα κίνησης (motion vector) το οποίο επισημαίνει τη θέση του όμοιου block στο frame αναφοράς. Η διαδικασία του προσδιορισμού του διανύσματος κίνησης ονομάζεται εκτίμηση κίνησης. Η διαδικασία που περιγράφηκε απεικονίζεται στο σχήμα 3.14.

- **Macroblock Partitioning.** Η H.264/AVC συμπίεση προσφέρει τη δυνατότητα της περαιτέρω διχοτόμησης των macroblocks σε πίνακες από pixels μικρότερου μεγέθους έναντι των 16X16 μεγέθους πινάκων που υποστηρίζει η MPEG-2 τεχνική. Ο σκοπός αυτής της διχοτόμησης είναι η αποτελεσματικότερη εφαρμογή της motion estimation τεχνικής. Λεπτομέρειες σχετικά με το μέγεθος των blocks μετά τη διχοτόμηση παρουσιάζονται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.14 Interframe μηχανισμός κωδικοποίησης [1]

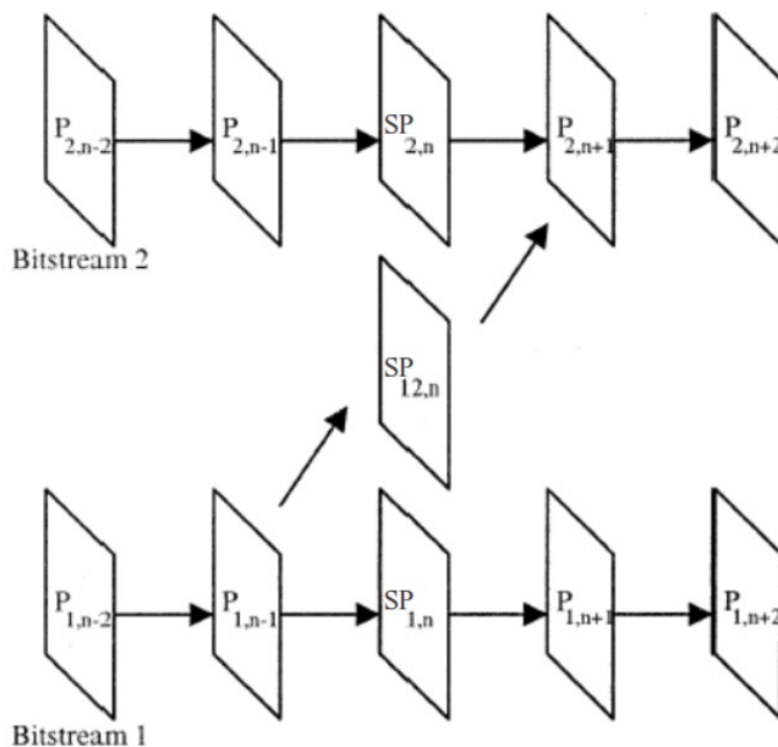


Σχήμα 3.15 Υποστηριζόμενα μεγέθη blocks από το H.264/AVC [1]

Όπως προαναφέρθηκε στο MPEG-2 η δημιουργία των B-frames βασίζεται στα I και P frames αναφοράς τα οποία εντοπίζονται πριν ή μετά του B-frame εντός του συγκεκριμένου frame. Στο H.264/AVC μηχανισμό συμπίεσης τα B-frames μπορούν να χρησιμοποιήσουν σαν frame αναφοράς I και P frames οποιουδήποτε frame της βίντεο ροής. Το χαρακτηριστικό αυτό βελτιώνει την αποδοτικότητα της συμπίεσης καθώς γίνεται μια πιο οικονομική χρήση του εύρους ζώνης. Επιπλέον η H.264/AVC τεχνική συμπίεσης επιτρέπει τη χρήση περισσότερων του ενός frame καθώς και τη χρήση frames που έπονται των P-frames ως frame αναφοράς.

Εκτός των I, P και B-frames το H.264/AVC υποστηρίζει δύο επιπλέον τύπους frame το Switching I (SI) και το Switching P (SP). Γενικά οι τεχνολογίες κωδικοποίησης παράγουν ροές με σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης των bits. Συνεπώς ένας απλός τρόπος για την προσαρμογή των ροών αυτών στο διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι η παραγωγή πολλαπλών ροών με διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης των bits, επίπεδα ποιότητας και η εναλλαγή μεταξύ αυτών των ροών κατά τη μεταβολή του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στη MPEG-2 τεχνική συμπίεσης η εναλλαγή μεταξύ των ροών διαφορετικού εύρους ζώνης είναι εφικτή μόνο κατά

τη χρήση των I-frames καθώς η κωδικοποίηση αυτών δε βασίζεται σε παρελθοντικά frames και συνεπώς είναι δυνατή η χρήση των fast-forward και fast-backward λειτουργιών αφού είναι εφικτό ο χρήστης να παραλείψει ένα μέρος της βίντεο ακολουθίας και να ξαναξεκινήσει την αναπαραγωγή αυτής από οποιοδήποτε I-frame. Το μειονέκτημα της χρήσης των I-frames σε αυτή την περίπτωση είναι ότι χρησιμοποιούν μόνο την τεχνική της χωρικής συμπίεσης και συνεπώς απαιτούν πολύ μεγαλύτερο αριθμό από bits σε σχέση με τα SP-frames τα οποία χρησιμοποιούν την interprediction τεχνική κωδικοποίησης και συνεπώς απαιτούν λιγότερα bits για την επίτευξη της ίδιας ποιότητας. Εξαιτίας αυτής της ιδιότητάς τους τα SP-frames μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των I-frames για εφαρμογές όπως η fast forward και η fast backward. Έστω ότι διαθέτουμε δύο ροές την 1 και τη 2 (σχήμα 3.16). Σε κάθε μία από αυτές τις ροές κάθε P-frame κωδικοποιείται βάση του P-frame που προηγείται αυτού. Θεωρώντας ότι αρχικά ο server αποστέλλει τη ροή 1 μέχρι τη χρονική στιγμή  $n$  μετά την οποία αρχίζει η αποστολή της ροής 2, ο αποκωδικοποιητής θα λάβει τη  $\{P_{1,n-2}, P_{1,n-1}, P_{2,n}, P_{2,n+1}, P_{2,n+2}\}$  ακολουθία frames. Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης εάν υπάρξει ανάγκη



Σχήμα 3.16 Εναλλαγή βίντεο ροών με τη χρήση SP-frames [1]

μεταβολής του εύρους ζώνης δηλαδή αλλαγή από τη ροή 1 στη ροή 2, θα προκύψει πρόβλημα κατά την αποστολή των κωδικοποιημένων P-frames στη ροή 2. Συγκεκριμένα στο τρίτο frame με την αποστολή του  $P_{2,n}$  αντί του  $P_{1,n}$  ο αποκωδικοποιητής δε θα είναι σε θέση να επαναδημιουργήσει σωστά το  $P_{2,n}$  διότι το frame αναφοράς που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση του  $P_{2,n}$  ( $P_{2,n-1}$ ) δεν είναι διαθέσιμο στο buffer των reference frames του αποκωδικοποιητή και θα χρησιμοποιήσει το  $P_{1,n-1}$  για την αποκωδικοποίηση του  $P_{2,n}$ . Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση των SP frames. Πιο συγκεκριμένα το τρίτο P frame και στις δύο ροές κωδικοποιείται σε ένα SP frame δηλαδή στο  $SP_{1,n}$  και στο  $SP_{2,n}$ . Τα SP-frames τοποθετούνται στο σημείο στο οποίο γίνεται η αλλαγή από τη μία ροή στην άλλη στη θέση των  $P_{1,n}$  και  $P_{2,n}$  frames και ονομάζονται πρωτεύοντα SP-frames. Επιπλέον κατά την αλλαγή από τη ροή 1 στη ροή 2 για κάθε πρωτεύον SP-frame παράγεται ένα δευτερεύον SP-frame ( $SP_{12,n}$ ) με τη βοήθεια του  $P_{1,n-1}$  ως frame αναφοράς το οποίο  $SP_{12,n}$  frame κατά την αποκωδικοποίηση του είναι όμοιο με το πρωτεύον. Εν συνεχεία κατά την εναλλαγή της ροής αποστέλλεται το δευτερεύον  $SP_{12,n}$  frame έναντι του  $S_{1,n}$ . Το  $SP_{12,n}$  χρησιμοποιεί το  $P_{1,n-1}$  ως frame αναφοράς και η κωδικοποίηση του διασφαλίζει ότι κατά την αποκωδικοποίηση το  $SP_{12,n}$  θα είναι όμοιο με το με το frame που θα προέκυπτε από την αποκωδικοποίηση του  $SP_{2,n}$ .

### 3.10.2 VC-1 συμπίεση

Η VC-1 αποτελεί μια προδιαγραφή συμπίεσης η οποία δημοσιεύθηκε το 2006. Η WMV (Microsoft's Windows Media Video) 9 πλατφόρμα κωδικοποίησης πολυμέσων έχει υιοθετήσει αυτή την προδιαγραφή μεταξύ άλλων όπως το HD-DVD και το Blu-ray. Η VC-1 προδιαγραφή συμπίεσης διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

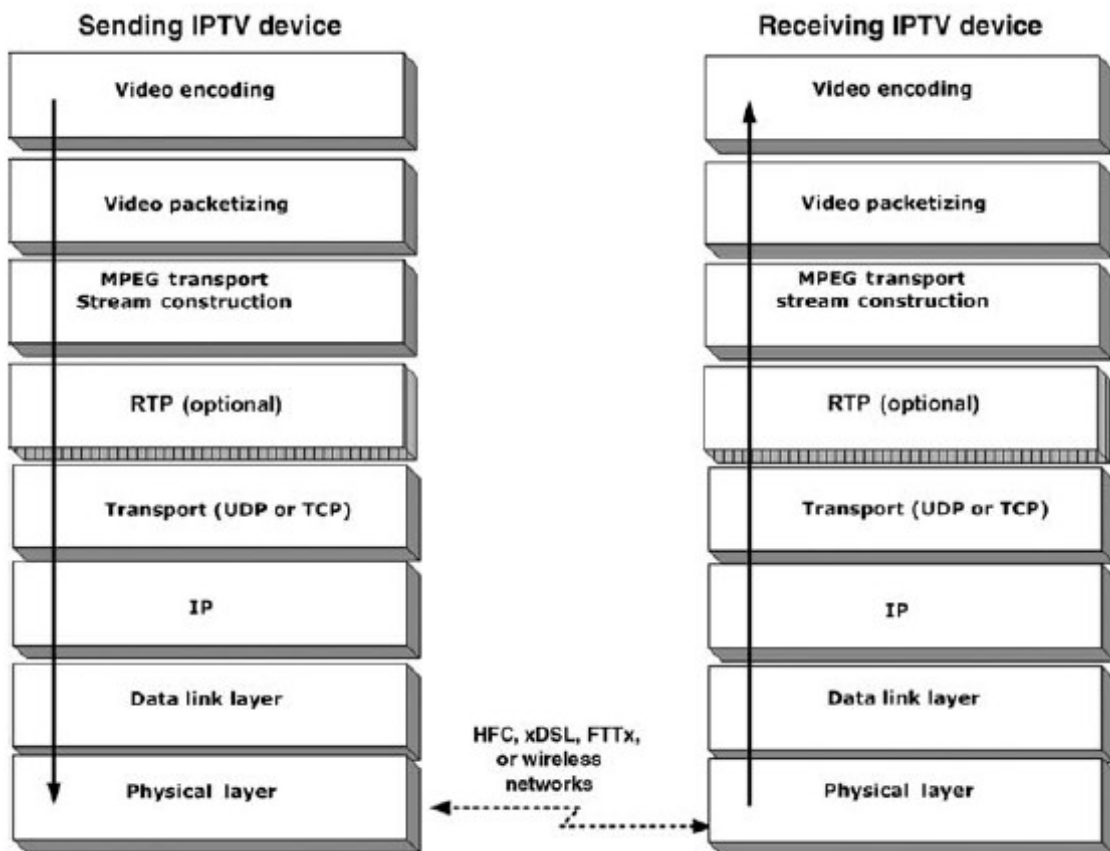
- Υποστηρίζεται από πλήθος διαφορετικών IPTVCDs όπως είναι τα DVD players, τα set-top boxes και τα κινητά τηλέφωνα.
- Υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τύπους προφίλ, το απλό, το κύριο και το προηγμένο. Κάθε επιμέρους προφίλ είναι κατάλληλο και για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών. Συγκεκριμένα το απλό προφίλ είναι κατάλληλο για τη διανομή Internet εφαρμογών χαμηλών ρυθμών μετάδοσης, ενώ το προηγμένο προφίλ είναι κατάλληλο για τη συμπίεση HDTV περιεχομένου.

Το κύριο προφίλ είναι το καταλληλότερο για χρήση σε ένα IPTV περιβάλλον και συγκεκριμένα για τη διανομή βίντεο μέσω DSL δικτύων.

- Επιπλέον της κωδικοποίησης blocks μεγέθους 8X8 pixels υποστηρίζει και την κωδικοποίηση blocks μεγέθους 4 X 4 pixels.
- Εισάγει τη χρήση ενός επιπλέον τύπου frame του BI frame, το οποίο είναι ένα είδος I-frame το οποίο όμως δε χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη άλλων frames [1].

### 3.11 Επικοινωνιακό μοντέλο IPTV

Το IPTV επικοινωνιακό μοντέλο (IPTV Communications Model - IPTVCM) αποτελείται από επτά υποχρεωτικά και ένα προαιρετικό εννοιολογικά επίπεδα (σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.15 Επικοινωνιακό μοντέλο IPTV [1]

Τα δεδομένα ενός βίντεο διέρχονται από τα επίπεδα του IPTVCM μοντέλου έως ότου διανεμηθούν στο ευρυζωνικό επίπεδο μέσω των πρωτοκόλλων του φυσικού επιπέδου. Κάθε επίπεδο προσθέτει ή ενθυλακώνει επιπλέον πληροφορίες ελέγχου στα δεδομένα ενός βίντεο οι οποίες έχουν τη μορφή headers ή trailers κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του έως ότου αυτό φθάσει στη συσκευή προορισμού του. Έτσι εάν ο κωδικοποιητής θέλει να διανείμει κάποιο περιεχόμενο σε μια IPTVCD πρέπει να το διανείμει μέσω της IPTVCM δομής και των δύο συσκευών και στο τέλος του IPTVCM μοντέλου αυτά λαμβάνονται από την κατάλληλη εφαρμογή. Στα ανώτερα επίπεδα εφαρμόζονται οι λειτουργίες της κωδικοποίησης και της πακετοποίησης ενός βίντεο, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα είναι υπεύθυνα για τις λειτουργίες που σχετίζονται με τη διανομή των δεδομένων όπως η δρομολόγηση, η διευθυνσιοδότηση και ο έλεγχος ροής. Τα επίπεδα αυτά είναι τα εξής:

- **Video Encoding Layer.** Στο επίπεδο κωδικοποίησης το ασυμπιεστο αναλογικό ή ψηφιακό σήμα συμπιέζεται με αποτέλεσμα ο κωδικοποιητής να παράγει μια βασική MPEG ροή (elementary MPEG stream). Μία βασική ροή μπορεί να περιέχει έναν τύπο πληροφοριών όπως ήχο, δεδομένα ή βίντεο. Σε αυτό το επίπεδο του IPTVCM μοντέλου η ροή οργανώνεται σε βίντεο frames. Το είδος των πληροφοριών που περιέχονται στη ροή αυτή περιλαμβάνει τον τύπο και το ρυθμό μετάδοσης των frames, τη θέση των blocks δεδομένων στην οθόνη και το aspect ratio της εικόνας. Μία βασική ροή αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία μιας MPEG ροής. Στην περίπτωση της H.264/AVC προδιαγραφής συμπίεσης το επίπεδο αυτό διαιρείται σε δύο επιμέρους επίπεδα, το VCL (Video Coding Layer) και το NAL (Network Abstraction Layer) επίπεδο. Το VCL επίπεδο φροντίζει για τη συμπίεση του βίντεο και η έξοδος (output) αυτού του επιπέδου είναι ένα σύνολο γραμμών εικόνας (picture slices). Στο NAL επίπεδο μια bit ροή οργανώνεται σε πακέτα τα οποία ονομάζονται μονάδες NAL. Μία NAL μονάδα περιέχει το ωφέλιμο φορτίο ενός βίντεο και προσδιορίζεται από τον όρο VCL-NAL. Ωστόσο μία NAL μονάδα είναι πιθανό να περιέχει και ένα άλλο είδος ωφέλιμου φορτίου όπως είναι οι πληροφορίες ελέγχου και προσδιορίζεται από τον όρο non-VCL unit. Τα NAL units χαρακτηρίζονται και ως non-VCL units. Το NAL επίπεδο χρησιμοποιείται από τη H.264/AVC τεχνική συμπίεσης για IP και μη δίκτυα.



- **Video Packetizing Layer.** Η βασική ροή δεν είναι κατάλληλη για μετάδοση γιατί δεν είναι χωρισμένη σε πακέτα, δεν περιέχει ήχο, δηλαδή περιέχει δεδομένα ενός μόνο τύπου και γιατί έχει συγκεκριμένες αδυναμίες απέναντι σε σφάλματα μετάδοσης. Παραδείγματος χάρη αν χαθεί το Sequence Header που βρίσκεται μόνο στην αρχή δε μπορεί να αποκωδικοποιηθεί το βίντεο. Εν συνέχεια η βασική ροή τεμαχίζεται σε πακέτα και έτσι προκύπτει η PES (Packetised Elementary Stream) ροή, με τα πακέτα να ονομάζονται PES packets. Συνήθως ο τεμαχισμός γίνεται στα όρια των frames με κάθε frame να αντιστοιχεί σε ένα PES πακέτο και άρα τα PES πακέτα δεν έχουν σταθερό μήκος. Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζονται PES πακέτα για τον κωδικοποιημένο ήχο. Σε κάθε PES πακέτο προσαρτάται μία κεφαλίδα. Μεταξύ άλλων η κεφαλίδα περιέχει το μήκος του πακέτου, το αναγνωριστικό της βασικής ροής που μεταφέρει καθώς και πληροφορίες χρονισμού (Presentation Time Stamp – PTS και Decoding Time Tstamp - DTS). Επειδή η σειρά των πακέτων που εξέρχονται από το IPTV data center είναι διαφορετική από αυτή με την οποία λαμβάνονται από μια IPTVCD, οι πληροφορίες χρονισμού δείχνουν στον MPEG-2 ή στον H.264/AVC αποκωδικοποιητή πότε να αποκωδικοποιήσει και πότε να παρουσιάσει το περιεχόμενο του πακέτου [17].
- **Transport Stream Construction Layer.** Όπως προαναφέρθηκε τα PES πακέτα είναι μεταβλητού μεγέθους και δεν είναι κατάλληλα ούτε για μετάδοση ούτε για πολύπλεξη. Για το λόγο αυτό γίνεται μια δεύτερη διαίρεση αυτών σε πακέτα. Ένα PES πακέτο υποδιαιρείται σε πακέτα σταθερού μεγέθους των 188 bytes τα λεγόμενα πακέτα μεταφοράς (Transport Packets - TPs) και έτσι προκύπτει η MPEG2 ροή μεταφοράς (MPEG-2 Transport Stream) με κάθε πακέτο μεταφοράς να περιέχει πάλι ένα τύπο πληροφοριών [17]. Κάθε PES πακέτο διαθέτει μία κεφαλίδα μεγέθους 4 bytes και ένα πεδίο προσαρμογής (adaptation field) το οποίο διαθέτει κενά bytes και χρησιμοποιείται για να γεμίσει το πακέτο όταν τα δεδομένα είναι λιγότερα από 184 bytes. Στην κεφαλίδα του πακέτου μεταφοράς υπάρχουν μεταξύ άλλων το byte συγχρονισμού, το αναγνωριστικό (Packet Identifier - PID) το οποίο μονοσήμαντα δηλώνει τη ροή που περιέχεται στο πακέτο (π.χ. όλα τα πακέτα που μεταφέρουν την

εικόνα του προγράμματος) και το μετρητής συνέχειας (continuity counter) ο οποίος χρησιμεύει για την ανίχνευση των χαμένων πακέτων μεταφοράς.

- **RTP Layer.** Το επίπεδο αυτό είναι προαιρετικό και χρησιμοποιείται από πλήθος διαφορετικών IPTV εφαρμογών. Το RTP διανέμει τις ροές ήχου ή βίντεο ενθυλακώνοντας το περιεχόμενο αυτών σε πακέτα. Κάθε πακέτο αποτελείται από μία κεφαλίδα και το ωφέλιμο φορτίο. Για την αποτελεσματικότερη χρήση του εύρους ζώνης το ωφέλιμο φορτίο περιέχει περισσότερα του ενός πακέτων μεταφοράς. Η κεφαλίδα περιέχει εκείνες τις λειτουργίες που είναι ουσιαστικές για την επιτυχή διανομή των real-time δεδομένων κατά μήκος του δικτύου. Το κύριο πλεονέκτημα από την εισαγωγή του συμπιεσμένου περιεχομένου σε RTP πακέτα είναι ότι προστίθεται ένας αριθμός ακολουθίας ο οποίος βοηθά τον server και μία IPTVCD στην ανίχνευση των χαμένων πακέτων. Αυτός ο αριθμός μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί από τον αποκωδικοποιητή της IPTVCD για την ταξινόμηση των πακέτων που φτάνουν από το IP δίκτυο σε λανθασμένη σειρά. Κατά την εισαγωγή της κεφαλίδας στο ωφέλιμο φορτίο το RTP πακέτο αποστέλλεται στο TCP ή στο UDP πρωτόκολλο για περαιτέρω επεξεργασία. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατή η διανομή MPEG-2, H.264/AVC ή VC-1 συμπιεσμένου βίντεο, ήχου και δεδομένων κατά μήκος ενός IP δικτύου αποφεύγοντας τη χρήση κάποιων εκ των ανώτερων επιπέδων του IPTVCM με την προσθήκη του περιεχομένου αυτού απευθείας σε ένα RTP πακέτο. Άξιο αναφοράς είναι επίσης ότι ο RTP μηχανισμός ενθυλάκωσης γενικά εφαρμόζονται σε δίκτυα που δεν μπορούν να εγγυηθούν ικανοποιητικά επίπεδα QoS για τη διανομή των IPTV υπηρεσιών. Αν και το RTP βοηθά στην αύξηση των πιθανοτήτων να φτάσει μια ροή στο προορισμό της με τη σωστή σειρά δεν έχει σχεδιασθεί για να υποστηρίξει την ποιότητα των υπηρεσιών.
- **Transport Layer.** Εξαιτίας του ότι το RTP επίπεδο είναι προαιρετικό, η ενθυλάκωση των MPEG πακέτων μπορεί να γίνει απευθείας στο ωφέλιμο φορτίο αυτού του επιπέδου αποφεύγοντας την πολυπλοκότητα που εισάγει το RTP επίπεδο. Τα κύρια πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το επίπεδο είναι το TCP και το UDP. Το επίπεδο αυτό έχει σχεδιασθεί για την απόκρυψη της περίπλοκης δομής των IP δικτύων εξαιτίας των διεργασιών των ανώτερων επιπέδων. Το TCP είναι ένα connection oriented

πρωτόκολλο που σημαίνει ότι πρέπει να δημιουργηθεί μία σύνδεση μεταξύ του server στο IPTV κέντρο δεδομένων και της IPTVCD πριν τη διανομή του περιεχομένου στο δίκτυο. Το TCP θεωρείται ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο υπό την έννοια ότι εάν υπάρξει σφάλμα κατά τη διανομή των δεδομένων ενός βίντεο σε μια IPTVCD το επίπεδο μεταφοράς μπορεί να προβεί στην επαναμετάδοση αυτών ή να απαιτήσει από τα ανώτερα επίπεδα τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες. Τέτοιου είδους σφάλματα σε ένα IPTV περιβάλλον είναι η απώλεια, η λανθασμένη σειρά αλλά και η λήψη διπλών πακέτων. Στο TCP οι συνδρομητές έρχονται συχνά αντιμέτωποι με την παύση της αναμετάδοσης του προγράμματος που παρακολουθούν καθώς περιμένουν κάποιο αργοπορημένο πακέτο να φτάσει ή να αντικατασταθεί στην περίπτωση που είναι κατεστραμμένο. Συνεπώς το TCP δεν αποτελεί την προτιμώμενη επιλογή πρωτοκόλλου μεταφοράς διότι χρησιμοποιεί μηχανισμούς ελέγχου ροής (flow control mechanisms) και οι real-time IPTV εφαρμογές δεν επιδέχονται καθυστερήσεις. Επίσης το επίπεδο μεταφοράς έχει επίγνωση για το αν κάποιος συνδρομητής διαθέτει περιορισμένους πόρους (μνήμη, εύρος ζώνης, κ.λπ.) και μέσω του μηχανισμού ελέγχου ροής μπορεί να απαιτήσει από την πηγή τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων έτσι ώστε να αποφευχθεί η απώλεια των segments και να μη χρειαστεί η επαναμετάδοσή τους. Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους το TCP χρησιμοποιείται σπάνια σε ένα live IPTV περιβάλλον καθώς δε μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά την πολυεκπομπή των IPTV εφαρμογών. Εντούτοις χρησιμοποιείται εκτενώς από άλλες εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και τη μεταφόρτωση Internet TV τηλεοπτικού περιεχομένου μέσω του διαδικτύου. Το UDP είναι ένα connectionless πρωτόκολλο σύμφωνα με το οποίο δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία σύνδεσης μεταξύ του server στο IPTV κέντρο δεδομένων και μιας IPTVCD πριν τη διανομή του περιεχομένου στο δίκτυο. Το UDP ομαδοποιεί τα δεδομένα σε μονάδες που ονομάζονται datagrams, διαθέτει μικρότερο μέγεθος κεφαλίδας και δεν εγγυάται αξιόπιστη επικοινωνία καθώς τα πακέτα UDP που αποστέλλονται μπορεί να φτάσουν στο συνδρομητή με λάθος σειρά, διπλά ή να μην φτάσουν καθόλου εάν το δίκτυο έχει μεγάλο φόρτο. Συνεπώς η χρήση του UDP δεν εισάγει καθυστερήσεις στη διανομή του IPTV περιεχομένου. Ακόμη και αν

υπάρχουν πακέτα τα οποία έχουν καθυστερήσει ή είναι κατεστραμμένα οι IPTV εφαρμογές διαθέτουν ειδικούς μηχανισμούς διόρθωσης και παρεμβολής ούτως ώστε ο τελικός χρήστης να μην παρατηρεί καμία αλλοίωση ή διακοπή στην ροή του ήχου και της εικόνας [18]. Αντιθέτως το TCP διαθέτει όλους τους απαραίτητους μηχανισμούς ελέγχου και επιβολής της αξιοπιστίας. Η έλλειψη των μηχανισμών αυτών εκ μέρους του UDP το καθιστά αρκετά πιο γρήγορο και αποτελεσματικό, τουλάχιστον για τις εφαρμογές εκείνες οι οποίες δεν απαιτούν αξιόπιστη επικοινωνία. Αν και το UDP δεν είναι τόσο αξιόπιστο ούτε τόσο κατάλληλο για το χειρισμό σφαλμάτων σε σχέση με το TCP χρησιμοποιείται από τις περισσότερες IPTV εφαρμογές. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την αποστολή των δεδομένων στον προορισμό τους είναι η best effort. Επιπλέον το UDP δεν απαιτεί κάποιο κανάλι επιστροφής επιτρέποντας έτσι σε παρόχους δορυφορικών υπηρεσιών τη multicast μετάδοση του IPTV περιεχομένου στους συνδρομητές τους και γενικότερα η χρήση του για τη multicast και τη broadcast μετάδοση είναι προτιμότερη αυτής του TCP.

- **IP layer.** Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται για την αποστολή των δεδομένων στο προορισμό τους μέσω συγκεκριμένων διαδρομών οι οποίες προσδιορίζονται από τη χρήση των IP διευθύνσεων μεγέθους 32-bit για τον εντοπισμό της φυσικής τοποθεσίας των IPTVCDs και των servers του IPTV κέντρου δεδομένων. Χρησιμοποιείται τόσο για τη unicast διανομή του περιεχομένου σε μια συσκευή συνδρομητή όσο και για τη multicast διανομή των δεδομένων σε πολλές IPTVCDs. Χρησιμοποιεί την τέταρτη έκδοση του IP πρωτοκόλλου (IP version 4 – IPv4) η οποία σήμερα αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο για τα IPTV δίκτυα. Το IP πρωτόκολλο αποστέλει τα bits των δεδομένων από την πηγή στο προορισμό τους με τη μορφή πακέτων και χρησιμοποιεί τον best effort μηχανισμό για τη διανομή των δεδομένων δηλαδή δεν περιλαμβάνει κάποια ενσωματωμένη διαδικασία η οποία θα εγγυάται τη διανομή τους. Δηλαδή δεν εγγυάται το σωστό χρόνο άφιξης ούτε τη σωστή σειρά με την οποία τα πακέτα φθάνουν στον προορισμό τους. Για το λόγο αυτό λειτουργεί σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα του επιπέδου μεταφοράς για να εξασφαλίσει ότι τα πακέτα θα φτάσουν σε μια IPTVCD εγκαίρως και στη σωστή σειρά. Επειδή το IP επίπεδο εισάγει καθυστερήσεις στη διανομή του

περιεχομένου, οι περισσότεροι φορείς παροχής υπηρεσιών χρησιμοποιούν έναν QoS μηχανισμό για να ελαχιστοποιήσουν τις καθυστερήσεις που δημιουργεί το επίπεδο αυτό. Τα IP δίκτυα υποδιαιρούνται σε λογικές μονάδες τα λεγόμενα subnets. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στους φορείς παροχής υπηρεσιών να προσδιορίζουν και να ελέγχουν τα μεμονωμένα τμήματα ενός IPTV δικτύου χωρίς τη χρήση IPv4 διευθύνσεων. Οι διαχειριστές δικτύων διευθυνσιοδοτούν ένα subnet για να αποκρύψουν την εσωτερική δομή των ιδιωτικών δικτύων τους, προστατεύοντας τα από τις «επιθέσεις» του διαδικτύου. Οι διαχειριστές των IPTV δικτύων χρησιμοποιούν πρόσθετους αριθμούς αποκαλούμενους ως subnet masks για τη δημιουργία υποδικτύων σε ένα IPTV περιβάλλον. Τα subnet masks δεν είναι τίποτα άλλο από IP διευθύνσεις των 32-bit. Η δημιουργία των subnets υλοποιείται μέσω των δρομολογητών, με κάθε δρομολογητή να συνδέεται με περισσότερα του ενός δίκτυων και να είναι αυτό που αποφασίζει που να στείλει τα δεδομένα. Η αύξηση του μεγέθους του διαδικτύου οδηγεί γρήγορα στην εξάντληση των διαθέσιμων IP διευθύνσεων που προβλέπονται από το IPv4. Η ανάπτυξη δικτύων που υποστηρίζουν τις triple-play υπηρεσίες άρχισε να περιορίζει το σχήμα διευθυνσιοδότησης του IPv4. Για την άρση αυτού του περιορισμού δημιουργήθηκε το IPv6 πρωτόκολλο προκειμένου να βρεθεί μια λύση στους περιορισμούς του υπάρχοντος πλήθους IP διευθύνσεων. Το IPv6 καθορίζει μια IP διεύθυνση από 128-bit που είναι συμβατή με τη τρέχουσα υλοποίηση του IP. Επίσης περιλαμβάνει χαρακτηριστικά επικύρωσης (μέσω μιας κεφαλίδας επικύρωσης) και κρυπτογράφησης. Η χρήση του IPv6 στα IPTV δίκτυα είναι κατάλληλη λόγω του ενσωματωμένου QoS μηχανισμού που διαθέτει και της δυνατότητάς του να υποστηρίξει ουσιαστικά έναν απεριόριστο αριθμό IPTVCDs. Επιπλέον το IPv6 επιτρέπει στους φορείς παροχής των IPTV υπηρεσιών να προσδιορίσουν συγκεκριμένα πακέτα που προορίζονται για συγκεκριμένες υπηρεσίες (flow labeling). Έτσι στην περίπτωση του triple-play οι δρομολογητές μπορούν να μεταχειριστούν διαφορετικά τα πακέτα που ανήκουν σε ένα βίντεο από τα πακέτα που περιέχουν web περιεχόμενο. Στα επόμενα δύο έως πέντε χρόνια το IPv6 αναμένεται να αντικαταστήσει σταδιακά το IPv4 καθώς προβλέπεται τα δύο

αυτά πρωτόκολλα να συνυπάρχουν για κάποια έτη μέχρι να ολοκληρωθεί η μεταβατική αυτή περίοδος.

- **Data Link Layer.** Το επίπεδο αυτό παίρνει τα δεδομένα του IP επιπέδου και τα μορφοποιεί σε πακέτα που είναι κατάλληλα για τη διανομή τους μέσω του φυσικού δικτύου. Το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων διαφοροποιείται μεταξύ των διαφορετικών πρωτοκόλλων δικτύου, με το Ethernet να είναι η πιο δημοφιλής τεχνολογία για τα IPTV συστήματα. Οι λειτουργίες που περιλαμβάνει αυτό το επίπεδο για τα δίκτυα που βασίζονται στο Ethernet είναι:

- *Η ενθυλάκωση.* Σε αυτό το επίπεδο προστίθεται μία κεφαλίδα στα πακέτα από την οποία προκύπτουν τα Ethernet frames.

- *Η διεθυνσιοδότηση.* Το Ethernet χρησιμοποιεί το MAC σχήμα διεθυνσιοδότησης. Η MAC διεθυνσιοδότηση επιτρέπει σε κάθε συσκευή που συνδέεται σε ένα δίκτυο IPTV να έχει ένα μοναδικό προσδιοριστικό.

- *Έλεγχος σφαλμάτων.* Η λειτουργία ελέγχου σφαλμάτων χρησιμοποιείται από διάφορα επίπεδα του IPTVCM συμπεριλαμβανομένου και του επιπέδου σύνδεσης δεδομένων. Τα αλλοιωμένα πακέτα είναι ο πιο κοινός τύπος σφάλματος που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της διανομής του βίντεο μέσω ενός IP δικτύου με τη μέθοδο CRC (Cyclic Redundancy Check) να χρησιμοποιείται από τις IPTV εφαρμογές για την ανίχνευση ή την απόρριψη των αλλοιωμένων πακέτων.

- *Έλεγχος ροής.* Ο μηχανισμός ελέγχου ροής εφαρμόζεται πρώτιστα από το επίπεδο μεταφοράς. Ωστόσο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων εκτελεί τις οποιεσδήποτε απαραίτητες ενέργειες ελέγχου ροής από κοινού με το επίπεδο μεταφοράς ώστε ένας server να μεταδίδει δεδομένα σύμφωνα με τους διαθέσιμους πόρους μιας IPTVCD.

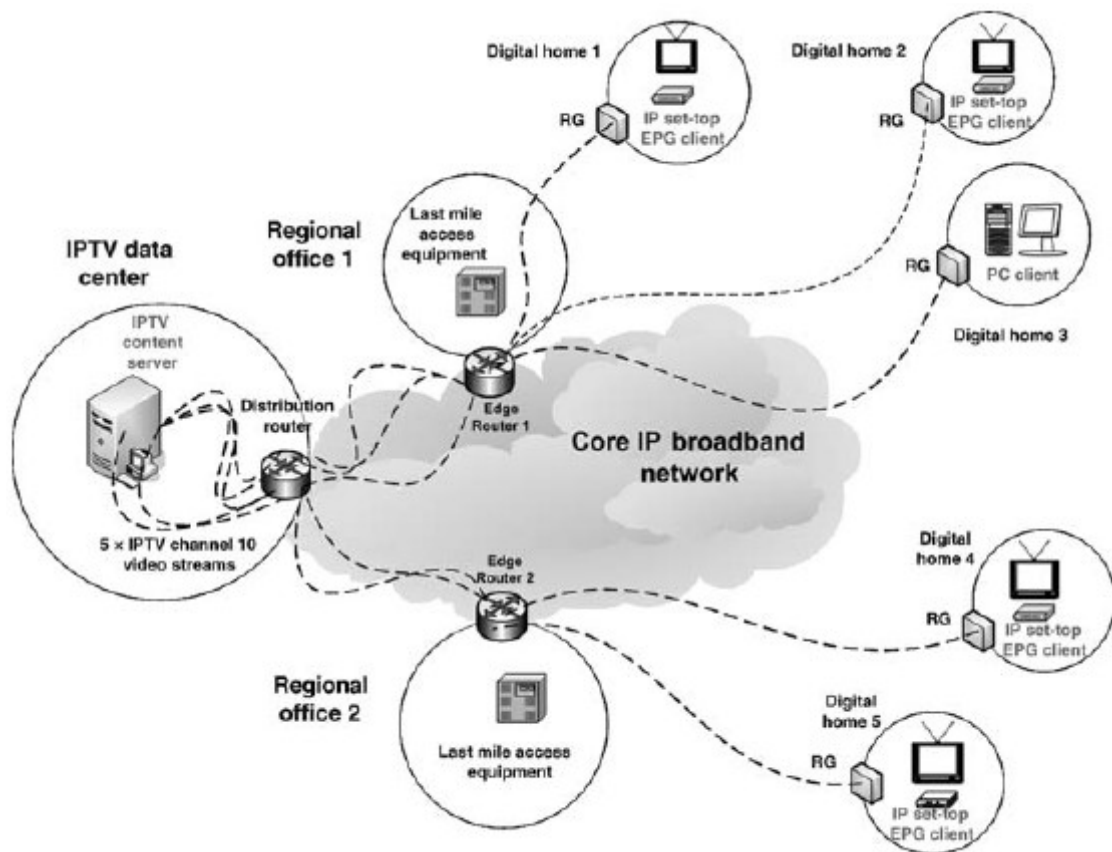
- **Physical Layer.** Το φυσικό επίπεδο αναφέρεται στη διαχείριση των κανόνων που σχετίζονται με τη μεταφορά των bits στο δίκτυο. Επικεντρώνεται στη διανομή των δεδομένων κατά μήκος ενός συγκεκριμένου τύπου φυσικού δικτύου όπως είναι το DOCSIS, το xDSL και τα ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον ορίζει τη φυσική δομή ενός δικτύου (τοπολογία) και τις απαραίτητες μηχανικές και ηλεκτρικές προδιαγραφές για τη χρησιμοποίηση του μέσου μετάδοσης [1].

### 3.12 Μεθοδολογίες διανομής IPTV περιεχομένου

Για τη μετάδοση του IPTV περιεχομένου χρησιμοποιούνται οι unicast, broadcast και multicast τεχνικές.

#### 3.12.1 Unicast

Στη unicast μετάδοση μία IPTV ροή αποστέλλεται σε μια IPTVCD. Εάν περισσότεροι του ενός συνδρομητών επιθυμούν να παρακολουθήσουν το ίδιο κανάλι κάθε IPTVCD απαιτεί μία ξεχωριστή unicast ροή. Η μεθοδολογία αυτή είναι απλή στην υλοποίηση της εντούτοις όμως δεν κάνει αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Παραδείγματος χάριν εάν πέντε συνδρομητές επιθυμούν να λάβουν το ίδιο κανάλι, ο server παρέχει πέντε ξεχωριστές ροές μια για κάθε συνδρομητή που απαιτεί την πρόσβαση σε αυτό το κανάλι (σχήμα 3.18). Αυτή η μέθοδος διανομής βίντεο είναι κατάλληλη για VoD εφαρμογές αλλά και για εφαρμογές ψηφιακής καταγραφής βίντεο (Network Based Digital Video Recording - NDVR).



Σχήμα 3.18 Unicast συνδέσεις χρηστών ενός καναλιού [1]

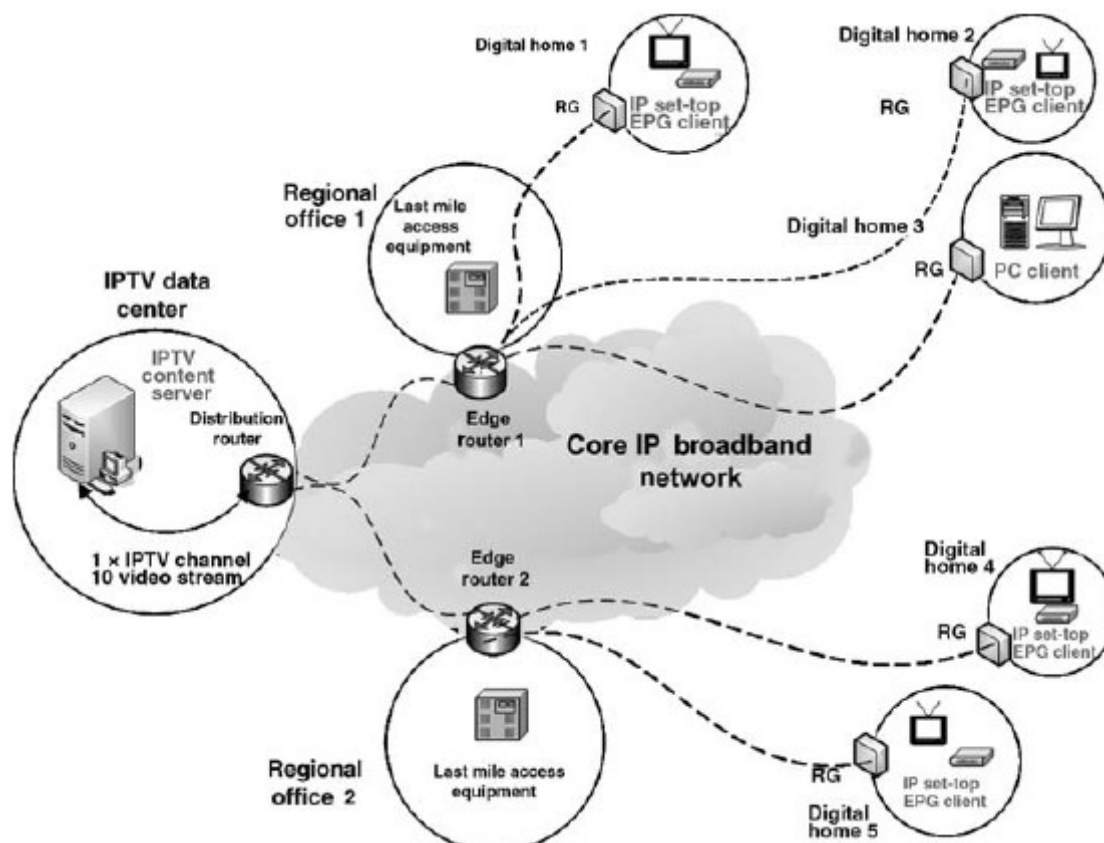
### **3.12.2 Broadcast**

Τα IP δίκτυα υποστηρίζουν επίσης τη λειτουργία της broadcast μετάδοσης, όπου ένα IPTV κανάλι αποστέλλεται σε κάθε IPTVCD που συνδέεται με το ευρυζωνικό δίκτυο ανεξαρτήτως αν οι συνδρομητές έχουν ζητήσει το τηλεοπτικό αυτό ρεύμα ή όχι. Αυτό το ζήτημα είναι σημαντικό επειδή οι πόροι των IPTVCDs είναι απασχολούνται με την επεξεργασία και των ανεπιθύμητων τηλεοπτικών πακέτων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό το οποίο καθιστά τη broadcast μετάδοση ακατάλληλη για τις IPTV εφαρμογές είναι το γεγονός ότι αυτή η τεχνική μετάδοσης δεν υποστηρίζει τη δρομολόγηση αφού κάθε κανάλι αποστέλλεται σε όλους τους συνδρομητές ανεξαρτήτως αν αυτοί το έχουν ζητήσει ή όχι. Δεδομένου ότι τα περισσότερα δίκτυα IPTV κάνουν εκτενή χρήση των δρομολογητών η χρήση της broadcast μετάδοσης είναι απαγορευτική.

### **3.12.3 Multicast**

Στην περίπτωση της multicast μετάδοσης κάθε IPTV κανάλι διανέμεται μόνο στα set-top boxes των συνδρομητών που το επιλέγουν. Έτσι μειώνεται η χρήση του απαιτούμενου εύρους ζώνης καθώς και η επεξεργαστική ισχύς του server σε σχέση με τη unicast μετάδοση. Σύμφωνα με το σχήμα 3.19 ένα μόνο αντίγραφο του περιεχομένου αποστέλλεται από το server του IPTV κέντρου δεδομένων στο δρομολογητή διανομής (distribution router). Ο δρομολογητής αυτός δημιουργεί δύο αντίγραφα της ροής και τα αποστέλλει στους δρομολογητές των regional offices μέσω δύο ξεχωριστών IP συνδέσεων. Κατόπιν κάθε ένας από τους δύο αυτούς δρομολογητές κατασκευάζει αντίγραφα των ροών για κάθε έναν από τους συνδρομητές οι οποίοι επιθυμούν να λάβουν τη συγκεκριμένη ροή. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται από τους φορείς παροχής υπηρεσιών για τη διανομή real-time IPTV προγραμμάτων. ωστόσο δε χρησιμοποιεί κάποιο κανάλι επιστροφής για την επικοινωνία των IPTVCDs με το server.





Σχήμα 3.19 IP συνδέσεις multicast τεχνικής [1]

Η πολυεκπομπή εκτός της μείωσης του απαιτούμενου εύρους ζώνης κατά τη διανομή του IPTV περιεχομένου μειώνει και την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ του server. Ωστόσο έχει και κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι:

- **Δεν υποστηρίζει επιλογές VCR.** Η πολυεκπομπή δεν επιτρέπει στους συνδρομητές να κάνουν χρήση των rewind, pause, ή fast-forward λειτουργιών.
- **Περιορισμένη ευελιξία.** Όταν οι συνδρομητές ανοίγουν τους δέκτες τους μπορούν να παρακολουθήσουν το πρόγραμμα ενός καναλιού από το σημείο αναμετάδοσης που βρίσκεται σε εξέλιξη και όχι από την αρχή του προγράμματος όπως ακριβώς συμβαίνει με τις ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες συνδρομητικής τηλεόρασης.
- **Οι δρομολογητές πρέπει να υποστηρίζουν την πολυεκπομπή.** Οι φορείς παροχής υπηρεσιών πρέπει να εξασφαλίσουν ότι οι δρομολογητές που βρίσκονται μεταξύ του IPTV data center και του και των IPTVCDs

υποστηρίζουν την πολυεκπομπή. Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει μόνο για τους δρομολογητές αλλά και για όλα τα συστατικά μέρη ενός IPTV δικτύου.

- **Αύξηση φόρτου εργασίας των δρομολογητών.** Εκτός της διανομής του IPTV περιεχομένου στις σωστές πόρτες οι επιπλέον εργασίες όπως είναι η δημιουργία ροών αντιγράφων στην περίπτωση της πολυεκπομπής προκαλούν επιπλέον φόρτο εργασίας στους δρομολογητές.
- **Περιορισμός της multicast κίνησης.** Κάποιες συσκευές ή προγράμματα ασφαλείας όπως τα firewalls παραμετροποιούνται από τους διαχειριστές του δικτύου και φράσσουν τη διαδικασία της πολυεκπομπής. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα στην περίπτωση όπου ο πάροχος της υπηρεσίας είναι και ιδιοκτήτης του δικτύου ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην περίπτωση παροχής IPTV υπηρεσιών διαμέσου του διαδικτύου [1].

### 3.13 Αρχιτεκτονική πολυεκπομπής δικτύου IPTV

Τα λογικά και φυσικά στοιχεία που απαιτούνται για την πολυεκπομπή των IPTV υπηρεσιών κατηγοριοποιούνται στα εξής:

- Συσκευές IGMP
- Ομάδες πολυεκπομπής και διευθυνσιοδότηση
- IPTV πρωτόκολλα πολυεκπομπής
- Αρχιτεκτονική multicast μετάδοσης

#### 3.13.1 Συσκευές IGMP

Ένας multicast host ρυθμίζεται ώστε να αποστέλλει και να λαμβάνει (ή μόνο να αποστέλλει) multicast δεδομένα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συσκευών που χρησιμοποιούνται σε μια IGMP επικοινωνία:

- **IGMP host.** Ένας IGMP host είναι μία client ή server συσκευή συνδεδεμένη με το IPTV δίκτυο. Σε αυτή την κατηγορία συσκευών ανήκουν τα set-top boxes, οι H/Y και τα κινητά τηλέφωνα.
- **Multicast δρομολογητές.** Οι multicast δρομολογητές οι οποίοι ονομάζονται και IGMP δρομολογητές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες,

τους δρομολογητές διανομής (Distribution Routers - DRs) και τους δρομολογητές συνάθροισης (Aggregation Routers – ARs). Οι δρομολογητές διανομής είναι τοποθετημένοι στο IPTV data center και έρχονται σε άμεση επικοινωνία με τους server που περιέχουν τα αποθηκευμένα δεδομένα (contention servers). Στους δρομολογητές αυτού του είδους είναι διαθέσιμα όλα τα IPTV κανάλια. Οι δρομολογητές συνάθροισης είναι τοποθετημένοι κοντά στο συνδρομητή και σε αυτό το σημείο του δικτύου είναι διαθέσιμα μόνο τα κανάλια που προβάλλονται από τις IPTVCDs. Οι multicast δρομολογητές εκτός της λήψης του περιεχομένου πολυεκπομπής και της δημιουργίας ροών αντιγράφων, λαμβάνουν, διαχειρίζονται και επεξεργάζονται διάφορους τύπους IGMP μηνυμάτων. Επίσης διατηρούν κάποιους πίνακες δρομολόγησης ενήμερους οι οποίοι είναι οι ίδιοι πίνακες που χρησιμοποιούνται από τα unicast πρωτόκολλα που παραμετροποιούνται στο δρομολογητή. Αυτοί οι πίνακες ενημερώνονται από το λειτουργικό σύστημα των δρομολογητών. Όλες αυτές οι εργασίες αυξάνουν τις επεξεργαστικές απαιτήσεις του δρομολογητή και συνεπώς η πολυεκπομπή έχει σοβαρές επιπτώσεις στην απόδοση των δρομολογητών [1].

### **3.13.2 Ομάδες πολυεκπομπής και διευθυνσιοδότηση**

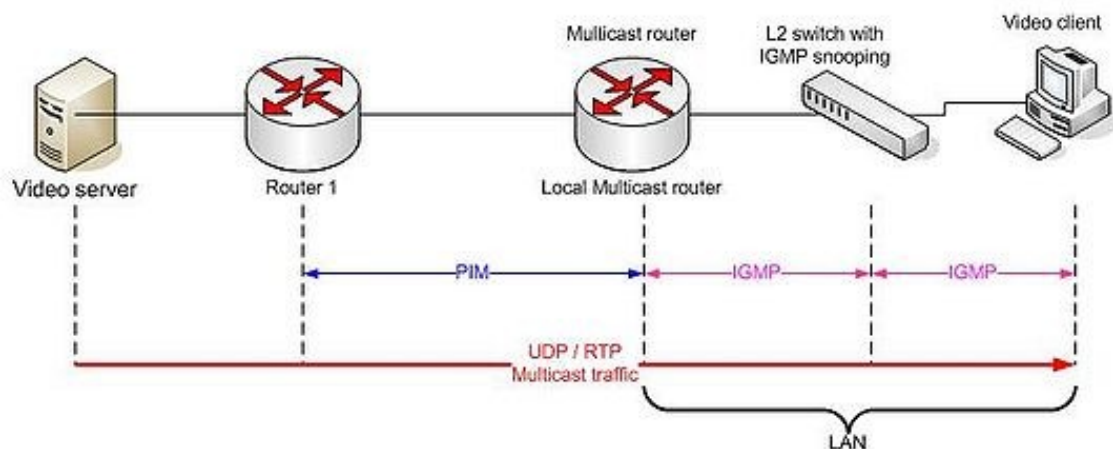
Η πολυεκπομπή είναι μία τεχνολογία η οποία επιτρέπει την one-to-many και τη many-to-many διανομή δεδομένων. Οι διάφορες πηγές αποστέλλουν τα δεδομένα τους σε μία IP multicast διεύθυνση ενώ οι hosts εκδηλώνουν το ενδιαφέρον τους για τη λήψη των δεδομένων από αυτή τη διεύθυνση η οποία προσδιορίζει τη multicast ομάδα. Η ομάδα αυτή προσδιορίζεται από μια IP διεύθυνση κλάσης D με εύρος IP διευθύνσεων από 224.0.0.0 έως 239.255.255.255. Εάν ο αποστολέας και ο δέκτης μίας multicast ομάδας είναι στο ίδιο τοπικό δίκτυο (subnet) τότε δεν απαιτείται η χρήση κάποιου πρωτοκόλλου πολυεκπομπής.

### 3.13.3 IPTV πρωτόκολλα πολυεκπομπής

Η multicast μετάδοση χρησιμοποιεί κάποια εξειδικευμένα πρωτόκολλα για τη δημιουργία ροών αντιγράφων και τη διανομή του IPTV περιεχομένου. Το κύριο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή για τη συμμετοχή/ αποχώρηση μιας IPTVCD σε/από μία multicast ομάδα είναι το IGMP. Το IGMP χρησιμοποιείται τόσο από ένα host όσο και από τους multicast δρομολογητές [20] όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.20. Λειτουργεί στο επίπεδο μεταφοράς πάνω από το επίπεδο διαδικτύου του TCP/IP μοντέλου, αν και στη πραγματικότητα δεν ενεργεί ως πρωτόκολλο μεταφοράς. Ως προς την ασφάλεια είναι ευάλωτο σε «επιθέσεις» ενώ τα firewalls επιτρέπουν στο χρήστη την απενεργοποίησή του. Το IGMP χρησιμοποιείται μόνο από το IPv4 [20]. Οι διαθέσιμες εκδόσεις του IGMP για το IPv4 είναι η IGMPv1, η IGMPv2 και η IGMPv3 ενώ το αντίστοιχο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται από το IPv6 είναι το MLD (Multicast Listener Discovery).

#### 3.13.3.1 IGMPv1

Το IGMPv1 υποστηρίζει δύο τύπους μηνυμάτων, τα host membership query και τα host membership report μηνύματα. Ένα host membership query μήνυμα αποστέλλεται από το multicast δρομολογητή επιτρέποντάς του να εξετάσει



Σχήμα 3.20 Αρχιτεκτονική multicast διανομής με τη χρήση του IGMP [19].

κάποιες λεπτομέρειες των ιδιοτήτων των μελών της multicast ομάδας ενώ ένα host membership report μήνυμα αποστέλλεται από το set top box προκειμένου να ενημερώσει τον τοπικό δρομολογητή για την επιθυμία του να συμμετάσχει σε μια multicast ομάδα. Η πρώτη έκδοση του IGMP χρησιμοποιείται σπάνια σήμερα. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα τα περισσότερα IPTV συστήματα κάνουν χρήση είτε της δεύτερης είτε της τρίτης έκδοσης του IGMP.

### 3.13.3.2 IGMPv2

Το IGMPv2 αποτελεί προς το παρόν το default πρωτόκολλο για τη λήψη ενός συγκεκριμένου IPTV καναλιού. Η δεύτερη έκδοση του IGMP δημιουργήθηκε εξαιτίας της αδυναμίας της πρώτης έκδοσης του να υποστηρίξει τη δυνατότητα αποχώρησης ενός μέλους από τη multicast ομάδα (δηλαδή την αλλαγή καναλιού) και συνεπώς υποστηρίζει την πολυεκπομπή IPTV κίνησης. Όλα τα IGMPv2 μηνύματα ενθυλακώνονται μέσα σε IP datagrams.

Ο σκοπός του multicast δρομολογητή είναι η περιοδική αποστολή query μηνυμάτων στο δίκτυο. Όπως και στο IGMPv1 χρησιμοποιείται ένα membership query μήνυμα το οποίο διακρίνεται σε δύο τύπους, στο general και στο group specific. Τα general μηνύματα χρησιμοποιούνται για την εύρεση των καναλιών που παρακολουθεί ένας συγκεκριμένος συνδρομητής ενώ τα group specific queries μηνύματα χρησιμοποιούνται για την εύρεση των συνδρομητών που παρακολουθούν μία συγκεκριμένη IPTV multicast ροή. Επιπλέον τα μηνύματα αυτά προσδιορίζουν εάν συνέβη κάποιο σφάλμα κατά την είσοδο του συνδρομητή στη multicast ομάδα ή κατά την αποχώρηση του από αυτή. Στην έκδοση αυτή μόνο ένας multicast δρομολογητής επιτρέπεται να αποστέλλει query μηνύματα στη multicast ομάδα η οποία προσδιορίζεται από την IP διεύθυνση 224.0.0.1. Ο δρομολογητής αυτός ενδέχεται να λάβει IGMP μηνύματα και από κάποιον άλλο δρομολογητή. Ελέγχοντας ένα τέτοιο μήνυμα εάν η IP διεύθυνση είναι μικρότερη της διεύθυνσης αυτού τότε ο δεύτερος δρομολογητής είναι αυτός ο οποίος θα αποστέλλει query μηνύματα. Στο IGMPv1 αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με κάποια άλλη πολιτική δρομολόγησης.

Όταν ένας IGMP host αποστέλλει μέσω του EPG ένα αίτημα στο set-top box για να λάβει ένα κανάλι (join process), τότε το λειτουργικό σύστημα ή το middleware

λογισμικό (μεσισμικό) του παράγει τη διεύθυνση του καναλιού που θέλει να λάβει. Τότε το set-top box αποστέλλει ένα host membership report μήνυμα στον τοπικό δρομολογητή. Ο τοπικός δρομολογητής εξετάζει εάν ήδη λαμβάνει τη multicast ροή. Εάν ναι απλώς την αντιγράφει και την αποστέλλει στο set-top box. Εάν η ροή αυτή δεν είναι διαθέσιμη ο τοπικός δρομολογητής αποστέλλει ένα αίτημα στο δίκτυο για να λάβει τη ροή. Το δίκτυο αποκρίνεται με μία ροή η οποία αντιγράφεται από τον τοπικό δρομολογητή.

Το IGMPv2 χρησιμοποιεί ένα επιπλέον μήνυμα το οποίο ονομάζεται leave group. Για την αποχώρηση από τη multicast ομάδα (leave process) αρχικά το set-top box λαμβάνει μία εντολή αλλαγής καναλιού από το συνδρομητή. Κατόπιν αποστέλλεται ένα leave group μήνυμα το οποίο περιέχει την IP διεύθυνση του καναλιού αυτού σε όλους τους multicast δρομολογητές μέσω της 224.0.0.2 IP διεύθυνσης. Στην περίπτωση αυτή το μήνυμα αυτό λαμβάνεται από το δρομολογητή του IPTV κέντρου δεδομένων. Κατόπιν ο δρομολογητής στέλνει ένα specific group query μήνυμα για να ελεγχθεί αν υπάρχουν άλλες IPTVCDs οι οποίες επιθυμούν να συνεχίσουν να λαμβάνουν το συγκεκριμένο IPTV κανάλι δηλαδή να διαπιστωθεί εάν αυτός ο αποστολέας ήταν ο τελευταίος της multicast ομάδας. Το μήνυμα αυτό μειώνει την καθυστέρηση που σχετίζεται με τη διαδικασία διακοπής της μετάδοσης μιας IPTV ροής από το multicast δρομολογητή όταν δεν υπάρχουν μέλη στη multicast ομάδα. Το χαρακτηριστικό αυτό μειώνει την πιθανότητα συμφόρησης του δικτύου η οποία μπορεί να προκαλεί κακής ποιότητας διανομή περιεχομένου στους άλλους συνδρομητές, με το εύρος ζώνης να διατίθεται σε άλλους χρήστες. Το leave group μήνυμα ακολουθείται από ένα membership report μήνυμα το οποίο χρησιμοποιείται ως απόκριση σε ένα query μήνυμα για την αλλαγή ενός IPTV καναλιού που ο χρήστης παρακολουθεί (solicited membership report).

### 3.13.3.3 IGMPv3

Η αρχική έκδοση του IGMP υποστήριζε τόσο την one-to-many όσο και την many-to-many επικοινωνία, μοντέλο γνωστό ως Any-Source Multicast (ASM). Τυπικό παράδειγμα many-to-many επικοινωνίας αποτελούν εφαρμογές όπως αυτή του online gaming όπου όλοι οι συμμετέχοντες μπορούν να χαρακτηριστούν ως πηγές. Πιο συγκεκριμένα όταν ένας host επιθυμεί να συμμετάσχει σε μία multicast ομάδα

το δίκτυο προσδιορίζει όλες τις πηγές αυτής της ομάδας οι οποίες θα διανείμουν κάποιο περιεχόμενο στο host. Ωστόσο το IGMPv3 χρησιμοποιεί το Source-Specific Multicast (SSM) μοντέλο το οποίο ακολουθεί την one-to-many επικοινωνία και το οποίο υποστηρίζει την πολυεκπομπή από μία συγκεκριμένη πηγή [A]. Συγκεκριμένα επιτρέπεται σε μια IPTVCD να προσδιορίσει ρητά ποια κανάλια επιθυμεί να λάβει. Συνεπώς τα IGMPv3 μηνύματα περιέχουν την IP διεύθυνση της multicast ομάδας στην οποία ανήκουν αλλά και τη unicast διεύθυνση της πηγής του συγκεκριμένου καναλιού (server) μέσω του (S, G) συνδυασμού, με το S αναπαριστά τη unicast διεύθυνση του ενός συγκεκριμένου server και το G να αναπαριστά τη διεύθυνση της multicast ομάδας ενός συγκεκριμένου καναλιού. Το εύρος των IP διευθύνσεων που χρησιμοποιείται κατά την υλοποίηση του SSM μοντέλου κυμαίνεται από 232.0.0.0 έως 232.255.255.255. Το IGMPv3 επιτρέπει επίσης στις IPTV συσκευές να προσδιορίσουν τις διευθύνσεις των πηγών από τις οποίες δεν επιθυμούν να λαμβάνουν περιεχόμενο. Η SSM προσέγγιση βελτιώνει την ασφάλεια και τη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Τα membership query μηνύματα του IGMPv3 είναι όμοια με αυτά του IGMPv2. Η μόνη βελτίωση αυτής της έκδοσης αφορά τη δημιουργία ενός “Group-and-Source-Specific Query” μηνύματος. Στις προηγούμενες εκδόσεις του IGMPv3 απαιτείται μόνος ένας host να αποκριθεί σε ένα query μήνυμα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κίνησης στο δίκτυο. Ωστόσο στο IGMPv3 όλοι οι hosts αποστέλλουν ένα membership report μήνυμα στη 224.0.0.22 IP διεύθυνση η οποία αποτελεί την IP διεύθυνση των IGMPv3 multicast δρομολογητών.

Με τη χρήση του IGMPv2 πρωτοκόλλου η αλλαγή ενός καναλιού απαιτεί τέσσερα διαφορετικά βήματα:

- Το set-top box αποστέλλει ένα leave group μήνυμα.
- Ο multicast δρομολογητής στο regional office ή στο IPTV κέντρο δεδομένων αποκρίνεται ένα query μήνυμα.
- Το set-top box αποκρίνεται στο query μήνυμα με ένα membership report μήνυμα.
- Το set-top box ερμηνεύει το membership report μήνυμα και παραμετροποιεί τη διεπαφή του σύμφωνα με τις οδηγίες που περιέχονται στο report μήνυμα.

Τα αντίστοιχα βήματα που απαιτούνται με το IGMPv3 πρωτόκολλο είναι μόνο δύο καθιστώντας την εναλλαγή καναλιών πιο γρήγορη. Ένα membership report μήνυμα από το set-top box και τις αντίστοιχες ενέργειες από το multicast δρομολογητή. Ο νέος αυτός τύπος membership report μηνύματος χρησιμοποιείται για την είσοδο και την αποχώρηση ενός συνδρομητή από τη multicast ομάδα. Συνεπώς το IGMPv3 δε διαθέτει κάποιο ξεχωριστό μήνυμα για την αποχώρηση του συνδρομητή από τη multicast ομάδα. Μία ακόμη σημαντική βελτίωση στη διαδικασία αποχώρησης από μία multicast ομάδα είναι ότι ένας IGMPv3 host αποστέλλει ένα membership report μήνυμα από την IP διεύθυνση της multicast ομάδας στην 224.0.0.22 IP διεύθυνση ενώ στις προηγούμενες εκδόσεις του πρωτοκόλλου το μήνυμα αποχώρησης από τη multicast ομάδα αποστέλλεται από την IPTVCD στην αντίστοιχη IP διεύθυνση των IGMPv2 δρομολογητών (224.0.0.2).

Μία ακόμη σημαντική βελτίωση του IGMPv3 έγγυται στο ότι ένας συνδρομητής μπορεί να σταματήσει να λαμβάνει περιεχόμενο από ένα συγκεκριμένο IPTV server δηλώνοντας αυτή του την επιθυμία μέσα από τη multicast ομάδα με ένα membership report μήνυμα στην 224.0.0.22 IP διεύθυνση σε αντίθεση με τις προηγούμενες εκδόσεις όπου μία IPTVCD έπρεπε να αποστείλει ένα leave group μήνυμα στην αντίστοιχη IP διεύθυνση των IGMPv2 δρομολογητών (224.0.0.2) [1].

Το IGMPv3 υποστηρίζεται επίσης από το DOCSIS 3.0 πρωτόκολλο.

### **3.13.4 Αρχιτεκτονική multicast μετάδοσης**

Η διανομή περιεχομένου βίντεο κατά μήκος ενός IP δικτύου χρησιμοποιεί κάποιες εξειδικευμένες τεχνολογίες και πρωτόκολλα δρομολόγησης τα οποία είναι:

- Δέντρα multicast μετάδοσης
- Πρωτόκολλα multicast δρομολόγησης

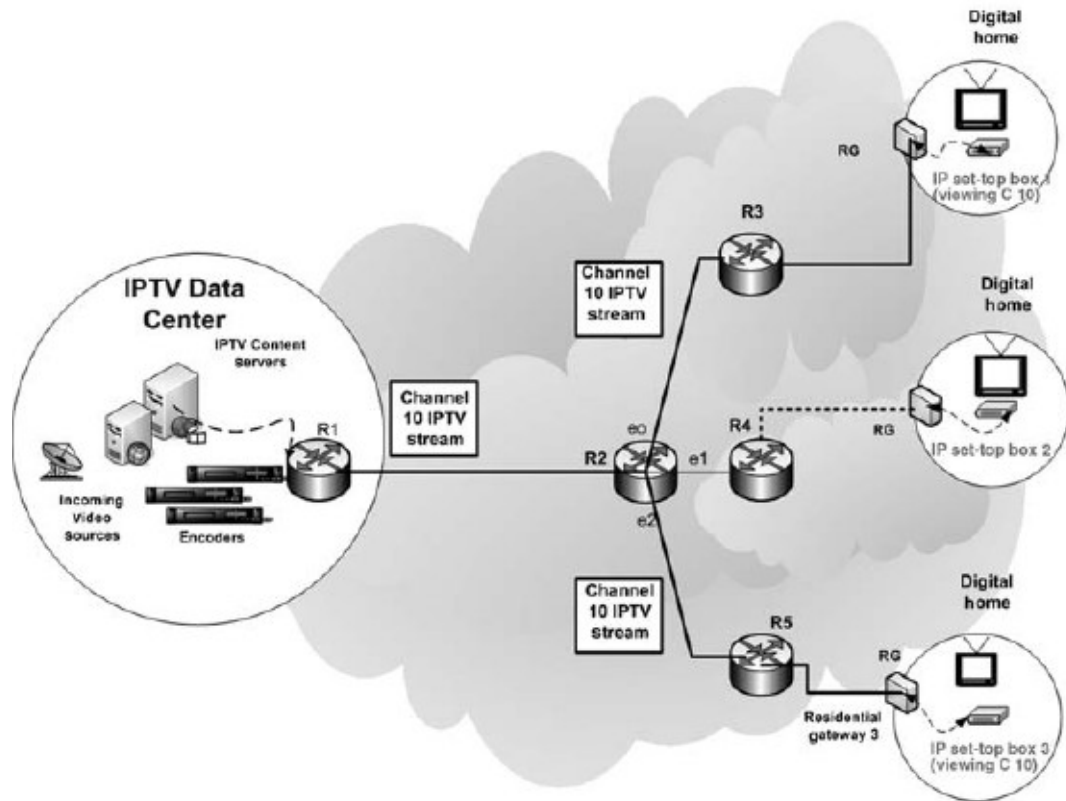
#### **3.13.4.1 Δέντρα multicast μετάδοσης**

Ένα δέντρο multicast μετάδοσης χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική διανομή υπηρεσιών τηλεόρασης από το server του IPTV data center ή ενός εκ των regional offices στις διάφορες IPTVCDs. Ο multicast δρομολογητής χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που λαμβάνει από το IGMP πρωτόκολλο για τη δημιουργία λιστών από κόμβους (δρομολογητές) οι οποίες απεικονίζουν τη διαδρομή που

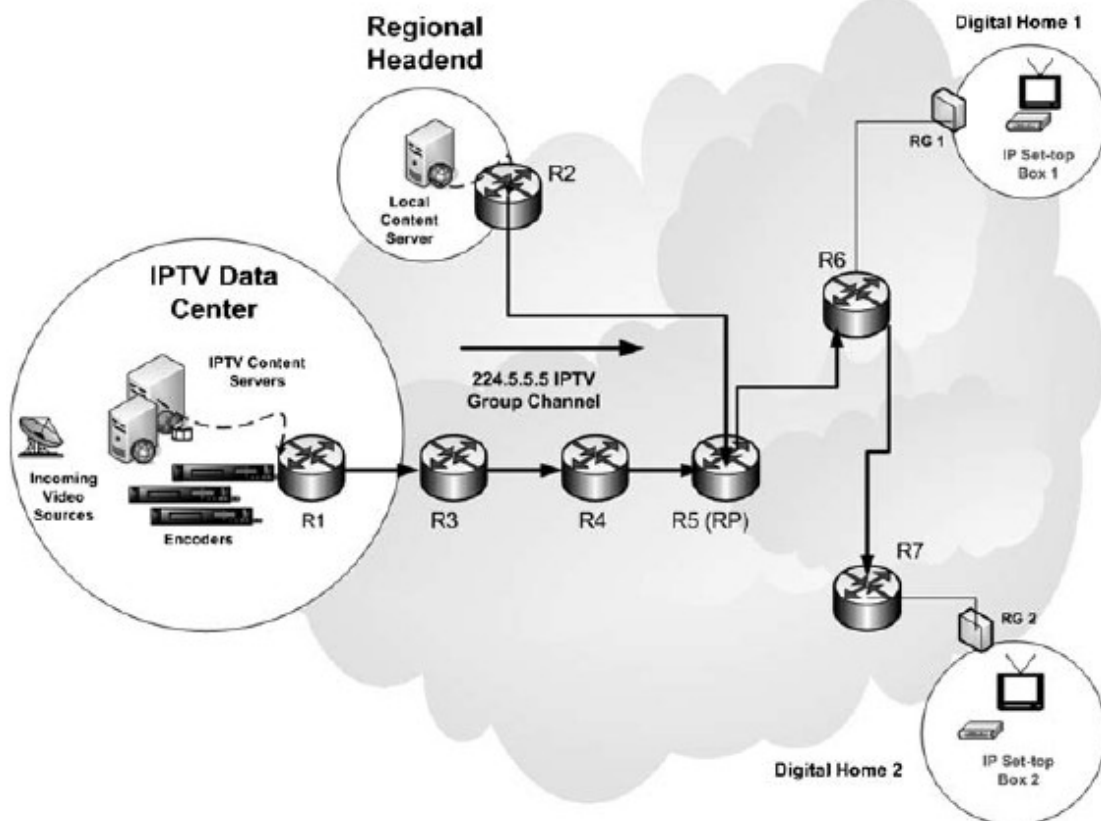


ακολουθούν τα IPTV πακέτα για να φθάσουν στον προορισμό τους. Αυτές οι λίστες κόμβων ή οι διαδρομές ονομάζονται δέντρα multicast μετάδοσης και διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες:

- **Source trees.** Αυτός ο τύπος δέντρων (σχήμα 3.21) ορίζει το συντομότερο δυνατό μονοπάτι από την πηγή διανομής του IPTV περιεχομένου σε μια IPTVCD έτσι ώστε οι καθυστερήσεις να είναι οι ελάχιστες δυνατές και ονομάζονται και SPT (Shortest Path Tree). Μέλη αυτού αποτελούν οι δρομολογητές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διανομή ροών βίντεο σε ένα set-top box. Γενικά η δομή ενός τέτοιου δέντρου αλλάζει όταν μία IPTVCD προστίθεται ή αποχωρεί από τη multicast ομάδα. Εκτός από τον προσδιορισμό διαδρομών δρομολόγησης, τα δέντρα αυτά χρησιμοποιούνται από τους multicast δρομολογητές για την αποτελεσματική διαχείριση ροών αντιγράφων σε διάφορα τμήματα του δικτύου.
- **Shared trees** Ένα shared tree δε θέτει ως ρίζα του το server στο IPTV data center ή το server ενός regional office αλλά ένα δρομολογητή ή πολλούς δρομολογητές οι οποίοι ονομάζονται RPs (Rendezvous Points) και ενεργούν ως ενδιάμεσες συσκευές μεταξύ των IPTV servers και των IPTVCDs (σχήμα 3.22). Ένα shared tree προσδιορίζεται από το (S, G) που συζητήθηκε προηγουμένως. Όταν στη θέση του S χρησιμοποιείται το "\*" τότε αυτό αναπαριστά όλους τους servers. Η χρήση του "\*" καταργεί την ανάγκη για ένα set-top box να γνωρίζει την IP διεύθυνση του server από τον οποίο θέλει να λάβει κάποιο IPTV κανάλι καθώς αυτή η πληροφορία περιέχεται στο RP. Αυτός ο τύπος δέντρου απαιτεί λιγότερους πόρους σε υλικό σε σύγκριση με ένα SPT ωστόσο ενδέχεται να εισάγει καθυστερήσεις σε κάποια μονοπάτια επειδή ολόκληρη η κίνηση διαβιβάζεται στο RP. Η ανεκτικότητα στην καθυστέρηση που προκαλείται ποικίλει από δίκτυο σε δίκτυο.



Σχήμα 3.21 Απλοποιημένο παράδειγμα IPTV multicast SPT [1]



Σχήμα 3.22 Απλοποιημένο παράδειγμα IPTV multicast διαμοιραζόμενου δέντρου [1]

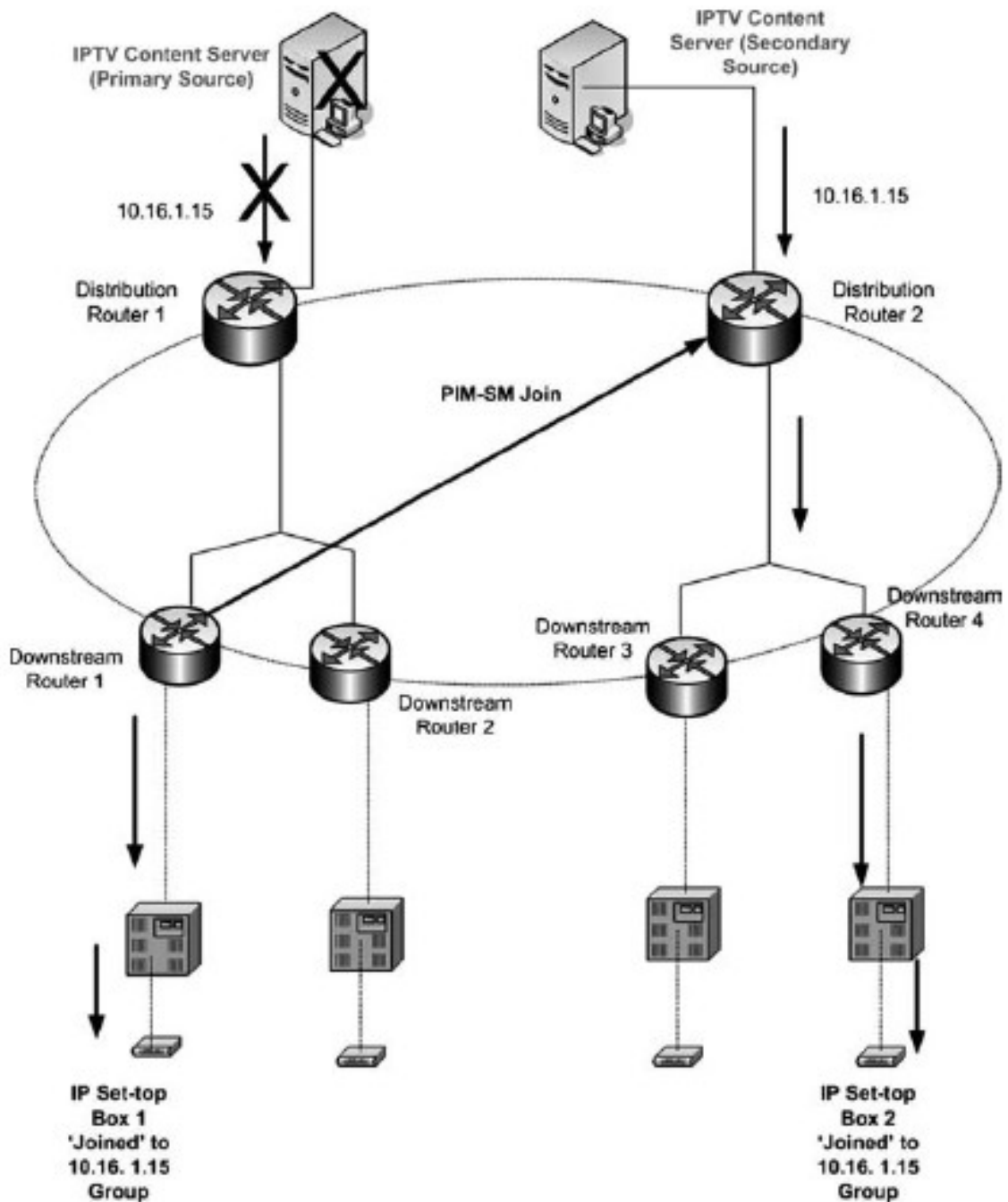
### 3.13.4.2 Πρωτόκολλα multicast δρομολόγησης

Για τη δημιουργία των multicast δέντρων διανομής χρησιμοποιείται το PIM (Protocol Independent Multicast) πρωτόκολλο. Για τη διανομή διαφορετικών τύπων υπηρεσιών χρησιμοποιούνται οι εξής τέσσερις εκδοχές του PIM πρωτοκόλλου:

- **PIM Dense Mode (PIM-DM).** Η λειτουργία του βασίζεται στη διανομή των πακέτων σε όλους τους δρομολογητές στο δίκτυο. Οι δρομολογητές για τους οποίους δεν υπάρχουν μέλη στη multicast ομάδα αποστέλλουν ένα “leave” μήνυμα στη πηγή από την οποία προέρχονται τα πακέτα για την παύση της μετάδοσης πακέτων σε αυτό το τμήμα του δικτύου. Αυτή η εκδοχή του PIM όπου αποστέλλει πακέτα σε όλους τους δρομολογητές καταναλώνει μεγάλο εύρος ζώνης και χρησιμοποιείται σπάνια από ένα IPTV δίκτυο συνήθως για την υποστήριξη IP εφαρμογών που λειτουργούν στα πλαίσια LAN δικτύων.
- **PIM Sparse Mode (PIM-SM).** Αυτή η εκδοχή του PIM πρωτοκόλλου σχεδιάστηκε για τη διανομή των multicast ροών κατά μήκος WAN δικτύων, μόνο σε IPTVCDs οι οποίες έχουν εκφράσει επιθυμία να λάβουν κάποιο κανάλι. Συνεπώς αυτή η τεχνική βοηθά στην εξοικονόμηση εύρους ζώνης. Συγκεκριμένα καθορίζει πώς οι δρομολογητές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για τη δημιουργία και τη συντήρηση των διάφορων τύπων δέντρων multicast διανομής. Η υλοποίηση του PIM-SM μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση και την αποκατάσταση της λειτουργίας τμημάτων του δικτύου στην περίπτωση που κάποιος server παύσει να λειτουργεί servers. Στο σχήμα 3.23 και οι δύο servers αποστέλλουν πακέτα στην ίδια multicast διεύθυνση κάθε multicast δέντρου. Έτσι στην περίπτωση που διακόπτεται η λειτουργία του ενός server το PIM-SM ανιχνεύει αυτό το σφάλμα και επαναπροσδιορίζει το μονοπάτι της αποστολής των πακέτων. Το PIM-SM αποστέλλει ένα “join” αίτημα για την πρόσβαση στο server που συνεχίζει να λειτουργεί έτσι ώστε το set-top box που επηρεάστηκε από το σφάλμα του πρώτου server να συνεχίσει να λαμβάνει πακέτα από το δεύτερο.
- **PIM source specific multicast (PIM-SSM).** Το πρωτόκολλο αυτό προκύπτει από το PIM-SM και όπως υποδηλώνει και το όνομά του υποστηρίζει τη source specific πολυεκπομπή του IGMPv3 πρωτοκόλλου η

οποία επιτρέπει στις IPTVCDs να καθορίσουν ποια IPTV κανάλια θέλουν να λάβουν.

- **Bidirectional PIM (BIDIR-PIM)** Το PIM-SM αδυνατεί να υποστηρίξει source τύπους δέντρων. Αυτή η αδυναμία του PIM-SM αντιμετωπίζεται με τη χρήση του BIDIR-PIM.



Σχήμα 3.23 Παράδειγμα χρήσης του πρωτοκόλλου PIM-SM [1]

### 3.13.4.3 Λειτουργία IGMP Snooping και IGMP proxy

Η IGMP snooping λειτουργία είναι μια διαδικασία ακρόασης της IGMP κίνησης και επιτρέπει σε ενδιάμεσες συσκευές όπως είναι τα switches, τα DSLAMs και τα DOCSIS 3.0 CMTSs την ακρόαση των «συνομιλιών» μεταξύ των hosts και των δρομολογητών. Η IGMP snooping λειτουργία αποτρέπει τους hosts ενός τοπικού δικτύου να λαμβάνουν κίνηση η οποία προορίζεται για μία multicast ομάδα της οποίας δεν είναι μέλη. Συνεπώς αυτή η λειτουργία περιορίζει την άσκοπη χρήση του εύρους ζώνης και της επεξεργαστικής δυνατότητας των σταθμών από δεδομένα που δεν τους αφορούν [21].

Μία υποκατηγορία της IGMP snooping είναι η IGMP proxy λειτουργία. Η IGMP proxy λειτουργία επιτρέπει σε συσκευές όπως είναι τα DSLAMs και τα CMTSs την αποστολή IGMP μηνυμάτων αντί της αποστολής αυτών των μηνυμάτων από τις IPTVCDs μέσω των ενεργοποιημένων IGMP διεπαφών. Οι IPTVCDs λαμβάνουν αυτά τα μηνύματα μέσω των ενεργοποιημένων IGMP διεπαφών των δρομολογητών τους. Η ενεργοποίηση της IGMP proxy λειτουργίας σε ένα DSLAM ή ένα CMTS σε ένα HFC δίκτυο επιτρέπει σε αυτές τις συσκευές να ενεργούν σαν proxy, δηλαδή σαν IGMP servers για τις IPTVCDs και ως client για τους δρομολογητές διανομής καθιερώνοντας δύο μονοπάτια σηματοδότησης, ένα μονοπάτι μεταξύ της IPTVCD και της τερματικής συσκευής στο regional office (DSLAM, CMTS) και ένα μονοπάτι μεταξύ αυτών των συσκευών στο regional office και του δρομολογητή διανομής [1].

Η IGMP proxy λειτουργία αποτελεί μία απλούστερη υλοποίηση της multicast δρομολόγησης, συνεπώς κατά την υλοποίηση της δεν απαιτείται η χρήση multicast πρωτοκόλλων δρομολόγησης όπως είναι το PIM-SM. και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου το PIM-SM δε μπορεί να υλοποιηθεί για κάποιο λόγο. Ενεργοποιείται με τη σύνδεση μιας μοναδικής upstream διεπαφής στον κοντινότερο δρομολογητή στη ρίζα του δέντρου και μέσω της σύνδεσης μίας ή περισσότερων downstream διεπαφών προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αν αυτές οι διεπαφές στο δρομολογητή δεν είναι ενεργοποιημένες σαν IGMP proxy διεπαφές τότε η IGMP κίνηση σε αυτές αγνοείται. Σε σύγκριση με το PIM πρωτόκολλο η IGMP proxy δεν υποστηρίζει περισσότερες από μία upstream διεπαφές, απαιτεί λιγότερους πόρους ωστόσο και η χρήση της δεν είναι κατάλληλη σε περίπτωση κάποιας πολύπλοκης multicast δρομολόγησης [22].

Οι αρμοδιότητες της IGMP proxy λειτουργίας είναι:

- Η αποστολή solicited membership report μηνυμάτων.
- Η αποστολή unsolicited membership report μηνυμάτων δηλαδή μηνυμάτων που ενεργοποιούνται από τις IPTVCDs όταν θέλουν να γίνουν μέλη κάποιας multicast ομάδας.
- Η αντιγραφή IPTV ροών και η αποστολή τους στις IPTVCDs.
- Η αποστολή unsolicited membership report μηνυμάτων στη 224.0.0.2 IP διεύθυνση όταν η τελευταία IPTVCD θέλει να αποχωρήσει από μία multicast ομάδα [1].

### 3.14 Λειτουργία αλλαγής καναλιών

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της μετάδοσης real-time περιεχομένου σε ένα IP δίκτυο είναι η ταχύτητα με την οποία οι χρήστες μπορούν να μεταβούν από ένα κανάλι σε ένα άλλο κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης αυτών. Σε ένα IPTV δίκτυο η διαδικασία αλλαγής καναλιού πραγματοποιείται σε ένα server σε αντίθεση με ένα παραδοσιακό περιβάλλον τηλεόρασης όπου η λειτουργία αυτή λαμβάνει χώρα στο set-top box. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το set-top box αλληλεπιδρά με το δίκτυο κατά τη διάρκεια της αλλαγής καναλιών, είναι πιθανό να προξενήσει καθυστερήσεις εκτός από τις ήδη υπάρχουσες καθυστερήσεις που προκαλούνται από το IPTV data center, το δίκτυο και τις συσκευές στο οικιακό περιβάλλον. Συνεπώς οι καθυστερήσεις που εισάγονται στη διαδικασία εναλλαγής καναλιού είναι αποτέλεσμα καθυστερήσεων στους εξής τρεις τομείς:

- **Στο IPTV data center.** Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη διαδικασία αλλαγής καναλιών στο IPTV data center είναι:
- *Το σύστημα κωδικοποίησης.* Η κωδικοποίηση του προς μετάδοση περιεχομένου επιφέρει καθυστέρηση σε ένα νέο κανάλι που ο συνδρομητής επιθυμεί να παρακολουθήσει.
- *Τα υπό όρους πρόσβασης (Conditional Access - CA) συστήματα και τα συστήματα διαχείρισης ψηφιακών δικαιωμάτων (Digital Rights Management - DRM) συστήματα.* Λειτουργίες όπως η κρυπτογράφηση των καναλιών για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων, η παραγωγή κλειδιών και η αποστολή των κλειδιών κρυπτογράφησης στο δίκτυο, μπορούν να προξενήσουν επιπλέον καθυστέρηση στη διαδικασία αλλαγής ενός

καναλιού. Επιπλέον η χρήση των DRM συστημάτων περιπλέκει τις λειτουργίες ασφαλείας και συνεπώς εισάγει επιπλέον καθυστερήσεις. Ωστόσο το middleware γενικά δεν έχει επίδραση στο χρόνο εκτέλεσης ενός αιτήματος αλλαγής καναλιού.

- **Στο δίκτυο.** Όταν ένα IPTV κανάλι ετοιμάζεται για μετάδοση προωθείται στο δρομολογητή διανομής ο οποίος αναλαμβάνει τη δρομολόγησή του στο δίκτυο. Σε ένα δίκτυο διανομής οι διάφοροι δρομολογητές, οι φυσικές συνδέσεις, και τα regional offices όπως τα DSLAMs, μπορούν να εισάγουν καθυστέρηση σε ένα αίτημα αλλαγής καναλιών. Η ταχύτητα με την οποία τα DSLAMs και οι δρομολογητές αποκρίνονται στα IGMP αιτήματα συμμετοχής και αποχώρησης σε/από μία multicast ομάδα είναι καίριας σημασίας για τη διατήρηση του χρόνου απόκρισης σε ένα αίτημα αλλαγής καναλιού σε χαμηλά επίπεδα. Το RTSP πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται γενικά για την εγκαθίδρυση μιας unicast σύνδεσης, μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να χρησιμοποιηθεί για την πρόσβαση σε ένα multicast κανάλι μέσω διάφορων μηνυμάτων αίτησης και απόκρισης. Συνεπώς και αυτό μπορεί να εισάγει επιπλέον καθυστερήσεις. Τέλος επίδραση στο χρόνο αλλαγής ενός καναλιού υπάρχει ανάλογα με το ποιο από τα PIM πρωτόκολλα και ποια από τις εκδόσεις του IGMP πρωτοκόλλου χρησιμοποιούνται.
- **Στο οικιακό περιβάλλον.** Σε ένα οικιακό περιβάλλον η ταχύτητα αλλαγής καναλιού μπορεί να επηρεαστεί από τους ακόλουθους παράγοντες:
- **Αποκωδικοποίηση.** Η αποκωδικοποίηση του εισερχόμενου συμπιεσμένου σήματος στην IPTVCD διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις καθυστερήσεις που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της αλλαγής των καναλιών. Για παράδειγμα κατά τη χρήση του MPEG αλγορίθμου συμπίεσης, μια IPTVCD απαιτείται να περιμένει ένα I-frame πριν ξεκινήσει η αποκωδικοποίηση της εισερχομένης ροής. Όπως ήδη γνωρίζουμε το I-frame περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται για την αναδημιουργία της κωδικοποιημένης εικόνας. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την άφιξη ενός I-frame εξαρτάται από το πλήθος των I-frames που μεταδίδονται από τον κωδικοποιητή ανά δευτερόλεπτο.

- *Αποκρυπτογράφηση.* Εάν ένα multicast κανάλι είναι κρυπτογραφημένο, για την αποκρυπτογράφηση των πακέτων του είναι απαραίτητη η λήψη των κλειδιών αποκρυπτογράφησης. Τα κλειδιά αυτά συχνά μεταφέρονται μέσω πινάκων σε μια IPTV ροή. Η συχνότητα με την οποία αυτοί οι πίνακες είναι διαθέσιμοι στη ροή καθορίζει πόσο σύντομα μια IPTVCD μπορεί να αρχίσει την αποκρυπτογράφηση της εισερχόμενης ροής. Σε κάποια προηγμένα CA συστήματα τα κλειδιά αυτά ενημερώνονται περιοδικά και έτσι μια IPTVCD πρέπει να διασφαλίσει ότι λαμβάνει τα κλειδιά μετά την τελευταία ενημέρωση αυτών. Η καθυστέρηση που εισάγεται από τη διαδικασία της αποκρυπτογράφησης κυμαίνεται από 0 (για τα μη-κρυπτογραφημένα κανάλια) έως 1500 ms. Ωστόσο σε κάποια δίκτυα η καθυστέρηση μπορεί να υπερβεί αυτούς τους χρόνους εάν μια IPTVCD χρειαστεί να περιμένει και το τελευταίο σύνολο κλειδιών αποκρυπτογράφησης.
- *Buffering.* Εξαιτίας της μεταβλητής φύσης του ρυθμού μετάδοσης των bits υπάρχει μία χρονική διακύμανση στην άφιξη των IPTV πακέτων η οποία είναι γνωστή ως jitter. Η χρονική αυτή διακύμανση μπορεί να οφείλεται είτε στο server είτε στο δίκτυο. Συνεπώς χρησιμοποιείται ένας buffer για να εξασφαλίσει ότι τα δεδομένα είναι παρόντα για επεξεργασία και προβολή. Επιπλέον ένας buffer μπορεί να απαιτήσει την επαναμετάδοση των πακέτων εάν αυτή κρίνεται απαραίτητη. Ο buffer πρέπει να γεμίσει πριν την έναρξη της αποκωδικοποίησης. Το γεγονός αυτό καθώς και το μέγεθος της μνήμης του buffer εισάγουν επιπλέον καθυστερήσεις στο χρόνο αλλαγής ενός καναλιού.

### 3.14.1 Βασικές αρχές της αλλαγής καναλιών

Οι δύο τύποι αλληλεπίδρασης των συνδρομητών με τις multicast IPTV ροές είναι οι εξής:

- Η χρήση του τηλεχειριστηρίου για την επιλογή ενός καναλιού.
- Η αλλαγή ενός καναλιού σε ένα άλλο.



### 3.14.1.1 Επιλογή καναλιού

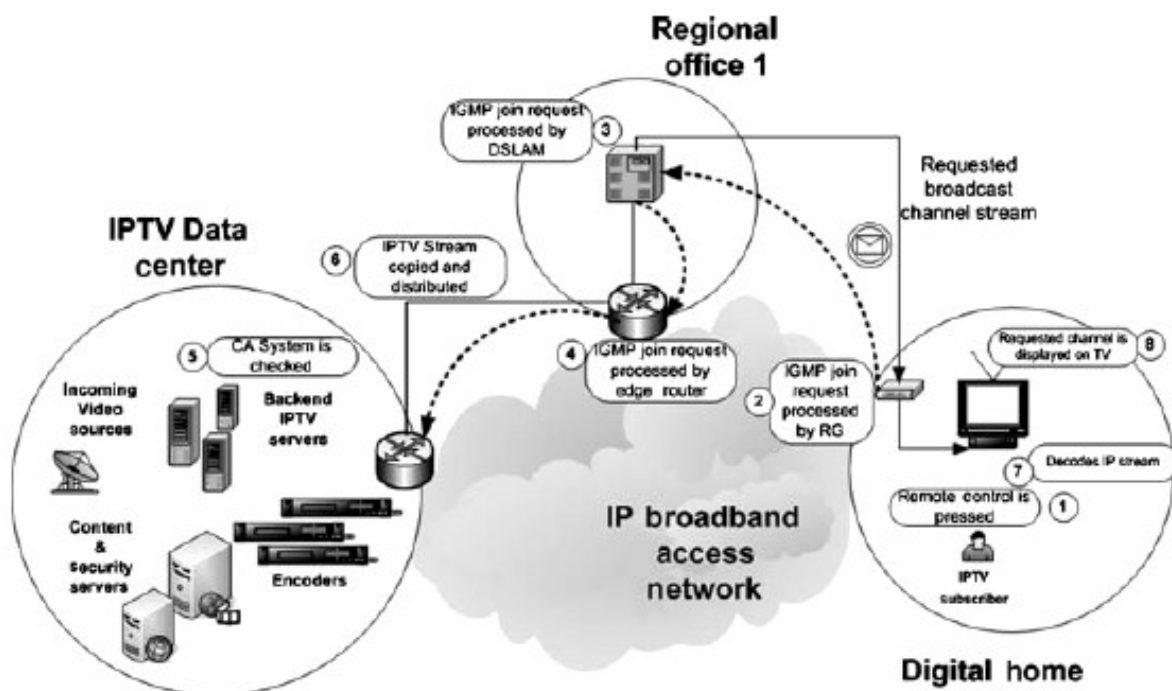
Στα παραδοσιακά δίκτυα της καλωδιακής ή της δορυφορικής τηλεόρασης η επιλογή ενός καναλιού είναι απλή διότι όλα τα κανάλια είναι διαθέσιμα σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας. Ωστόσο η επιλογή ενός IPTV καναλιού είναι πιο περίπλοκη επειδή όλα τα κανάλια δεν είναι διαθέσιμα ταυτόχρονα στο δίκτυο με τα βήματα για την επιλογή ενός καναλιού να εξαρτώνται από την εκάστοτε υποδομή δικτύωσης. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της επιλογής ενός καναλιού εξαρτάται από τη θέση του ζητούμενου αυτού καναλιού. Παραδείγματος χάριν εάν το κανάλι είναι διαθέσιμο σε έναν κοντινό switch ή δρομολογητή (Residential Gateways - RGs) η καθυστέρηση είναι αμελητέα. Εντούτοις η πρόσβαση για το κανάλι αυτό πρέπει να γίνει από ένα server στο IPTV κέντρο δεδομένων και απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για τη διανομή του σε μια IPTVCD.

Για παράδειγμα στην περίπτωση ενός αιτήματος λήψης ενός καναλιού μέσω ενός DSL δικτύου το οποίο είναι διαθέσιμο στο δρομολογητή διανομής του IPTV data center (σχήμα 3.24) απαιτούνται τα εξής βήματα:

- Όταν ο συνδρομητής επιθυμεί να αλλάξει κανάλι τότε είτε επιλέγει το κανάλι αυτό από το τηλεχειριστήριό του είτε το επιλέγει μέσω της EPG εφαρμογής.
- Το IP set-top box λαμβάνει αυτήν την εντολή με τη μορφή ενός IGMP join αιτήματος και την αποστέλλει σε μια RG συσκευή. Το αίτημα αυτό κατόπιν προωθείται στο DSLAM είτε εξετάζεται το ενδεχόμενο το κανάλι αυτό να είναι διαθέσιμο σε κάποια από τις πόρτες της RG συσκευής. Το κανάλι αυτό ενδέχεται να είναι διαθέσιμο σε κάποιες από τις πόρτες της RG συσκευής μόνο εάν κάποιος άλλος παρακολουθεί αυτό εντός της οικίας. Στην περίπτωση αυτή η RG αντιγράφει τη ροή και την αποστέλλει στην IPTVCD. Η RG συσκευή θα πρέπει να υποστηρίζει την IGMP snooping λειτουργία.
- Εάν το κανάλι αυτό δεν είναι διαθέσιμο στην RG ή δεν υποστηρίζεται η IGMP snooping λειτουργία τότε το αίτημα αυτό προωθείται στο DSLAM στην περίπτωση των DSL δικτύων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα CMTSs χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των καλωδιακών ευρυζωνικών δικτύων. Κατόπιν αν υποστηρίζονται οι IGMP snooping και IGMP proxy λειτουργίες επιτρέπεται στο DSLAM να εξετάσει αν το ζητούμενο κανάλι είναι διαθέσιμο σε κάποιο από τις πόρτες του, να το αντιγράψει και να το προωθήσει σε μια IPTVCD. Ωστόσο αν αυτές οι λειτουργίες δεν υποστηρίζονται ή το κανάλι

δεν είναι διαθέσιμο στο DSLAM το αίτημα αποστέλλεται εν συνεχεία στους ανωτέρω δρομολογητές διανομής στο regional office.

- Τη στιγμή που ο δρομολογητής στο regional office λάβει το αίτημα έχει επίσης δύο επιλογές, να αντιγράψει τη ροή στη σωστή διεπαφή ή να προωθήσει το αίτημα αυτό στο δρομολογητή διανομής του IPTV κέντρου δεδομένων στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμο σε αυτόν.
- Το αίτημα αυτό εν τέλει φθάνει στο IPTV data center όπου εκεί είναι διαθέσιμα όλα τα κανάλια. Ένα κανάλι γενικά προσδιορίζεται από μια IP διεύθυνση. Κατόπιν το CA σύστημα ελέγχει αν ο συνδρομητής είναι εξουσιοδοτημένος να παρακολουθήσει το συγκεκριμένο αυτό κανάλι.
- Μετά την έγκριση του συνδρομητή η IP διεύθυνση του set-top box του συνδρομητή προστίθεται στη multicast λίστα. Έτσι εν συνεχεία το κανάλι αντιγράφεται και αποστέλλεται στο set-top box.
- Το set-top box λαμβάνει το κανάλι που ζήτησε καθώς και επιπλέον πληροφορίες ασφαλείας όπως CA πίνακες και κλειδιά κρυπτογράφησης. Κατόπιν τα αποθηκεύει στη μνήμη του και περιμένει ένα I-frame για να ξεκινήσει την αποκωδικοποίηση του καναλιού.

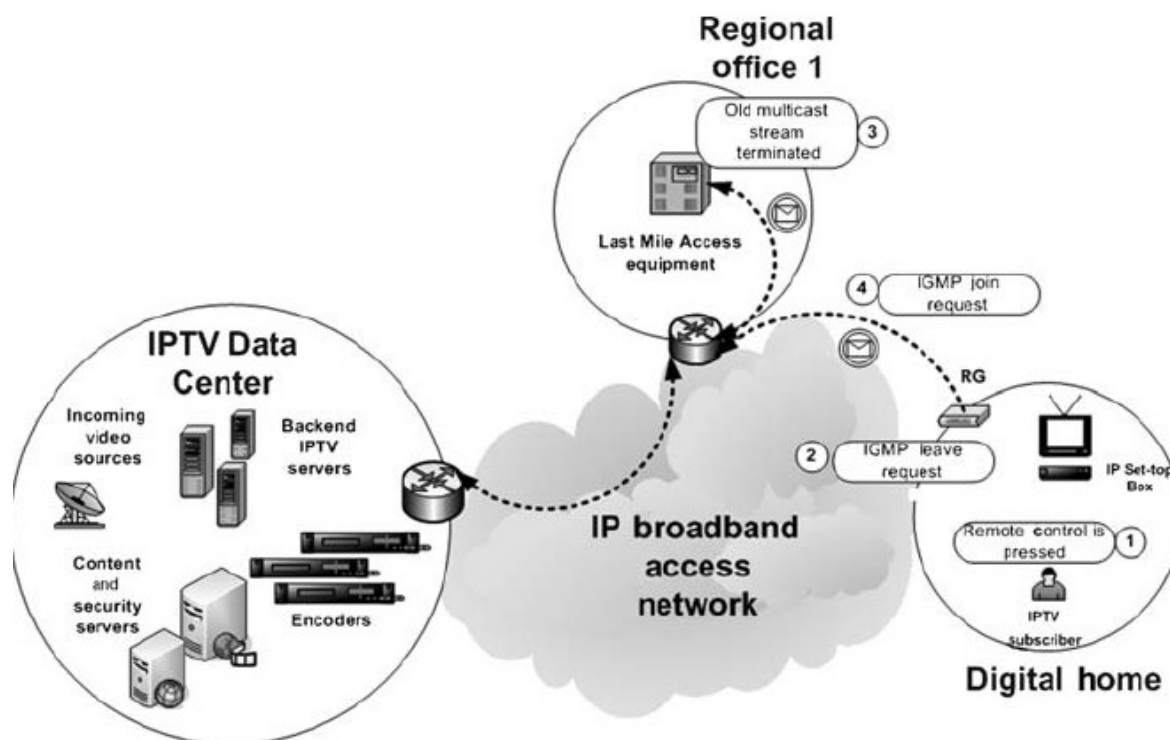


Σχήμα 3.24 Πιθανά βήματα επιλογής ενός IPTV καναλιού [1]

### 3.14.1.2 Εναλλαγή καναλιών

Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.25 η διαδικασία εναλλαγής ενός καναλιού σε ένα άλλο είναι όμοια με τη διαδικασία επιλογής ενός καναλιού περιλαμβάνοντας κάποια επιπλέον βήματα:

- Όταν ένας συνδρομητής θέλει να αλλάξει το κανάλι που παρακολουθεί το αίτημα αυτό λαμβάνεται από το set-top box. Το set-top box αποστέλλει ένα μήνυμα αποχώρησης για τον τερματισμό της ροής του παλιού καναλιού.
- Ο τερματισμός της ροής του καναλιού ανάλογα με το επίπεδο λειτουργίας του IGMP, γίνεται είτε σε μια RG συσκευή είτε στο DSLAM και το CMTS είτε στο δρομολογητή του regional office. Παραδείγματος χάριν εάν μια RG συσκευή υποστηρίζει την IGMP proxy λειτουργία μπορεί να τερματίσει τη ροή του καναλιού. Ο τερματισμός αυτός προϋποθέτει τη μη εκπομπή του συγκεκριμένου καναλιού από άλλες IPTVCDs στο οικιακό περιβάλλον ενός συνδρομητή. Εάν η IGMP λειτουργία δεν υποστηρίζεται τότε το αίτημα αλλαγής καναλιού αποστέλλεται στο DSLAM είτε στο δρομολογητή του regional office. Στην περίπτωση που το DSLAM υποστηρίζει την IGMP snooping λειτουργία τερματίζει το παλιό κανάλι. Είναι σημαντικό η λειτουργία του τερματισμού της ροής καναλιού να γίνεται γρήγορα διότι υπάρχει το ενδεχόμενο το νέο κανάλι να φτάσει στο IPTV set-top box προτού τερματιστεί η ροή του προηγούμενου καναλιού. Αυτό μπορεί να διπλασιάσει της απαιτήσεις εύρους ζώνης οι οποίες μπορεί να μην υποστηρίζονται από τη σύνδεση και να οδηγηθούμε σε υποβάθμιση της εικόνας του νέου καναλιού [1].



Σχήμα 3.25 Αλλαγή IPTV καναλιών [1]

### 3.14.2 Τεχνικές μείωσης απαιτούμενου χρόνου αλλαγής καναλιών

Για την εμπορική επιτυχία του IPTV ο απαιτούμενος χρόνος αλλαγής ενός καναλιού θα πρέπει να είναι όσος ο χρόνος απαιτείται για την αλλαγή του καναλιού ενός δικτύου καλωδιακής τηλεόρασης ο οποίος είναι 500 ms. Οι τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους φορείς παροχής υπηρεσιών για την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αυτού του χρόνου είναι οι:

- **Υλοποίηση της IGMP proxy λειτουργίας στα DSLAMs.** Εάν μια ομάδα συνδρομητών λαμβάνει κάποιο συγκεκριμένο κανάλι και σε αυτή την ομάδα θέλει να συμμετάσχει κάποιος νέος συνδρομητής, η IGMP proxy συσκευή μπορεί να διανέμει το συγκεκριμένο κανάλι στο νέο συνδρομητή αμέσως χωρίς να χρειαστεί η μετάδοση κάποιου IGMP report μηνύματος στο server του IPTV κέντρο δεδομένων. Επιπλέον οι proxy συσκευές ελέγχουν ποιες IPTVCDs έχουν αποχωρήσει από μια multicast ομάδα ενός συγκεκριμένου καναλιού και στην περίπτωση που δεν υπάρχει καμία IPTVCD αποστέλλουν ένα μήνυμα αποχώρησης στο δρομολογητή διανομής του IPTV data center ώστε να σταματήσει να στέλνει το συγκεκριμένο κανάλι. Εάν

είναι αδύνατη η εφαρμογή της IGMP proxy λειτουργίας στο DSLAM ή το κόστος αυτής είναι απαγορευτικό τότε αυτή εφαρμόζεται στο δρομολογητή στο regional office. Ο δρομολογητής αυτός θα πρέπει να διαθέτει αρκετά μεγάλη επεξεργαστική ισχύ ώστε να διαχειρίζεται γρήγορα τα IGMP “join” και “leave” αιτήματα που λαμβάνονται από τα διάφορα DSLAMs και CMTSs.

- **Αύξηση του αριθμού των I-frames που παράγονται από τον κωδικοποιητή στο IPTV data center.** Το πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα I-frames απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης με αποτέλεσμα να αποστέλλονται τα λιγότερα δυνατά σε μια ροή και συνεπώς να αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για την εναλλαγή των καναλιών. Συνεπώς οι φορείς παροχής υπηρεσιών πρέπει να βρουν μία χρυσή τομή δηλαδή να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις για μικρότερους χρόνους αλλαγής καναλιών έναντι αυτών των απαιτήσεων υψηλού εύρους ζώνης.
- **Αύξηση της συχνότητας λήψης των CA πινάκων.** Όπως προαναφέρθηκε μια IPTVCD πρέπει να περιμένει τα κλειδιά κρυπτογράφησης και τους CA πίνακες να φθάσουν προτού να ξεκινήσει η διαδικασία αποκρυπτογράφησης. Η αύξηση της συχνότητας λήψης αυτών των πληροφοριών μέσα στη ροή μπορεί να επιταχύνει το χρόνο αλλαγής των καναλιών. Αυτή η προσέγγιση όπως είναι αναμενόμενο προκαλεί αύξηση των απαιτήσεων εύρους ζώνης.
- **Μείωση του μεγέθους των buffers των IP set-top boxes.** Οι IPTVCDs που έχουν μεγάλο μέγεθος buffers είναι πιο πιθανό να αναπαραγάγουν καλύτερης ποιότητας βίντεο σε σύγκριση με συσκευές με μικρότερο μέγεθος buffers. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στα δίκτυα που εμφανίζεται η μεταβολή της καθυστέρησης. Το μόνο μειονέκτημα του μεγάλου μεγέθους των buffers είναι ότι χρειάζονται αρκετό χρόνος για να γεμίσουν και έτσι απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για την αλλαγή των καναλιών. Έτσι η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αυτού χρόνου είναι εφικτή μόνο στη περίπτωση των δικτύων στα οποία δεν εμφανίζεται μεταβολή της καθυστέρησης και άρα έχουν μικρό μέγεθος buffers.

- **Προσωποποίηση συνηθειών του χρήστη.** Η τεχνολογία αυτή εξετάζει τις προηγούμενες συνήθειες του συνδρομητή και προβλέπει ποια μπορεί να είναι τα πιθανά κανάλια που ο συνδρομητής θα ζητήσει να συντονιστεί στο μέλλον. Αυτή η τεχνική είναι κατάλληλη κυρίως για VDSL και FTTH δίκτυα. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι ένα κανάλι είναι πάντα διαθέσιμο δεσμεύοντας bandwidth ακόμη και αν ο συνδρομητής δεν είναι συντονισμένος στο κανάλι αυτό και συνεπώς οι φορείς παροχής υπηρεσιών πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις για μικρότερους χρόνους αλλαγής καναλιών έναντι αυτών των απαιτήσεων υψηλού εύρους ζώνης.
- **Υλοποίηση QoS μηχανισμών.** Η σωστή υλοποίηση ενός QoS μηχανισμού μπορεί εκτός από την καλύτερη ποιότητα εικόνας να συνεισφέρει και στην μείωση του χρόνου που απαιτείται για την αλλαγή ενός IPTV καναλιού [1].

### 3.15 Ποιότητα Υπηρεσίας IPTV

Η ποιότητα υπηρεσίας αναφέρεται στην ικανότητα ενός δικτύου να προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες σε ένα συγκεκριμένο σημείο της μετάδοσης. Μηχανισμοί ελέγχου δίνουν προτεραιότητα σε κάποιους χρήστες ή εγγυώνται διαφορετικά QoS επίπεδα ανάλογα με τον τύπο των υπηρεσιών. Στη real-time μετάδοση όπως είναι αυτή της IPTV και της VoIP απαιτείται ένα εγγυημένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών εξαιτίας της sensitive delay φύσης αυτών των υπηρεσιών και της απαίτησης σταθερού ρυθμού μετάδοσης (CBR). Συνεπώς η ποιότητα μιας real-time υπηρεσίας εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- **Το ρυθμό μετάδοσης.** Γνωρίζοντας το ρυθμό μετάδοσης μπορεί να διαπιστωθεί εάν ένα δίκτυο ορισμένης χωρητικότητας μπορεί να υποστηρίξει ένα συγκεκριμένο τύπο μετάδοσης. Ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης γίνεται με τη διαίρεση του πλήθους των bytes που αποστέλλονται με τη διάρκεια της μετάδοσης.
- **Καθυστέρηση.** Ο χρόνος που χρειάζεται να φθάσουν τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό τους εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων στη

διαδρομή που διανύουν τα πακέτα, την κίνηση στο δίκτυο και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

- **Jitter.** Τα πακέτα που αποστέλλονται μπορεί να φθάσουν στον προορισμό μέσα από διαφορετικές διαδρομές και συνεπώς η καθυστέρηση των πακέτων μπορεί να διαφέρει. Η χρονική διακύμανση στην άφιξη τους είναι γνωστή ως μεταβολή της καθυστέρησης.
- **Τον αριθμό των απολεσθέντων πακέτων.** Κάποια πακέτα μπορεί να χαθούν ή να εξαλειφθούν από ένα δρομολογητή αν ο buffer του είναι γεμάτος ή τα πακέτα αυτά είναι κατεστραμμένα.
- **Τον αριθμό των επαναταξινομημένων πακέτων (reordered packets).** Όταν τα πακέτα αποστέλλονται με μια συγκεκριμένη σειρά είναι πιθανό να φθάσουν στο δέκτη σε διαφορετική από την αρχική τους σειρά εξαιτίας των πιθανών διαφορετικών πορειών που επιλέγονται από τους δρομολογητές. Μόλις φθάσουν στον προορισμό τους τα πακέτα αυτά πρέπει να ταξινομηθούν από κάποιο πρωτόκολλο. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική ειδικά για τη διανομή βίντεο και τις VoIP εφαρμογές όπου η ποιότητα επηρεάζεται από την καθυστέρηση.
- **Τον αριθμό των διπλότυπων πακέτων (duplicated packets).** Η εμφάνιση διπλότυπων πακέτων υποδηλώνει ότι υπάρχουν κάποια λάθη παραμετροποίησης στο δίκτυο ή ότι κάποιες συσκευές είναι ελαττωματικές.
- **Τον αριθμό των αλλοιωμένων πακέτων (corrupted packets).** Κατά τη διανομή των πακέτων στο δίκτυο μερικά από αυτά μπορεί να αλλοιωθούν. Αυτό το είδος σφάλματος δεν έχει μεγάλη επίπτωση στην ποιότητα εφ' όσον ο αριθμός των αλλοιωμένων πακέτων είναι μικρός.

### 3.16 Ποιότητα εμπειρίας IPTV

Η ποιότητα εμπειρίας αναφέρεται στην ικανοποίηση των προσδοκιών των χρηστών από τις IPTV υπηρεσίες. Η ικανοποίηση των χρηστών πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτή των υπηρεσιών της καλωδιακής ή δορυφορικής τηλεόρασης και επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- **Τεχνικοί παράγοντες.** Οι τεχνικοί παράγοντες σχετίζονται με τις τεχνολογίες και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τη διανομή των

IPTV υπηρεσιών και αναφέρονται στην ταχύτητα αλλαγής των καναλιών, την ποιότητα του ήχου και της εικόνας καθώς και την ασφάλεια IPTV υπηρεσιών.

- **Εμπορικοί παράγοντες (commercial factors).** Οι εμπορικοί παράγοντες αναφέρονται στο κόστος και το είδος του περιεχομένου των IPTV υπηρεσιών.
- **Παράγοντες χρηστικότητας (usability factors).** Οι παράγοντες χρηστικότητας αναφέρονται σε ζητήματα όπως η ευκολία εγκατάστασης ενός set-top box, η ευκολία χρήσης του EPG και η απλουστευμένη λειτουργία του τηλεχειριστηρίου [23].

Η μέτρηση της ποιότητας εμπειρίας μπορεί να γίνει μόνο με την εξέταση των τεχνικών παραγόντων. Η αποδεκτή καθυστέρηση αλλαγής των καναλιών είναι περίπου 1 sec. Για τη διατήρηση αυτού του χρόνου η επιμέρους καθυστέρηση των μηνυμάτων συμμετοχής και αποχώρησης από μια multicast ομάδα πρέπει να κυμαίνεται από 10 ms έως 200 ms [24]. Επιπλέον παράγοντες δυσλειτουργίας όπως η απώλεια πακέτων, τα σφάλματα στις ακολουθίες μετάδοσης (sequence errors) και η μεταβολή της καθυστέρησης μπορεί να έχουν αρνητικά αποτελέσματα στην ορατή τηλεοπτική ποιότητα. Τα αρνητικά αυτά φαινόμενα είναι συνήθως τα εξής:

- **Blockiness.** Αναφέρεται στο «σπάσιμο» ενός τμήματος της εικόνας σε τετράγωνα η οποία μπορεί να οφείλεται στην υπερβολική συμπίεση [25].
- **Blurring.** Αναφέρεται στη διαστρέβλωση της εικόνας που χαρακτηρίζεται από τη μειωμένη ευκρίνεια των ακρών της [26].
- **Judder.** Αναφέρεται στο «τράνταγμα», την κίνηση δηλαδή της εικόνας.
- **Ο οπτικός θόρυβος.**
- **Συγχρονισμός.** Αναφέρεται στο πρόβλημα του συγχρονισμού του ήχου και της εικόνας [23].

Η multicast διανομή του IPTV περιεχομένου δεν εγγυάται σταθερή τηλεοπτική ποιότητα μεταξύ όλων των χρηστών που λαμβάνουν το ίδιο κανάλι. Λόγω του πεπερασμένου διαθέσιμου εύρους ζώνης, όσο περισσότεροι είναι συνδρομητές



που ζητούν μια IPTV υπηρεσία τόσο μικρότερος είναι ο βαθμός της QoE. Συνεπώς είναι σημαντικό ο εξοπλισμός των δικτύων να εξετάζεται κάτω από μια αυξανόμενη κλίμακα ως προς το πλήθος των συνδρομητών και των IPTV καναλιών για να προσδιοριστεί σε πιο σημείο η ποιότητα εμπειρίας ανά συνδρομητή φθάνει σε μη αποδεκτά επίπεδα. Παραδείγματος χάριν εάν ένα δίκτυο μπορεί να φιλοξενήσει χίλιους συνδρομητές ταυτόχρονα, ο χιλιοστός πρώτος χρήστης θα μπορούσε ενδεχομένως να υποβιβάσει τη ποιότητα εμπειρίας όλων των συνδρομητών.

Τέλος σε ένα triple-play περιβάλλον υπηρεσιών οι συνδρομητές μπορεί ταυτόχρονα να αλλάζουν κανάλι, να κάνουν χρήση του διαδικτύου και της VoIP υπηρεσίας. Αυτή η δυναμική συμπεριφορά μπορεί επίσης να επηρεάσει την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών. Επομένως είναι σημαντικό οι μετρήσεις της ποιότητας εμπειρίας ανά συνδρομητή να γίνονται σε συνάρτηση με τη δυναμική συμπεριφορά των χρηστών [24].

### **3.17 Ασφάλεια τεχνολογίας IPTV**

Κατόπιν της ευρείας υιοθέτησης της IPTV τεχνολογίας η κυρίαρχη προτεραιότητα των φορέων παροχής των IPTV υπηρεσιών είναι η ασφάλεια. Οι παραγωγοί βίντεο περιεχομένου είναι απρόθυμοι να χορηγήσουν άδεια διανομής του περιεχομένου αυτού αν δεν υπάρχει ένας ισχυρός μηχανισμός ασφαλείας. Ο σκοπός ενός συστήματος ασφαλείας είναι να παρέχει τη βεβαιότητα ότι μόνο οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες δηλαδή οι χρήστες που έχουν καταβάλει την απαιτούμενη συνδρομή θα μπορούν να έχουν πρόσβαση στα IPTV κανάλια και στο VoD περιεχόμενο. Εκτός της επικύρωσης των χρηστών απαιτείται ένα σύστημα ασφαλείας για την προστασία του περιεχομένου σε όλα τα στάδια της διανομής του. Για την ασφάλεια του IPTV περιεχομένου που διανέμεται υπάρχουν δύο τεχνικές προστασίας, η υπό όρους πρόσβαση και η διαχείριση των ψηφιακών δικαιωμάτων [1].

#### **3.17.1 CA συστήματα ασφαλείας**

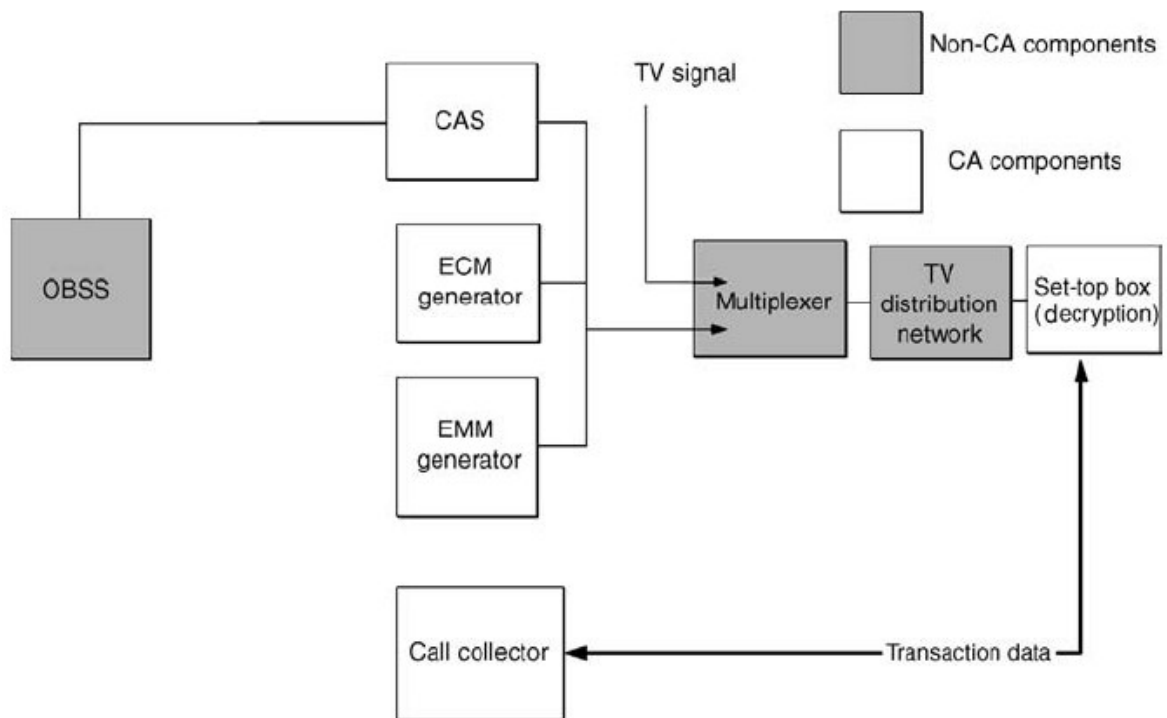
Ένα CA σύστημα είναι αρμόδιο για την αποτροπή της πρόσβασης μη-εξουσιοδοτημένων χρηστών στις IPTV υπηρεσίες ώστε να διασφαλιστούν τα

έσοδα των φορέων παροχής αυτών των υπηρεσιών. Θεωρητικά η κλοπή των IPTV υπηρεσιών είναι πιο δύσκολη εξαιτίας του ότι τα κανάλια διανέμονται περιοδικά σε ένα τέτοιο δίκτυο δηλαδή ένα κανάλι κάθε φορά και όχι με όλα μαζί όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά συστήματα τηλεόρασης. Συνεπώς το σύστημα ασφαλείας που χρησιμοποιείται σε ένα IPTV δίκτυο είναι διαφορετικό των συστημάτων ασφαλείας των καλωδιακών, δορυφορικών ή των δικτύων επίγειας τηλεόρασης. Υπάρχουν τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις στα CA συστήματα ασφαλείας:

- Τα CA συστήματα προσανατολισμένα στο υλικό.
- Τα CA συστήματα προσανατολισμένα στο λογισμικό.
- Τα υβριδικά CA συστήματα.

#### **3.17.1.1 CA συστήματα προσανατολισμένα στο υλικό**

Η αρχιτεκτονική ενός CA συστήματος η οποία είναι προσανατολισμένη στο υλικό (hardware centric), βασίζεται στο client – server μοντέλο. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της διαλειτουργικότητας των κύριων συστατικών στοιχείων, των οποίων η λειτουργίες περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν απεικονίζεται στο σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26 Κύρια συστατικά στοιχεία ενός hardware centric CA συστήματος [1]

### 3.17.1.1.1 Σύστημα έγκρισης πελατών

Το σύστημα έγκρισης πελατών (Customer Authorization System - CAS) περιλαμβάνει μια βάση δεδομένων για την αποθήκευση πληροφοριών που σχετίζονται με το multicast και το VoD περιεχόμενο, των αριθμών αναγνώρισης των έξυπνων καρτών, λεπτομερειών του προφίλ των συνδρομητών και δεδομένων χρονοπρογραμματισμού. Διασυνδέεται με το OBSS (Operational and Business Support System), στόχος του οποίου είναι να εξασφαλίσει ότι οι συνδρομητές έχουν πρόσβαση σε ότι ακριβώς έχουν πληρώσει. Το OBSS είναι ένα σύστημα διαχείρισης συνδρομητών το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία του IPTV δικτύου για την ενεργοποίηση των IPTV υπηρεσιών και την ικανοποίηση των απαιτήσεων των συνδρομητών. Οι τύποι των πληροφοριών που διαχειρίζεται ένα OBSS είναι:

- Το όνομα και τη διεύθυνση των συνδρομητών.
- Λεπτομέρειες τιμολόγησης και πληρωμής.
- Τα multicast IPTV προγράμματα που απαιτούνται.
- Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για την παροχή μιας νέας υπηρεσίας.
- Τη IP διεύθυνση μιας νέας υπηρεσίας.

- Τον επιθυμητό χρόνο ετοιμασίας του δικτύου των συνδρομητών για μια νέα υπηρεσία.

Το OBSS διαβιβάζει αυτές τις πληροφορίες στο CA σύστημα μόλις οι συνδρομητές αποκτήσουν τα δικαιώματα πρόσβασης μέσω ενός EMM (Entitlement Management Message) μηνύματος το οποίο αποστέλλεται μέσω του δικτύου σε μια έξυπνη κάρτα (smart card η) οποία είναι τοποθετημένη στο set-top box. Ένα EMM μήνυμα επιτρέπει στο συνδρομητή να παρακολουθήσει ένα IPTV κανάλι και περιέχει πληροφορίες:

- Κλειδιών εξουσιοδότησης των IPTV υπηρεσιών.
- Πιστωτικών μονάδων (credits) για μελλοντικές αγορές.
- Ακύρωσης και ανανέωσης υπηρεσιών.
- Άλλες πληροφορίες χρηστών όπως διευθύνσεις και λεπτομέρειες κοστολόγησης.

Το CA σύστημα παράγει EMM μηνύματα και στην περίπτωση αλλαγής των λεπτομερειών της συνδρομής ενός χρήστη. Παραδείγματος χάριν, όταν ένας συνδρομητής απαιτήσει μια νέα on-demand υπηρεσία, ένα EMM μήνυμα αποστέλλεται για την εξουσιοδότηση της πρόσβασης σε αυτή την υπηρεσία. Γενικά τα EMM μηνύματα αποστέλλονται ξεχωριστά της IPTV ροής κάνοντας συχνά χρήση του TCP για να φθάσουν σε μια IPTVCD [1].

#### **3.17.1.1.2 Κρυπτογράφηση**

Ένα CA σύστημα χρησιμοποιεί ένα κλειδί κρυπτογράφησης σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο για την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση των πληροφοριών. Η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται μόνο στο ωφέλιμο φορτίο ενός βίντεο και όχι στην κεφαλίδα των πακέτων. Για την κρυπτογράφηση των διαφορετικών καναλιών χρησιμοποιούνται και διαφορετικά κλειδιά κρυπτογράφησης. Τα κλειδιά αυτά αποστέλλονται σε ένα set-top box ή μία IPTVCD σε μια κρυπτογραφημένη μορφή ως μέρος του ECM (Entitlement Control Message) μηνύματος. Τα ECM μηνύματα παράγονται στο IPTV data center και ανανεώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για τη μεγιστοποίηση του βαθμού

ασφαλείας. Σε αντίθεση με τα EMM μηνύματα που απευθύνονται στο συνδρομητή τα ECM μηνύματα απευθύνονται σε ένα κανάλι. Η κρυπτογράφηση στο IPTV κέντρο δεδομένων διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του περιεχομένου. Στη multicast μετάδοση του IPTV περιεχομένου η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται σε real-time χρόνο δηλαδή κατά τη μετάδοση του περιεχομένου. Στην περίπτωση μετάδοσης VoD περιεχομένου η κρυπτογράφηση μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε πραγματικό χρόνο είτε πριν από τη unicast μετάδοση του περιεχομένου. Επιπλέον στην κρυπτογράφηση του VoD περιεχομένου απαιτούνται διαφορετικά σύνολο κλειδιών για κάθε unicast μετάδοση σε αντίθεση με την πολυεκπομπή ενός IPTV καναλιού όπου χρησιμοποιούνται τα ίδια κλειδιά για κάθε συνδρομητή [1].

#### **3.17.1.1.3 Μονοπάτι επιστροφής**

Ένα CA σύστημα εκμεταλλεύεται την αμφίδρομη φύση των IP ευρυζωνικών δικτύων για συλλέξει πληροφορίες από τις IPTVCDs. Οι πληροφορίες αυτές σχετίζονται με:

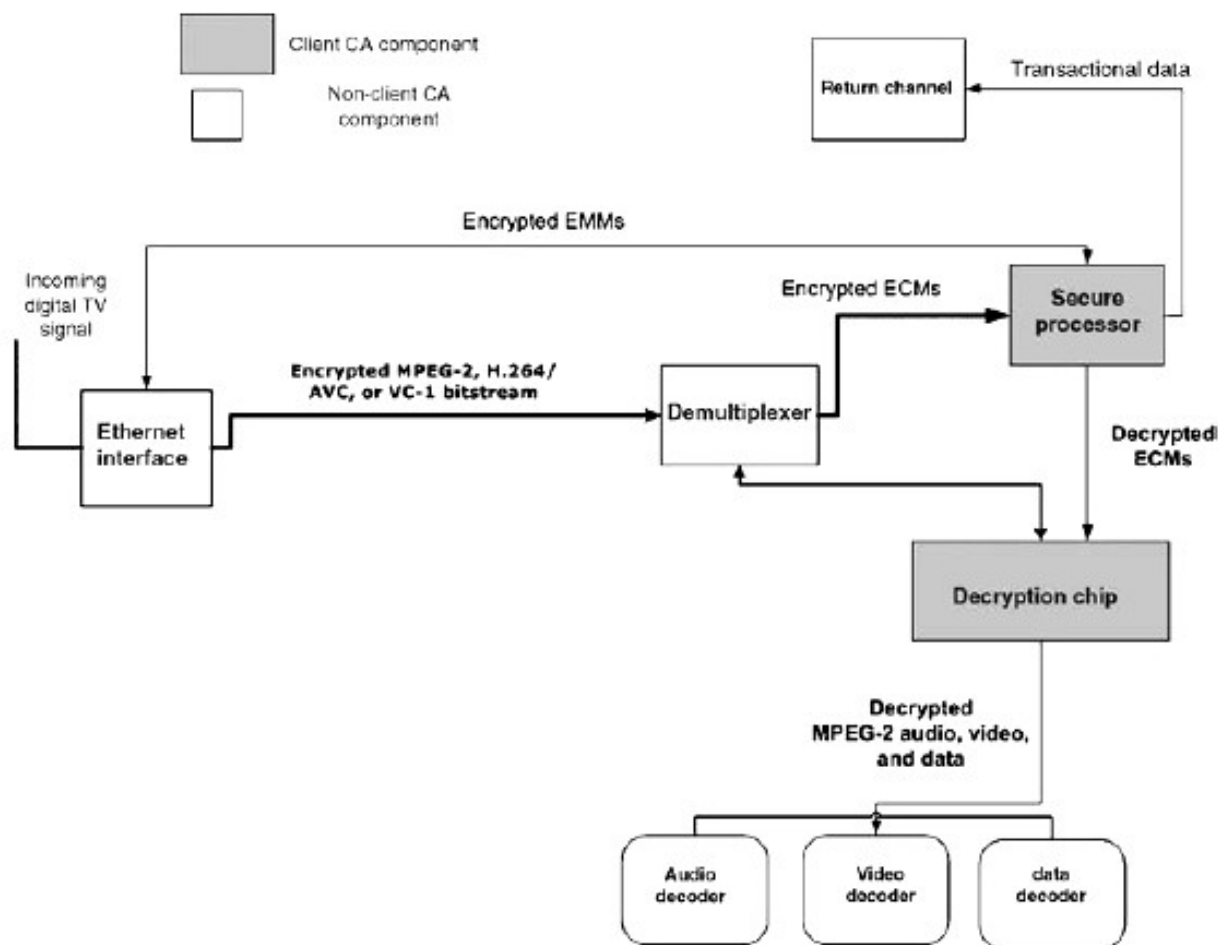
- Τους κωδικούς αναγνώρισης των smart cards και των IPTVCDs.
- Το VoD περιεχόμενο που ο συνδρομητής απαιτεί.
- Τις πιστωτικές μονάδες του συνδρομητή.

#### **3.17.1.1.4 Έξυπνες κάρτες**

Ένα IPTV CA σύστημα χρησιμοποιεί ένα σύστημα ασφαλείας δύο επιπέδων. Το πρώτο περιλαμβάνει την κρυπτογράφηση του περιεχομένου και το δεύτερο περιλαμβάνει την επικύρωση των IPTVCDs. Μια έξυπνη κάρτα μερικές φορές χρησιμοποιείται για τη παροχή επικυρωμένων υπηρεσιών στο CA σύστημα. Είναι μία αφαιρούμενη συσκευή ασφαλείας η οποία ανήκει σε ένα φορέα παροχής υπηρεσιών και προσδιορίζει τους συνδρομητές των multicast και των VoD υπηρεσιών. Αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, λογισμικό, μνήμη και το μέγεθος της δε ξεπερνά αυτό μίας πιστωτικής κάρτας.

### 3.17.1.1.5 Client CA σύστημα

Σε ένα client CA σύστημα (σχήμα 3.27) γίνεται η αποκρυπτογράφηση των καναλιών στην αρχική τους μορφή. Αποτελείται από ένα chip αποκρυπτογράφησης το οποίο διατηρεί κάποιο τμήμα του αλγορίθμου του CA συστήματος και έναν επεξεργαστή ασφαλείας (security processor) ο οποίος περιέχει τα απαραίτητα κλειδιά για την αποκρυπτογράφηση των ψηφιακών υπηρεσιών τηλεόρασης. Ένα ECM μήνυμα το οποίο αποστέλλεται μαζί με κάθε ροή βίντεο είναι κρυπτογραφημένο εξάγεται από τη ροή αυτή και αποστέλλεται στον επεξεργαστή ασφαλείας για αποκρυπτογράφηση. Η αποκρυπτογράφηση του ECM πραγματοποιείται αφότου εγκριθεί. Η έγκριση αυτή παρέχεται από ένα EMM μήνυμα το οποίο υποβάλλεται επίσης σε επεξεργασία τον επεξεργαστή ασφαλείας επίσης. Το ECM περιέχει ένα κλειδί το οποίο αναπαράγεται από τον επεξεργαστή ασφαλείας και αποστέλλεται στο chip



Σχήμα 3.27 Συστατικά στοιχεία client CA συστήματος [1]

αποκρυπτογράφησης. Το κλειδί αυτό έπειτα χρησιμοποιείται για τη παραγωγή της IPTV ροής. Εν συνεχεία λαμβάνει χώρα η αποκωδικοποίηση των συμπιεσμένων IPTV πακέτων. Το client CA σύστημα μπορεί να είναι ενσωματωμένο μέσα σε ένα set-top box ή να υλοποιείται μέσω της χρήσης της έξυπνης κάρτας.

#### **3.17.1.1.6 Αφαιρούμενα security modules**

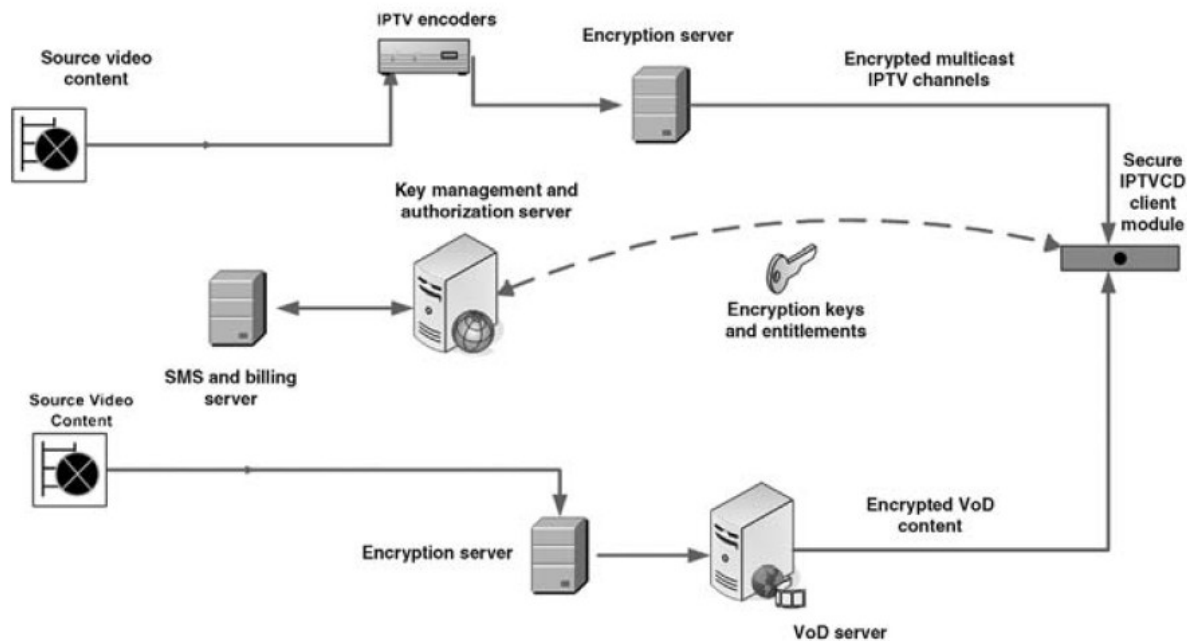
Ένα αφαιρούμενο security module είναι ένα αυτόνομο κομμάτι υλικού που εκτελεί την αποκρυπτογράφηση του ψηφιακού περιεχομένου. Διαθέτει μέγεθος μιας PCMCIA κάρτας η οποία χρησιμοποιείται στα laptops. Περιέχει chipsets και το σχετικό λογισμικό που απαιτείται για την αποκρυπτογράφηση του τηλεοπτικού περιεχομένου. Το αφαιρούμενο από το set-top box security module επιτρέπει την αγορά των set-top boxes ανεξαρτήτως του φορέα παροχής υπηρεσιών. Έτσι αν ο συνδρομητής θέλει να αλλάξει φορέα παροχής υπηρεσιών μπορεί απλά να αντικαταστήσει το security module διατηρώντας το αρχικό set-top box.

#### **3.17.1.2 CA συστήματα προσανατολισμένα στο λογισμικό**

Η υιοθέτηση ενός CA συστήματος βασισμένο στο λογισμικό είναι μία ακόμη προσέγγιση για την ασφαλή διανομή του ψηφιακού περιεχομένου. Αυτός ο τύπος CA συστήματος περιλαμβάνει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δεν απαιτεί τη χρήση κάποιας έξυπνης κάρτας.
- Παρέχει γρήγορη αποκατάσταση των παραβιάσεων ασφαλείας.
- Υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους IPTV δικτύων όπως τα δορυφορικά, τα επίγεια και τα καλωδιακά συστήματα τηλεόρασης.
- Υποστηρίζει τα ήδη καθιερωμένα πρότυπα κρυπτογράφησης.
- Υποστηρίζει τη χρήση ψηφιακών πιστοποιητικών.
- Λειτουργεί παράλληλα με ένα CA σύστημα ασφαλείας που βασίζεται στο υλικό.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της διαλειτουργικότητας των κύριων συστατικών στοιχείων ενός software centric CA συστήματος, των οποίων η λειτουργίες περιγράφονται στις παραγράφους που ακολουθούν απεικονίζεται στο σχήμα 3.28.



Σχήμα 3.28 Κύρια συστατικά στοιχεία ενός software centric CA συστήματος [1]

### 3.17.1.2.1 Server κρυπτογράφησης

Ο server αυτός είναι αρμόδιος για τη κρυπτογράφηση του ψηφιακού περιεχομένου πριν τη διανομή αυτού στο δίκτυο. Ένας τέτοιος server χρησιμοποιεί αλγόριθμους κρυπτογράφησης όπως είναι ο DES και ο AES για να καθιστήσει το ψηφιακό περιεχόμενο μη-αναγνώσιμο από αυτούς που δεν έχουν εξουσιοδότηση πρόσβασης σε αυτό.

### 3.17.1.2.2 Server έγκρισης και διαχείρισης κλειδιού

Ένας server έγκρισης και διαχείρισης κλειδιού (Key Management and Authorization Server - KMAS) είναι αρμόδιος για:

- Την παραγωγή, την αποθήκευση σε μία βάση δεδομένων και τη διαχείριση των κλειδιών κρυπτογράφησης.
- Την ασφαλή διανομή αυτών των κλειδιών στους εξουσιοδοτημένους IPTV χρήστες.
- Την παροχή πληροφοριών στο OBSS σύστημα.
- Την ανανέωση αυτών των κλειδιών σε τακτά χρονικά διαστήματα.



### 3.17.1.2.3 IPTV module ασφαλείας πελάτη

Το IPTV module ασφαλείας του πελάτη (Secure IPTVCD Client Module) είναι ένα τμήμα λογισμικού, είναι αρμόδιο για την real-time αποκρυπτογράφηση του περιεχομένου και την παροχή πρόσβασης στους χρήστες που έχουν πληρώσει για το περιεχόμενο αυτό. Είναι ενσωματωμένο μέσα σε μια IPTVCD και αναβαθμίζεται εύκολα με κάποιο άλλο λογισμικό που παρέχεται από το IPTV data center.

Ένα τυπικό παράδειγμα λειτουργίας ενός CA συστήματος που βασίζεται στο λογισμικό περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Το set-top box ελέγχει το δίκτυο προκειμένου να ανιχνεύσει ένα CA server ο οποίος θα παρέχει τα κλειδιά αποκρυπτογράφησης και τις εξουσιοδοτημένες υπηρεσίες για ένα χρήστη. Η IP διεύθυνση του server έγκρισης και διαχείρισης κλειδιού είναι προκαθορισμένη στην IPTVCD.
- Μετά τον εντοπισμό του server, το λογισμικό ασφαλείας του set-top box ενημερώνει το IPTV κέντρο δεδομένων για την παρουσία του στο δίκτυο και ζητά ένα κλειδί για την αποκρυπτογράφηση του εισερχόμενου περιεχομένου.
- Μετά τη λήψη αυτού του αιτήματος, ο server ζητά από το λογισμικό του set-top box κάποιες λεπτομέρειες επικύρωσης.
- Κατόπιν το λογισμικό αυτό αποστέλλει ένα ψηφιακό πιστοποιητικό στο server.
- Μόλις αυτό το πιστοποιητικό ληφθεί και επικυρωθεί από το server, ανακτάται το κλειδί από τη βάση δεδομένων, κρυπτογραφείται και αποστέλλεται ξανά πίσω στο λογισμικό του set-top box. Σε αυτό το σημείο το κλειδί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκρυπτογράφηση του περιεχομένου πριν να περάσει στο chip του αποκωδικοποιητή για περαιτέρω επεξεργασία.

### 3.17.1.3 Υβριδικά CA συστήματα

Η υβριδική προσέγγιση αναφέρεται στη λειτουργία της αποκρυπτογράφησης απευθείας στο set-top box χωρίς τη χρήση κάποιας έξυπνης κάρτας. Η αποκρυπτογράφηση του περιεχομένου σε αυτή την περίπτωση λαμβάνει χώρα μέσα στον επεξεργαστή βίντεο ή σε έναν ειδικό επεξεργαστή ασφαλείας.

### 3.17.2 DRM συστήματα ασφαλείας

Ένα σύστημα διαχείρισης των ψηφιακών δικαιωμάτων εκτός από την προστασία του περιεχομένου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραμετροποίηση του χρόνου παροχής των υπηρεσιών αλλά και για την ανάκληση των δικαιωμάτων ενός χρήστη στο περιεχόμενο πρόσβασης. Αρχικά το DRM προοριζόταν μόνο για τη διανομή VoD περιεχομένου. Αργότερα όμως όλο και περισσότεροι φορείς παροχής υπηρεσιών άρχισαν να το εφαρμόζουν στη real-time διανομή των IPTV καναλιών. Η υλοποίηση αυτού του real-time DRM συστήματος περιλαμβάνει τη σύνδεση ενός server που τρέχει το DRM λογισμικό με τον αποκωδικοποιητή, διασφαλίζοντας έτσι ότι το περιεχόμενο προστατεύεται πριν τη διανομή του.

#### 3.17.2.1 Αρχιτεκτονική υλικού και λογισμικού ενός DRM συστήματος

Τα συστατικά στοιχεία ενός DRM συστήματος είναι τα εξής:

- **Digital Watermarks.** Τα digital watermarks είναι ένα σύνολο από bits για τον προσδιορισμό του ονόματος του δημιουργού και του διανομέα μιας IPTV ροής δεδομένων. Αυτά τα bits είναι αόρατα στο χρήστη και διάσπαρτα σε όλη τη ροή που διανέμεται είτε αυτή είναι ροή βίντεο είτε ροή ήχου και είναι δύσκολο να κάποιος τα εντοπίσει ή να τα αλλάξει. Τα digital watermarks αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση χρηστών είτε με τον περιορισμό της πρόσβασης είτε με την παρεμπόδιση της αντιγραφής καθώς επίσης δίνουν τη δυνατότητα στους διαχειριστές του IPTV δικτύου να εντοπίζουν την παράνομη αναδιανομή του. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα digital watermarks είναι αρκετά ανθεκτικά ώστε να μην αλλοιώνονται από διαδικασίες όπως είναι η συμπίεση, η αποσυμπίεση, η κρυπτογράφηση, και

η μετατροπή του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Κατά την αντιγραφή μιας ροής δεδομένων μεταφέρονται επίσης και τα digital watermarks. Σε κάποιες περιπτώσεις τα digital watermarks μπορεί να είναι ορατά στην εικόνα όπως στην περίπτωση του διανομέα ενός τηλεοπτικού προγράμματος που τοποθετεί το λογότυπο του στη γωνία του βίντεο [27].

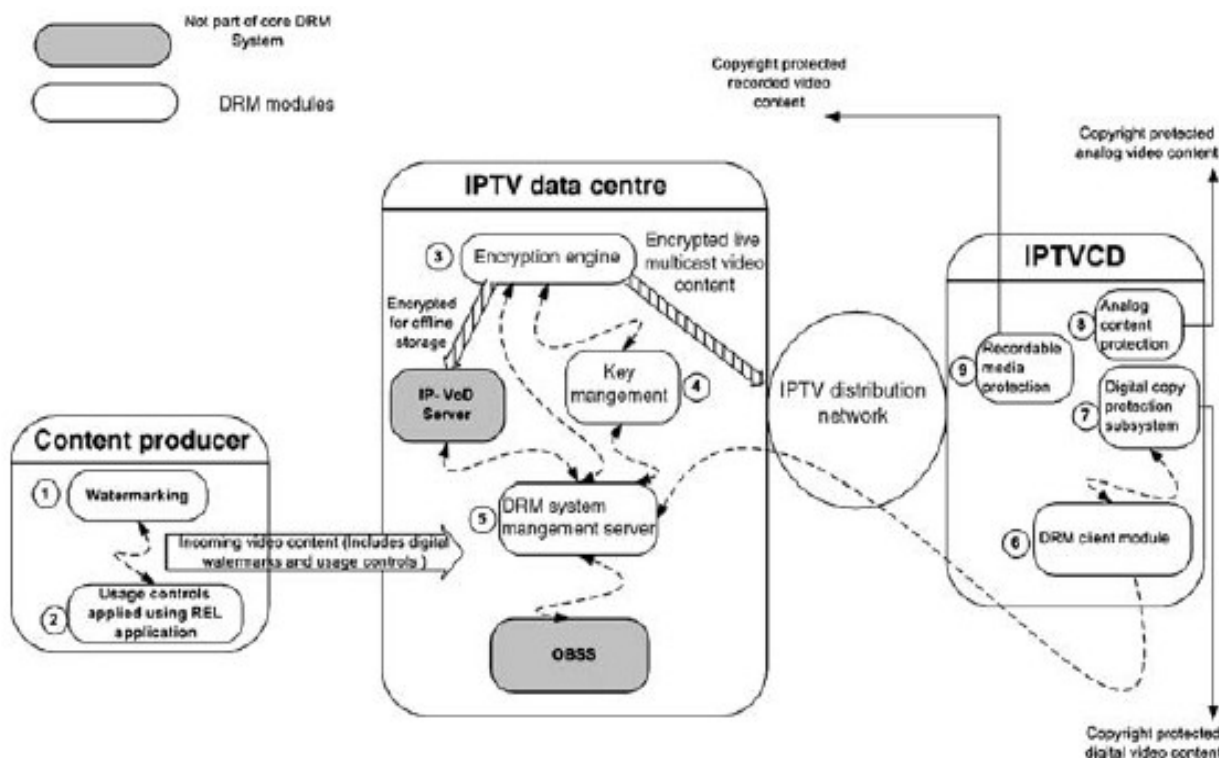
- **Γλώσσα έκφρασης δικαιωμάτων (Rights Expression Language - REL Application).** Η γλώσσα έκφρασης δικαιωμάτων είναι μια DRM τεχνολογία η οποία επιτρέπει στους κατόχους του περιεχομένου να καθορίζουν τα δικαιώματα χρήσης που θέλουν να διανείμουν χρησιμοποιώντας την XML σύνταξη.
- **Μηχανισμός κρυπτογράφησης (encryption engine).** Ο μηχανισμός κρυπτογράφησης ενός DRM συστήματος ο οποίος υλοποιείται στο IPTV data center, εξασφαλίζει την πρόσβαση μόνο των εξουσιοδοτημένων χρηστών στο IPTV περιεχόμενο. Ανάλογα με το επίπεδο ασφαλείας που απαιτείται χρησιμοποιείται διαφορετικό πλήθος και μέγεθος κλειδιών και διαφορετικοί αλγόριθμοι κρυπτογράφησης με τον πιο κοινό εξ' αυτών να είναι ο AES. Η κύρια αρμοδιότητα αυτής της μονάδας είναι η λήψη του περιεχομένου από τον πάροχο και η χρήση κλειδιών τα οποία αποκτώνται από τη μονάδα διαχείρισης κλειδιών για την κρυπτογράφηση του real-time και VoD περιεχομένου. Κατόπιν γίνεται η προβολή του περιεχομένου στο συνδρομητή με τη λήψη μιας εντολής από το OBSS.
- **Διαχείριση κλειδιών.** Η κύρια αρμοδιότητα αυτού του συστατικού στοιχείου του DRM συστήματος είναι η παραγωγή κλειδιών για την κρυπτογράφηση του περιεχομένου, με το στοιχείο αυτό να βρίσκεται στο IPTV κέντρο δεδομένων.
- **Server διαχείρισης DRM συστήματος.** Ο server διαχείρισης διασυνδέεται με το OBSS σύστημα και λαμβάνει λεπτομέρειες σχετικές με τα τηλεοπτικά δικαιώματα κάθε συνδρομητή. Ελέγχει αν εφαρμόζονται τα δικαιώματα πρόσβασης, αν οι συνδρομητές έχουν πρόσβαση σε ότι έχουν πληρώσει και είναι επίσης υπεύθυνος για τη συλλογή στατιστικών στοιχείων όπως είναι ο αριθμός προβολών κάθε περιεχομένου. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί αν οι φορείς παροχής υπηρεσιών έχουν

καταβάλει τις κατάλληλες αμοιβές δικαιωμάτων στους δημιουργούς του περιεχομένου.

- **DRM client module.** Αυτό το υποσύστημα λογισμικού περιλαμβάνεται στις IPTVCDs για να προστατεύσει το IPTV περιεχόμενο από τη μη εξουσιοδοτημένη αναπαραγωγή και αντιγραφή. Συγκεκριμένα διαχειρίζεται κάποιους κανόνες που τίθενται όπως οι τύποι των συσκευών στις οποίες μπορεί να αναπαραχθεί το περιεχόμενο αυτό, ο χρόνος που θα είναι διαθέσιμο προς αναπαραγωγή ή το κόστος για την αντιγραφή του.
- **Υποσύστημα προστασίας της αντιγραφής του ψηφιακού προγράμματος (Digital Program Copy Protection Subsystem).** Η ευρεία ανάπτυξη των set-top boxes που υποστηρίζουν διεπαφές εξόδου υψηλής χωρητικότητας προς τις IPTVCDs αυξάνει την ανησυχία για την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων του IPTV περιεχομένου. Έτσι για την ελαχιστοποίηση αυτού του κινδύνου δηλαδή για τη διασφάλιση του ψηφιακού προγράμματος κατά την εξαγωγή του προστίθεται στις IPTVCDs ένα υποσύστημα προστασίας της αντιγραφής του ψηφιακού προγράμματος ως μέρος του DRM συστήματος. Για αυτό το σκοπό υπάρχουν δύο διαθέσιμες τεχνολογίες, το DTCP (Digital Transmission Content Protection) και το HDCP (High-Bandwidth Digital Content Protection) πρωτόκολλο το οποίο είναι συνήθως ενσωματωμένο στις DVI (Digital Visual Interface) και HDMI (High-Definition Multimedia Interface) διεπαφές.
- **Σύστημα προστασίας αναλογικού περιεχομένου.** Κατά τη μετατροπή του ψηφιακού περιεχομένου σε αναλογικό η προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας χάνεται. Έτσι όμοια με την προστασία των πνευματικών δικαιωμάτων των ψηφιακών διεπαφών είναι απαραίτητη η χρήση ενός μηχανισμού ασφαλείας στις αναλογικές διεπαφές.
- **Προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας από τα μέσα εγγραφής.** Η χρήση προηγμένων IPTVCDs περιλαμβάνει μονάδες DVD η οποίες επιτρέπουν στο χρήστη την καταγραφή του IPTV περιεχομένου. Η αντιγραφή για προσωπική χρήση είναι γενικά αποδεκτή. Εντούτοις στην προσπάθεια περιορισμού της αντιγραφής από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες το DRM σύστημα κάνει χρήση δύο τεχνολογιών προστασίας της

πνευματικής ιδιοκτησίας από τα μέσα εγγραφής, της CPRM (Content Protection for Recordable Media) και της VCPS (Video Content Protection System). Η CPRM τεχνολογία ενσωματώνεται σε συσκευές αποθήκευσης δεδομένων και παρεμποδίζει την αντιγραφή «κλειδωμένων» αρχείων. Συσκευές αποθήκευσης δεδομένων όπως οι σκληροί δίσκοι και οι κάρτες μνήμης τύπου flash οι οποίες χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία έχουν την ικανότητα να αναγνωρίζουν τα «προστατευμένα» αρχεία και να απαγορεύουν την αντιγραφή τους [28]. Το περιεχόμενο που διανέμεται γενικά χαρακτηρίζεται ως «copy once», «copy free» ή «copy never». Στην περίπτωση του «copy once» IPTV περιεχομένου το περιεχόμενο μπορεί να αποθηκεύεται μόνο στο σκληρό δίσκο μιας συσκευής εγγραφής αλλά όχι να αντιγράφεται [29]. Ωστόσο με τη χρήση της VCPS τεχνολογίας σε DVD+R/+RW δίσκους και συσκευές είναι δυνατή η αντιγραφή IPTV του «copy-once» περιεχομένου [30].

Το σχήμα 3.29 απεικονίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των μονάδων υλικού και λογισμικού ενός DRM συστήματος.



Σχήμα 3.29 Αρχιτεκτονική ενός IPTV DRM συστήματος [1]

Η διαδικασία που ακολουθείται από ένα DRM σύστημα για το VoD περιεχόμενο είναι η εξής:

- Όταν το IPTV περιεχόμενο κωδικοποιηθεί και είναι έτοιμο προς αποστολή στο δίκτυο αποστέλλεται στο DRM σύστημα. Στο σύστημα αυτό μια εφαρμογή λογισμικού προσθέτει στο περιεχόμενο αυτό τα δικαιώματα ιδιοκτησίας και τα στοιχεία του ιδιοκτήτη.
- Το προστατευόμενο πλέον περιεχόμενο αποστέλλεται στον IP-VoD server όπου είναι πλέον διαθέσιμο για διανομή στο δίκτυο.
- Για την αναπαραγωγή του προστατευόμενου περιεχομένου μια IPTVCD πρέπει να διαθέτει ένα client DRM module για την προβολή του στις τηλεοράσεις των συνδρομητών.

Η εφαρμογή του DRM συστήματος στις real time IPTV εφαρμογές περιλαμβάνει τη σύνδεση ενός server ο οποίος «τρέχει» το DRM λογισμικό στην έξοδο του αποκωδικοποιητή. Αυτό εξασφαλίζει ότι το real-time περιεχόμενο προστατεύεται πριν τη διανομή του στο δίκτυο.

### 3.18 Επίλογος

Η IPTV τεχνολογία σήμερα σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες διαδικτύου και τις υπηρεσίες τηλεφωνίας συνιστούν το λεγόμενο triple play πακέτο υπηρεσιών. Η διανομή των IPTV υπηρεσιών ικανοποιείται μέσα από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών δικτύωσης όπως είναι τα οπτικά, τα ADSL, τα δορυφορικά, τα ασύρματα δίκτυα, τα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης, καθώς και το διαδίκτυο. Οι τύποι τεχνολογιών μετάδοσης που χρησιμοποιούνται από τον πυρήνα ενός IPTV δικτύου είναι το ATM και SONET/SDH, IP και MPLS και το Metro Ethernet. Για την κωδικοποίηση των δεδομένων του προς μετάδοση IPTV περιεχομένου χρησιμοποιείται συνήθως η MPEG-4 τεχνική συμπίεσης ενώ για τη μετάδοση του IPTV περιεχομένου χρησιμοποιούνται οι unicast, broadcast και multicast τεχνικές διανομής. Κατά τη broadcast διανομή δεν υποστηρίζονται οι VCR (pause, fast-forward, κ.λπ.) λειτουργίες ενώ η multicast διανομή χρησιμοποιεί το IGMP πρωτόκολλο για τη διανομή τη δημιουργία ροών αντιγράφων του IPTV περιεχομένου και για τη συμμετοχή ή την αποχώρηση μιας IPTVCD από/σε μία

multicast ομάδα. Για την ασφάλεια του διανεμηθέν IPTV περιεχομένου υπάρχουν δύο τεχνικές προστασίας, η υπό όρους πρόσβαση (Conditional Access - CA) και η διαχείριση των ψηφιακών δικαιωμάτων (Digital Rights Management - DRM).

## Βιβλιογραφία

- [1] O'Driscoll G. (2008), Next Generation IPTV Services and Technologies, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [2] <http://www.hdtvinfoport.com/Digital-TV.html> (Τελ. πρόσβαση 20/02/2010)
- [3] <http://www.atsc.org/members/> (Τελ. πρόσβαση 20/02/2010)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/ATSC\\_\(standards\)](http://en.wikipedia.org/wiki/ATSC_(standards)) (Τελ. πρόσβαση 20/02/2010)
- [5] <http://www.dvb.org/> (Τελ. πρόσβαση 20/02/2010)
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Association\\_of\\_Radio\\_Industries\\_and\\_Businesses](http://en.wikipedia.org/wiki/Association_of_Radio_Industries_and_Businesses) (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Passive\\_optical\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Passive_optical_network) (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [8] <http://en.wikipedia.org/wiki/DOCSIS> (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cable\\_modem\\_termination\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Cable_modem_termination_system) (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/IPTV> (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [11] <http://www.radio-electronics.com/info/broadcast/digital-video-broadcasting/what-is-dvb-rcs-tutorial.php> (Τελ. πρόσβαση 21/02/2010)
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/SONET> (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Metro\\_Ethernet](http://en.wikipedia.org/wiki/Metro_Ethernet) (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [14] [http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\\_14/paper\\_14.shtml](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_14/paper_14.shtml) (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [15] <http://www.cs.cf.ac.uk/Dave/Multimedia/node258.html> (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [16] [http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper\\_14/paper\\_14.shtml](http://www.bbc.co.uk/rd/pubs/papers/paper_14/paper_14.shtml) (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [17] [http://aias.iit.demokritos.gr/~gardikis/material/DTV\\_3\\_Multiplexing.pdf](http://aias.iit.demokritos.gr/~gardikis/material/DTV_3_Multiplexing.pdf) (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [18] <http://el.wikipedia.org/wiki/UDP> (Τελ. πρόσβαση 23/02/2010)
- [19] [http://www.search.com/reference/Internet\\_Group\\_Management\\_Protocol](http://www.search.com/reference/Internet_Group_Management_Protocol) (Τελ. πρόσβαση 03/03/2010)
- [20] [http://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_Group\\_Management\\_Protocol](http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Group_Management_Protocol) (Τελ. πρόσβ. 26/02/2010)
- [21] <http://tedkkavalas.gr/doc/ansers.doc> (Τελ. πρόσβαση 26/02/2010)
- [22] <http://wiki.mikrotik.com/wiki/IGMP-Proxy> (Τελ. πρόσβαση 26/02/2010)
- [23] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-4051EN.pdf> (Τελ. πρόσβαση 27/02/2010)
- [24] <http://www.compactpci-systems.com/pdfs/Agilent.Sep06.pdf> (Τελ. πρόσβαση 27/02/2010)
- [25] <http://www.pctechguide.com/glossary/WordFind.php?wordInput=Blockiness> (Τελ. πρόσβ. 27/02/2010)
- [26] [http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-005/\\_0686.htm](http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037/dir-005/_0686.htm) (Τελευταία πρόσβαση 27/02/2010)
- [27] [http://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_watermarking](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_watermarking) (Τελ. πρόσβαση 25/02/2010)
- [28] <http://www.in.gr/news/article.asp?lngEntityID=212855> (Τελ. πρόσβαση 26/02/2010)
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/ISDB> (Τελ. πρόσβαση 26/02/2010)
- [30] <https://www.ip.philips.com/licensing/vcps/index.html> (Τελ. πρόσβαση 26/02/2010)



---

# Κεφάλαιο 4

## WiMAX

---



#### 4.1 Εισαγωγή

Πριν την απόδοση της έννοιας του WiMAX κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη αναφορά στο IEEE 802 σύνολο προτύπων. Το σύνολο αυτό περιλαμβάνει διεθνή πρότυπα για τοπικά και μητροπολιτικά κυρίως δίκτυα όπως το IEEE 802.3 (γνωστό και ως Ethernet), εξετάζοντας τη μετάδοση μέσω του φυσικού και του MAC επιπέδου, αφήνοντας το επίπεδο δικτύου και τα ανωτέρω του σε άλλα διεθνή πρότυπα. Το σύνολο αυτών των προτύπων αναγνωρίζονται μετέπειτα από τον ISO.

Το 1998 συστάθηκε η ομάδα IEEE 802.16, για την ανάπτυξη ενός προτύπου για την ασύρματη ευρυζωνική μετάδοση στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 10 – 66 GHz, για τη διάδοση σημάτων σε περιβάλλον οπτικής επαφής. Η IEEE 802.16 ομάδα ακολούθως θέλησε να επεκτείνει τη χρήση του προτύπου και σε περιβάλλοντα μη οπτικής επαφής (Non Line of Sight - NLOS) χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 2 – 11 GHz. Η τροποποίηση του αρχικού αυτού προτύπου ονομάστηκε IEEE 802.16a. Το 2004 ένα νέο πρότυπο ονόματι IEEE 802.16-2004, ήλθε να αντικαταστήσει τις προηγούμενες εκδόσεις προτύπων ενώ το Δεκέμβρη του 2005 η IEEE ομάδα ολοκλήρωσε και ενέκρινε το IEEE 802.16e-2005 το οποίο δημοσιεύθηκε το Φεβρουάριο του 2006. Το προαναφερθέν πρότυπο αποτελεί τροποποίηση του IEEE 802.16-2004, στο οποίο προστέθηκε η υποστήριξη της εν κινήσει λειτουργίας. Το IEEE 802.16e-2005 αποτέλεσε τη βάση για τις νομαδικές και εν κινήσει εφαρμογές και συχνά προσφωνείται mobile WiMAX. Σήμερα η τρέχουσα έκδοση είναι η IEEE 802.16-2009 η οποία εν συνεχεία τροποποιήθηκε από το IEEE 802.16j-2009 πρότυπο. Το σύνολο των IEEE 802.16 προτύπων είναι γνωστά και ως πρότυπα ασύρματης ευρυζωνικής μετάδοσης (Broadband Wireless Access - BWA).

Το WiMAX είναι μια ασύρματη τεχνολογία για τη μετάδοση δεδομένων. Συχνά επικρατεί μία σύγχυση σχετικά με τον όρο “WiMAX πρότυπο”. Το WiMAX δεν είναι ένα πρότυπο αλλά ένας όρος marketing ο οποίος έχει γίνει συνώνυμος με τα BWA δίκτυα που χρησιμοποιούν την IEEE 802.16 σειρά προτύπων, με τον ίδιο τρόπο που το WiFi είναι συνώνυμο των BWA δικτύων που χρησιμοποιούν την IEEE 802.11 σειρά προτύπων. Ο όρος IEEE 802.16 χαρακτηρίζει το σύνολο των προτύπων που έχει συγγράψει το ινστιτούτο ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών για την ανάπτυξη προτύπων WMANs δικτύων σε παγκόσμιο επίπεδο.

## 4.2 WiMAX Forum

Το WiMAX Forum συστάθηκε τον Απρίλιο του 2001 και αποτελεί ένα μη κερδοσκοπικό διεθνή οργανισμό με σκοπό την πιστοποίηση της συμβατότητας και της διαλειτουργικότητας των προϊόντων που βασίζονται στα IEEE 802.16 και ETSI HIPERMAN πρότυπα. Επειδή το IEEE καθορίζει μόνο τις προδιαγραφές, αλλά δεν ελέγχει τον εξοπλισμό ως προς τη συμμόρφωση του με αυτές τις προδιαγραφές, το WiMAX Forum δημιούργησε στα μέσα του 2005 ένα εργαστήριο πιστοποίησης της συμμόρφωσης και της διαλειτουργικότητας του εξοπλισμού για τη σταθερή επικοινωνία, με αρχική λειτουργία στο φάσμα των 3.5 και 5.8 GHz. Κάποιοι προμηθευτές οι οποίοι δεν είναι επισήμως πιστοποιημένοι από το WiMAX Forum, προσέφεραν ήδη κάποια προϊόντα υποστηρίζοντας ότι μέσω μιας αναβάθμισης λογισμικού ο εξοπλισμός τους είναι “WiMAX-ready”, “WiMAX-compliant”, ή “pre-WiMAX”.

Οι πρώτες πιστοποιήσεις εκδόθηκαν στις αρχές του 2006 μόνο για εξοπλισμούς προϊόντων που προοριζόντουσαν για τη σταθερή επικοινωνία. Τα προϊόντα αυτά φέρουν το λογότυπο πιστοποίησης “WiMAX Forum Certified”, με το λογότυπο αυτό να αποτελεί βασικό κριτήριο για τη βιωσιμότητα τους στην αγορά

Τα μέλη του WiMAX Forum είναι κατασκευαστές συστημάτων και ημιαγωγών, προμηθευτές εξοπλισμού, φορείς εκμετάλλευσης δικτύου, ακαδημαϊκοί και άλλοι τηλεπικοινωνιακοί παράγοντες. Στις μέρες μας το WiMAX Forum περιλαμβάνει περισσότερες από 420 εταιρείες-μέλη και ισχυρίζεται ότι από τον Οκτώβριο του 2009 έχουν αναπτυχθεί περισσότερα από 500 WiMAX δίκτυα (σταθερά και κινητά) σε περισσότερες από 145 χώρες.

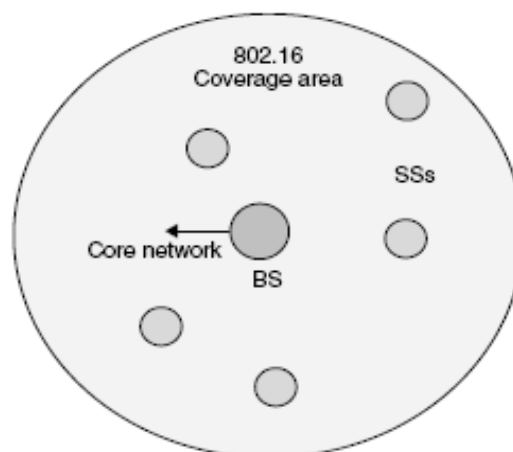
Το WiMAX Forum αποτελείται από οκτώ ομάδες εργασίας (Working Groups) κάθε μία από τις οποίες εξετάζει τις ιδιαίτερες πτυχές του WiMAX για την εξασφάλιση της επιτυχούς υιοθέτησης και επέκτασής του. Αυτές οι ομάδες καλύπτουν τους εξής τομείς [9, 10]:

- Εφαρμογής (Application Working Group - AWG)
- Πιστοποίησης (Certification Working Group - CWG)
- Εξελικτική τεχνική ομάδα (Evolutionary Technical Working Group - ETWG)
- Καθολικής περιαγωγής (Global Roaming Working Group - GRWG)
- Μάρκετινγκ (Marketing Working Group - MWG)

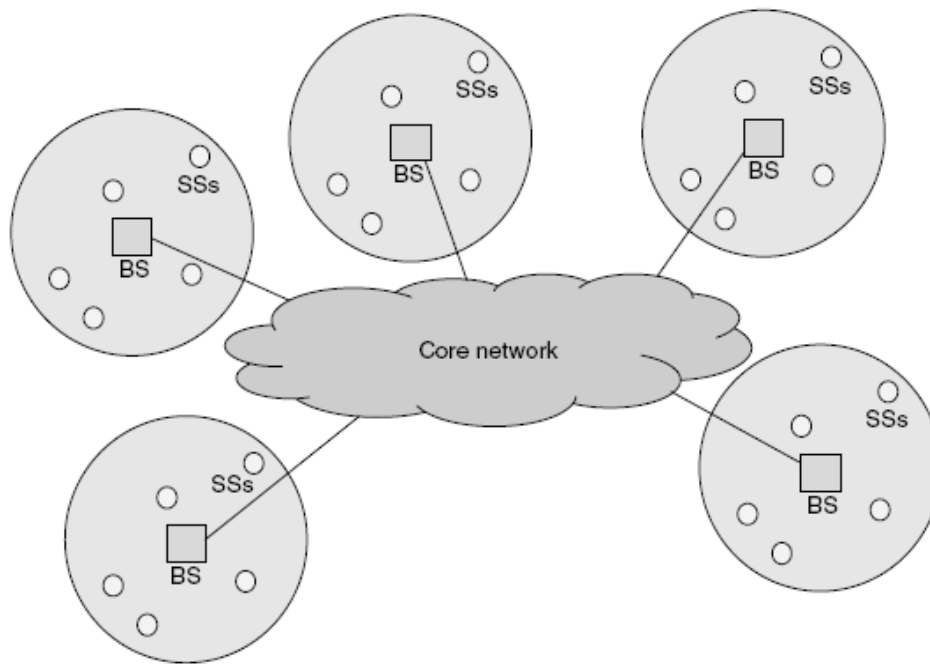
- Δικτύωσης (Network Working Group - NWG)
- Ρυθμιστική (Regulatory Working Group - RWG)
- Φορέων παροχής υπηρεσιών (Service Provider Working Group - SPWG)
- Τεχνική (Technical Working Group - TWG)

#### 4.3 Δομή δικτύου WiMAX

Το μοντέλο ενός WiMAX δικτύου είναι όμοιο με το μοντέλο των κυψελοειδών δικτύων τηλεφωνίας. Κάθε περιοχή κάλυψης του WiMAX δικτύου αποτελείται από ένα σταθμό βάσης (Base Station - BS) και έναν ή περισσότερους σταθμούς συνδρομητών (Subscriber Stations - SSs). Στην περίπτωση της IEEE 802.16e-2005 προδιαγραφής ο σταθμός συνδρομητή συναντάται με τον όρο MS (Mobile Station). Οι σταθμοί βάσης παρέχουν υπηρεσίες σύνδεσης σε δίκτυα πυρήνα (Core Networks - CNs). Ένας σταθμός βάσης διαθέτει μία ή περισσότερες κεραίες ευρείας ζώνης κάθε μία από τις οποίες κατατέμνεται σε μικρότερους τομείς, οι οποίοι όλοι μαζί παρέχουν ολοκληρωμένη κάλυψη 360°. Η αρχιτεκτονική η οποία μόλις περιγράφηκε απεικονίζεται στο σχήμα 4.1 η οποία αντιπροσωπεύει την απλούστερη μονάδα (cell) κάλυψης δικτύων. Αυτές οι μονάδες περιοχών κάλυψης μπορούν να ομαδοποιηθούν για να σχηματίσουν ένα μεγαλύτερο WiMAX δίκτυο, όπου οι σταθμοί βάσης θα διασυνδέονται μέσω ενός δικτύου πυρήνα (Core Network - CN) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1 Περιοχή κάλυψης του IEEE 802.16 δικτύου [1]



Σχήμα 4.2 Παράδειγμα IEEE 802.16 δικτύου [1]

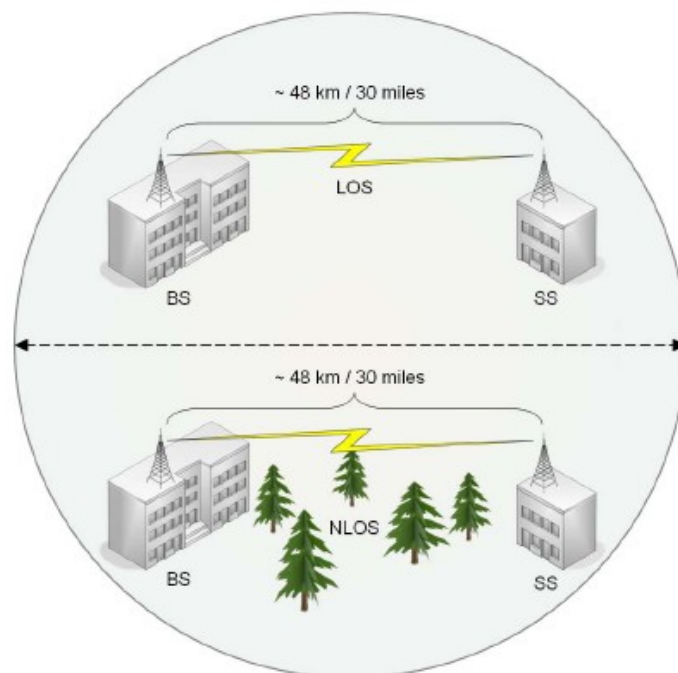
Ο εξοπλισμός στο χώρο του συνδρομητή (CPE) διακρίνεται στον εξοπλισμό εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Ο εξωτερικός εξοπλισμός είναι περίπου όσο το μέγεθος ενός φορητού υπολογιστή και η εγκατάστασή του είναι όμοια με αυτή μιας οικιακής δορυφορικής κεραίας. Ο εσωτερικός εξοπλισμός είναι συγκρίσιμος σε μέγεθος με το μέγεθος ενός καλωδιακού μόντεμ ή ενός DSL μόντεμ ή μπορεί να έχει τη μορφή μιας PCMCIA κάρτας ενσωματωμένης σε ένα laptop ή ένα κινητό τηλέφωνο. Με τη χρήση του εξοπλισμού εσωτερικού χώρου υπάρχουν απώλειες σήματος και ο συνδρομητής θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σταθμό βάσης [1]. Οι συσκευές που υποστηρίζουν το mobile WiMAX διαθέτουν ενσωματωμένες πανκατευθυντικές κεραίες και είναι λιγότερο αποδοτικές αλλά έχουν το πλεονέκτημα της φορητότητας. Οι τρέχουσες υλοποιήσεις επιτυγχάνουν ρυθμοαπόδοση 2 Mbit/s για συμμετρική/παράλληλη μετάδοση σε ακτίνα 10 km. Στην περίπτωση που η μετάδοση είναι ασύμμετρη η ταχύτητα μπορεί να διαμορφώνεται στο 1.5 Mbit/s στην άνω ζεύξη και 0.5 Mbit/s στην κάτω ζεύξη ή αντίστροφα.

### 4.3.1 Τοπολογίες σύνδεσης δικτύου

Το WiMAX υποστηρίζει τις εξής τοπολογίες σύνδεσης: Την Point-To-Point (PTP), την Point-To-Consecutive-Point (PTCP), την Point-To-Multipoint (PMP), την τοπολογία πλέγματος (mesh topology) και τη multihop relay τοπολογία.

#### 4.3.1.1 Point-To-Point

Όπως υποδηλώνεται από το όνομά της, η PTP τοπολογία συνδέει απευθείας δύο διακριτούς κόμβους. Η μέγιστη περιοχή κάλυψης που προσφέρει είναι περίπου 48 χιλιόμετρα, υποστηρίζοντας τη LOS ή τη NLOS διάδοση σήματος. Η PTP τοπολογία σύνδεσης προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έναντι των PMP και mesh τοπολογιών (σχήμα 4.3) [5].



Σχήμα 4.3 PTP τοπολογία σύνδεσης [5]

#### 4.3.1.2 Point-To-Consecutive-Point

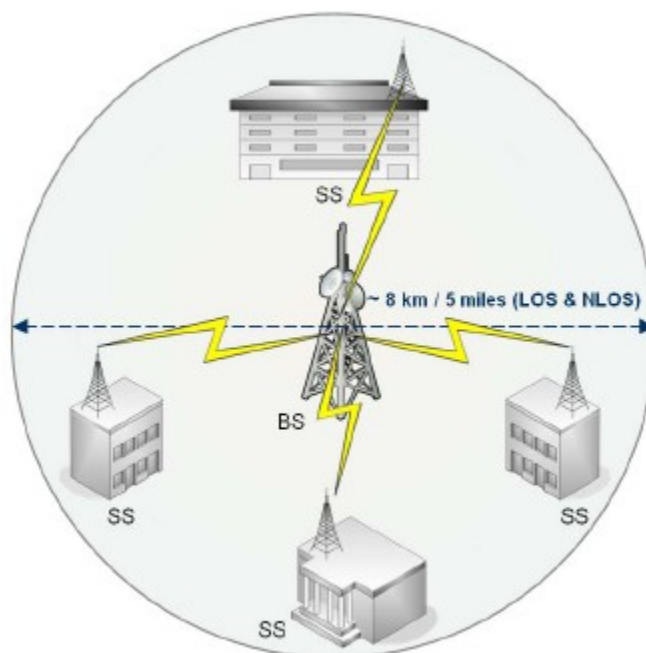
Η PTCP τοπολογία ορίζει τη δημιουργία κλειστού βρόχου με πολλαπλές PTP συνδέσεις.

#### 4.3.1.3 Point-To-Multipoint

Το WiMAX χρησιμοποιεί πιο συχνά την PMP τοπολογία σύνδεσης. Η PMP τοπολογία αποτελείται από έναν κεντρικό σταθμό βάσης υποστηρίζοντας πολλαπλούς σταθμούς συνδρομητών (σχήμα 4.4). Τα PMP δίκτυα λειτουργούν σε περιοχές οπτικής ή μη διάδοσης σήματος. Κάθε PMP σταθμός βάσης έχει μια κλίμακα λειτουργίας της τάξης των 8 Km. Τα κυψελοειδή δίκτυα τηλεφώνου είναι ένα τυπικό παράδειγμα χρήσης της PMP τοπολογίας [5].

#### 4.3.1.4 Τοπολογία πλέγματος

Μια πιο πρόσφατη ασύρματη τοπολογία δικτύωσης που εφαρμόζεται και από τη Wi-Fi τεχνολογία είναι η τοπολογία πλέγματος (mesh topology). Εκτός των PTP και PMP τοπολογιών, το πρότυπο IEEE 802.16a υιοθετεί την τοπολογία πλέγματος. Η τοπολογία πλέγματος είναι ένας συνδυασμός των PTP και PMP τοπολογιών με κάθε κόμβο συνδρομητή να είναι ικανός να επικοινωνεί απευθείας με άλλους κόμβους, δηλαδή κάθε σταθμός συνδρομητή να μπορεί να λειτουργήσει σα δρομολογητής, για την αναμετάδοση δεδομένων σε κόμβους οι οποίοι δεν

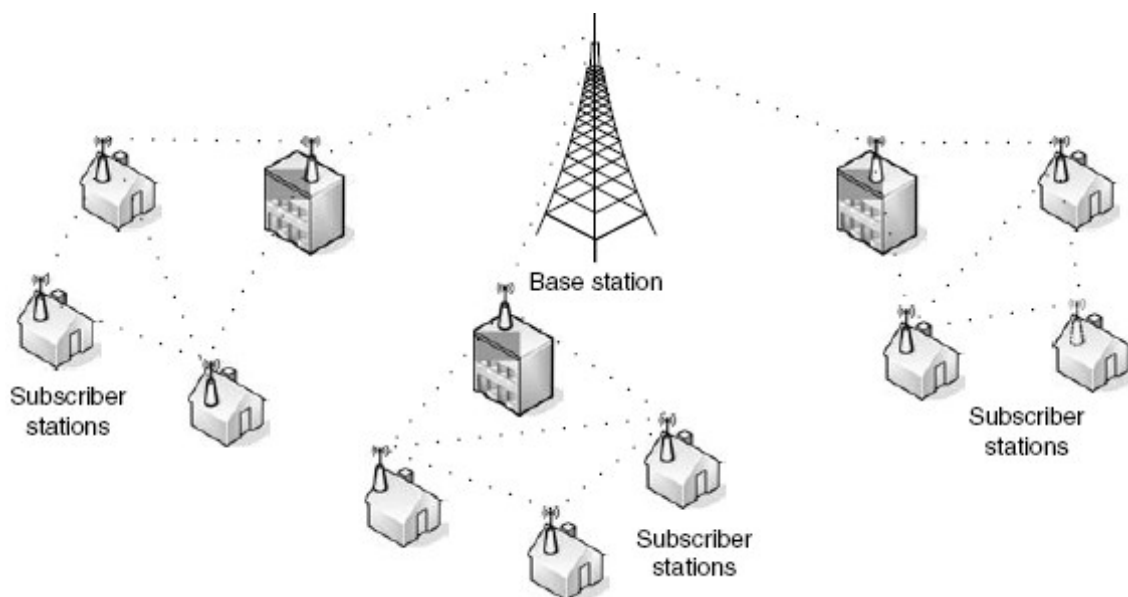


Σχήμα 4.4 PTM τοπολογία σύνδεσης [5]



έχουν οπτική επαφή με το σταθμό βάσης (σχήμα 4.5). Αποτελεί συνεπώς μια πιο εύκαμπτη, αποτελεσματική και αξιόπιστη αρχιτεκτονική βασισμένη στην έννοια του πολλαπλού άλματος (multihop). Τα ασύρματα δίκτυα που ακολουθούν την τοπολογία πλέγματος χαρακτηρίζονται από σταθμούς συνδρομητών με περισσότερη νοημοσύνη σε σχέση με τους σταθμούς συνδρομητών και τους σταθμούς βάσης που ακολουθούν την RTP και RMP τοπολογία. Σε ένα RMP δίκτυο, όλες οι συνδέσεις πρέπει να διέρχονται από το σταθμό βάσης, ενώ στην τοπολογία πλέγματος κάθε σταθμός συνδρομητή μπορεί να ενεργήσει σαν ένα AP το οποίο είναι ικανό να δρομολογεί πακέτα στους γειτονικούς σταθμούς συνδρομητών ώστε να διευρύνει τη γεωγραφική κάλυψη ενός δικτύου.

Η δρομολόγηση κατά μήκος του δικτύου μπορεί να χρησιμοποιεί τους προκαθορισμένους πίνακες δρομολόγησης είτε να παράγει τις διαδρομές μετά από απαίτηση. Η τοπολογία πλέγματος υποδιαιρείται σε δύο επιμέρους τοπολογίες, τη switched mesh και τη routed mesh τοπολογία. Στη switched mesh τοπολογία υπάρχει μια σταθερή προκαθορισμένη διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου με όλα τα πακέτα να ακολουθούν την ίδια διαδρομή κατά τη μεταφορά τους, χωρίς όμως να υπάρχει ένα μόνο μονοπάτι μεταξύ πηγής και προορισμού. Αν η σύνδεση είναι ανενεργή ή η ποιότητα υπηρεσίας έχει υποβαθμιστεί,



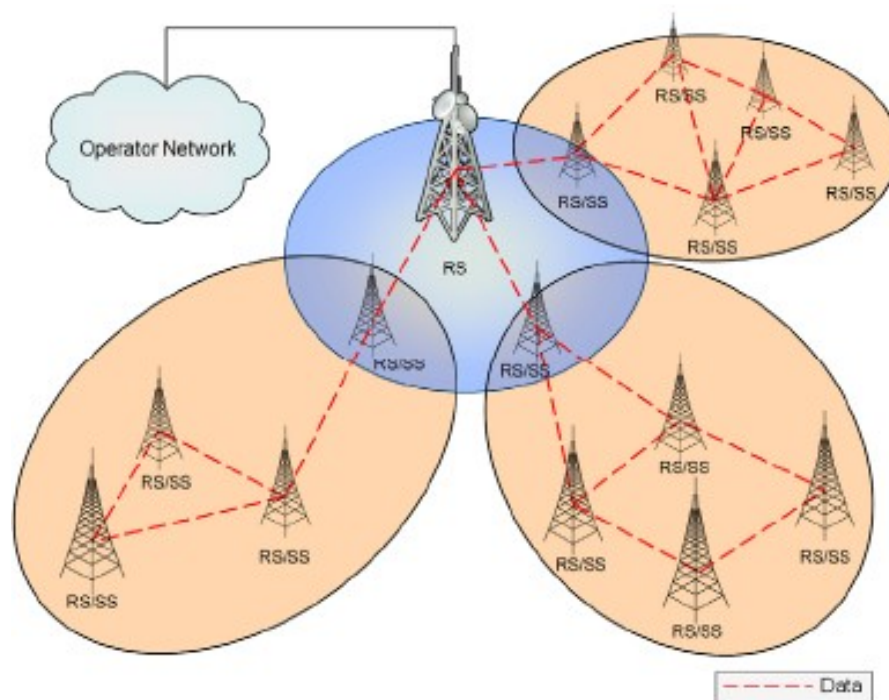
Σχήμα 4.5 Τοπολογία πλέγματος [1]

καθιερώνεται μια νέα διαδρομή αντικαθιστώντας την παλιά. Στη routed mesh τοπολογία τα πακέτα μπορούν να ακολουθήσουν διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους. Ωστόσο διακρίνουμε δύο επιμέρους περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο κόμβος γνωρίζει όλους τους κόμβους του δικτύου ενώ στη δεύτερη περίπτωση κάθε κόμβος γνωρίζει μόνο τους γειτονικούς του. Η πρώτη περίπτωση είναι προτιμότερη έναντι της δεύτερης διότι επιλέγεται το καλύτερο μονοπάτι για τη μετάδοση των δεδομένων. Ωστόσο μέθοδος αυτή είναι πιο πολύπλοκη και δαπανηρή εξαιτίας του ότι απαιτείται μεγαλύτερο μέγεθος μνήμης, υψηλότερη επεξεργαστική ισχύς και ένας σύνθετος αλγόριθμος δρομολόγησης.

Όταν το φορτίο των δεδομένων που διακινούνται είναι μεγάλο τότε η τοπολογία πλέγματος χρησιμοποιεί κάποιο εναλλακτικό μονοπάτι εκμεταλλευόμενη έτσι αποτελεσματικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Ένα πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας οι μειωμένες απαιτούμενες δαπάνες. Εξαιτίας των χαρακτηριστικών ευφυΐας των κόμβων των συνδρομητών απαιτείται μικρότερος αριθμός εξοπλισμού (δρομολογητών, switches κλπ). Ωστόσο η αύξηση του αριθμού των κόμβων στην τοπολογία πλέγματος εισάγει επιπλέον καθυστέρηση στο δίκτυο υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα υπηρεσιών ευαίσθητων ως προς την καθυστέρηση όπως είναι αυτή της VoIP.

#### **4.3.1.5 Multi-Hop Relay**

Η multi-hop relay τοπολογία (σχήμα 4.6) όπως ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16j-2009 στοχεύει στην επέκταση του εύρους της περιοχής που καλύπτει ο σταθμός βάσης, επιτρέποντας στους SSs/MSs την αναμετάδοση δεδομένων



Σχήμα 4.6 Multi-hop τοπολογία σύνδεσης [5]

δρώντας έτσι σαν σταθμοί αναμετάδοσης (Relay Stations – RSs). Τα δεδομένα που προορίζονται για μετάδοση σε έναν RS ή σε έναν SS/MS, σε εύρος μεγαλύτερο από αυτό που ο σταθμός βάσης μπορεί να υποστηρίξει, αναμεταδίδονται μέσω ενός γειτονικού RS. Ένας σταθμός αναμετάδοσης μπορεί να προωθήσει δεδομένα μόνο σε έναν SS/MS που μπορεί να παίξει με τη σειρά του το ρόλο του RS. Αν και εξ' ορισμού η συγκεκριμένη τοπολογία προορίζεται για την NLOS διάδοση σήματος, τεχνικά μπορεί να λειτουργήσει και σε LOS περιβάλλοντα. Το μέγιστο εύρος λειτουργίας κάθε κόμβου στη multi-hop relay τοπολογίας είναι περίπου 8 Km.

#### 4.4 Υποστηριζόμενες ζώνες συχνότητων

Κάθε πρότυπο ορίζει διαφορετικές ζώνες λειτουργίας συχνότητων στις οποίες μπορεί να εκπέμψει ο σταθμός βάσης και ο σταθμός συνδρομητή, οι οποίες θα πρέπει να είναι τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη πολλαπλάσιες των 250 KHz. Η αρχική έκδοση του WiMAX (IEEE 802.16) σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε συχνότητες από 10 έως 66 GHz. Η ζώνη αυτή προοριζόταν για μεταδόσεις σε

συνθήκες οπτικής επαφής, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 120Mbps. Κατόπιν το IEEE 802.16a πρότυπο εκτός της ζώνης των 10 – 66 GHz, υιοθέτησε επιπλέον μια χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων για τη λειτουργία του, που κυμαίνεται μεταξύ 2 - 11 GHz. Η ζώνη αυτή προορίζεται για μεταδόσεις σε συνθήκες μη οπτικής επαφής με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων που φθάνουν τα 70Mbps. Το εύρος ζώνης του καναλιού παίρνει τιμές οι οποίες διαιρούνται με οποιαδήποτε δύναμη του 2, αλλά όχι μικρότερες από 1.25 MHz, με το εύρος ζώνης των καναλιών να είναι συνήθως πλάτους 25 ή 28 MHz. Εν συνεχεία η λειτουργία της IEEE802.16-2004 προδιαγραφής ορίζεται στα 2.5, 3.5 και 5.8 GHz. Ωστόσο κάποια προϊόντα που λειτουργούν στη ζώνη των 5.8 GHz δεν είναι πιστοποιημένα από το WiMAX Forum. Άρα η πρόταση περί συμβατότητας των προϊόντων με το IEEE 802.16-2004 είναι εν μέρει σωστή μιας και η προδιαγραφή αυτή χρησιμοποιεί τα 5.8 GHz ως συχνότητα λειτουργίας.

Οι διάφορες χώρες διακρίνουν τις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούν σε δύο κατηγορίες τις «αδειοδοτούμενες» και τις «ελεύθερες». Αυτές οι δύο κατηγορίες ζωνών συχνοτήτων δεν είναι ανταγωνιστικές μιας και δεν χρησιμοποιούνται για τους ίδιους τύπους υπηρεσιών. Παραδοσιακά το IEEE 802.16-2004 χρησιμοποιεί τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων και το IEEE 802.16e-2005 τις αδειοδοτούμενες ζώνες. Η IEEE 802.16e-2005 προδιαγραφή μπορεί χρησιμοποιώντας την ελεύθερη ζώνη να υποστηρίξει και τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από το IEEE 802.16-2004 πρότυπο. Για παράδειγμα η χρήση των 2.5 GHz για όσους δε μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα 3.5 GHz στο IEEE 802.16-2004, θεωρείται ότι ανήκει στην αδειοδοτούμενη ζώνη συχνοτήτων. Σε κάποιες χώρες, ορισμένες ζώνες συχνοτήτων οι λεγόμενες *agnostic licensed bands* μπορούν να χρησιμοποιούνται από δύο διαφορετικές τεχνολογίες. Αυτό ωστόσο δεν είναι επιτρεπτό σε όλες τις χώρες. Για παράδειγμα, η αδειοδοτούμενη ζώνη συχνοτήτων του WiMAX μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο από τη WiMAX τεχνολογία. Επιπλέον περιορισμοί που τίθενται είναι ότι η IEEE 802.16e-2005 προδιαγραφή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες χώρες. Ο πίνακας 4.1 δείχνει τις συχνότητες λειτουργίας του WiMAX ανά τον κόσμο [4].

**Πίνακας 4.1** Συχνότητες λειτουργίας WiMAX ανά τον κόσμο [4]

| Περιοχή                    | Αναφερόμενες ζώνες συχνοτήτων WiMAX |
|----------------------------|-------------------------------------|
| ΗΠΑ                        | 2.3, 2.5 και 5.8 GHz                |
| Κεντρική και νότια Αμερική | 2.5, 3.5 και 5.8 GHz                |
| Ευρώπη                     | 3.5 and 5.8 GHz; πιθανόν: 2.5 GHz   |
| Νοτιοανατολική Ασία        | 2.3, 2.5, 3.3, 3.5 και 5.8 GHz      |

#### 4.5 WiMAX πρότυπα

Η IEEE 802.16 σειρά προτύπων έχει εξελιχθεί μέσα από τις παρακάτω γενιές:

- **IEEE 802.16:** υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, RTP τοπολογία σύνδεσης σε συνθήκες οπτικής επαφής και σταθερούς σταθμούς συνδρομητών.
- **IEEE 802.16-2004:** υποστηρίζει μία μέση ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, RTP και PMP τοπολογία σύνδεσης για σταθερούς σταθμούς συνδρομητών.
- **IEEE 802.16-2005:** Παρέχει χαμηλούς και μέσους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, στις RTP και PMP τοπολογία σύνδεσης για σταθερούς ή κινητούς σταθμούς συνδρομητών.

Αρχικά τα διάφορα πρότυπα δεν ήταν συμβατά μεταξύ τους, για παράδειγμα ένας σταθμός βάσης που υποστήριζε την IEEE 802.16-2004 προδιαγραφή δε μπορούσε να διαλειτουργήσει με ένα σταθμό συνδρομητή που υποστήριζε την IEEE802.16e-2005 προδιαγραφή. Ωστόσο το πρόβλημα αυτό έχει ήδη επιλυθεί μέσω chipsets διπλής λειτουργίας (dual-mode) που παρέχουν υποστήριξη και για τις δύο προδιαγραφές.

##### 4.5.1 IEEE 802.16

Η IEEE 802.16 (πρώην IEEE 802.16.1) προδιαγραφή, η οποία εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2001 και εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2002 είναι η πρώτη έκδοση της 802.16 σειράς προτύπων. Λειτουργεί στη 10 – 66 GHz ζώνη συχνοτήτων για κανάλια εύρους ζώνης 20 - 25 MHz για την περιοχή των Η.Π.Α. και εύρους ζώνης 28 MHz για την Ευρώπη. Δεδομένου ότι οι συχνότητες αυτές είναι υψηλές, το

μήκος κύματος είναι μικρό και άρα η διάδοση είναι δυνατή μόνο σε περιβάλλον οπτικής επαφής. Υποστηρίζει μόνο τη PTP και PMP τοπολογία σύνδεσης και χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης μονού φέροντος (Single Carrier - SC), με το φυσικό επίπεδο του wirelessMAN-SC να υιοθετεί τα QPSK, 16-QAM, 64-QAM σχήματα διαμόρφωσης ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι (πίνακας 4.2).

#### 4.5.2 IEEE 802.16a

Η IEEE 802.16a (πρώην IEEE 802.16.3) προδιαγραφή η οποία επικυρώθηκε τον Ιανουάριο του 2003, αποτελεί τροποποίηση της IEEE 802.16. Επεκτείνει τη χρήση της και στη 2 - 11GHz ζώνη συχνοτήτων για διάδοση σε περιβάλλον μη οπτικής επαφής. Το φυσικό επίπεδο αυτής της προδιαγραφής επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει επιπλέον της διαμόρφωσης απλού φέροντος (WirelessMan SC2 ή a?), την τεχνική ορθογωνικής πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας (OFDM) και την ορθογωνική διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA) που θα εξετασθούν παρακάτω. Επειδή το φαινόμενο των παρεμβολών συναντάται πιο συχνά στην 2-11 GHz ζώνη συχνοτήτων η IEEE 802.16a είναι ιδανική για τη "last mile"<sup>[1]</sup> παροχή σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης. Το πρότυπο αυτό υποστηρίζει

**Πίνακας 4.2** Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ανά σχήμα διαμόρφωσης και μέγεθος καναλιού προδιαγραφής 802.16.1 [1]

| Channel Size (MHz) | Bit Rate (Mbps) |       |       |
|--------------------|-----------------|-------|-------|
|                    | QPSK            | 16QAM | 64QAM |
| 20                 | 32              | 64    | 96    |
| 25                 | 40              | 80    | 120   |
| 28                 | 44.8            | 89.6  | 134.4 |

<sup>[1]</sup> Ο όρος last mile αναφέρεται στο μέρος της υποδομής που βρίσκεται κοντά στο χρήστη σε απόσταση περίπου 1.5 χιλιομέτρου. Με άλλα λόγια η τεχνολογική υποδομή σε συνοικιακό επίπεδο. Η last mile τεχνολογία αποτελεί πρόκληση για μεμονωμένους χρήστες απομακρυσμένων περιοχών, όπου το κόστος της παροχής ευρυζωνικών συνδέσεων με τη χρήση ενσύρματων μέσων ή οπτικών ινών καθίσταται απαγορευτικό.

ρυθμούς μετάδοσης έως 70 Mbps και μέγιστο εύρος μετάδοσης δεδομένων μέχρι 50 km. Όταν το εύρος ζώνης του καναλιού είναι πολύ μεγάλο, κάποιες power-sensitive συσκευές όπως οι φορητοί υπολογιστές και οι συσκευές χειρός αντιμετωπίζουν πρόβλημα κατά τη μετάδοση τους στο σταθμό βάσης και για αυτό προτιμάται το IEEE 802.16a το οποίο είναι εύελικτο ως προς την επιλογή του εύρους ζώνης του καναλιού, παίρνοντας τιμές από 1.25 - 28 MHz. Επιπλέον των PTP και PMP τοπολογιών σύνδεσης η IEEE 802.16a προδιαγραφή εισάγει και τη χρήση της mesh τοπολογίας. Τέλος ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που εισάγει η IEEE 802.16a προδιαγραφή είναι αυτό της προσαρμοστικής διαμόρφωσης (adaptive modulation) σύμφωνα με την οποία παρέχεται ευελιξία ως προς την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης ανάλογα με ένα πλήθος διαφορετικών παραγόντων. Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι τα QPSK, 16QAM, και 64QAM [1].

#### **4.5.3 IEEE 802.16-2004**

Το Σεπτέμβριο του 2003, ορίστηκε το IEEE802.16-2004 πρότυπο αναθεώρησης με σκοπό την ευθυγράμμιση του με τις πτυχές του ETSI HiperMAN προτύπου. Το πρότυπο αυτό ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2004 εκτοπίζοντας τα 802.16-2001, 802.16c-2002 και 802.16a-2003 πρότυπα, συνεπώς τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι όμοια με των προτύπων που αντικατέστησε. Το IEEE 802.16-2004 συχνά προσφωνείται IEEE 802.16d ή fixed WiMAX και δεδομένου του ότι προορίζεται για σταθερή και νομαδική πρόσβαση δεν υποστηρίζει τους εν κινήσει χρήστες του WiMAX. Λειτουργεί τόσο στη 2 - 11 όσο και στην 10-66GHz ζώνη συχνοτήτων. Η ζώνη μεταξύ των 2 - 11GHz επιτρέπει την αυτόματη επανάληψη αιτημάτων (Automatic Repeat Request - ARQ) ως μια προαιρετική λειτουργία του φυσικού επιπέδου. Επιπλέον η ζώνη αυτή επιτρέπει τη χρήση της beamforming τεχνικής καθώς επίσης παρέχει επικύρωση διπλής κατεύθυνσης για την ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων ασφαλείας. Στο φυσικό επίπεδο υποστηρίζει τρεις τύπους διαμόρφωσης τους SC, OFDM και OFDMA και τα BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM σχήματα διαμόρφωσης. Πλην των PTP και PMP τοπολογιών υποστηρίζει και τη mesh τοπολογία σύνδεσης [1].

#### **4.5.4 IEEE 802.16e-2005**

Τον Ιούλιο του 2002 μια ομάδα μελέτης ονόματι IEEE 802.16 Mobile WirelessMAN Task Group, άρχισε να εργάζεται για την παραγωγή μιας τροπολογίας που θα κάλυπτε το φυσικό και MAC επίπεδο για λειτουργία τόσο σε σταθερό όσο και σε κινητό επίπεδο υπηρεσιών στην αδειοδοτούμενη ζώνη συχνοτήτων. Η τροπολογία εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 2005 με το νέο πρότυπο να ονομάζεται IEEE 802.16e-2005 (γνωστό και ως mobile WiMAX) και δημοσιεύθηκε τον Φεβρουάριο του 2006. Στόχος του εν λόγω προτύπου είναι να παράσχει υποστήριξη κινητικότητας στους συνδρομητές που μετακινούνται με τροχαίες ταχύτητες.

Εκτός από τις διορθώσεις για το IEEE 802.16d πρότυπο που αναπτύχθηκε ως IEEE 802.16-2004/Cor1-2005 και δημοσιεύτηκε μαζί με το IEEE802.16e-2005, το mobile WiMAX εισάγει την έννοια του κινητού σταθμού (Mobile Station - MS) ο οποίος είναι ουσιαστικά ο σταθμός συνδρομητή. Οι κατάλληλες ζώνες συχνοτήτων για την υποστήριξη της κινητικότητας είναι αυτές κάτω των 6 GHz με τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων να φθάνουν μέχρι 15 Mbps. Το IEEE 802.16e-2005 αρχικά δεν υπήρξε συμβατό με το IEEE802.16d γι' αυτό κρίθηκε απαραίτητο να γίνουν κάποιες ενημερώσεις στο υλικό και στο λογισμικό. Το IEEE 802.16e αναπτύχθηκε με στόχο την υποστήριξη ενός μεγάλου αριθμού κινητών χρηστών και σε αυτό συντέλεσε η λειτουργία του soft και hard handover, νέου χαρακτηριστικού του MAC επιπέδου που αποτελεί τη βάση για το mobile WiMAX. Στο MAC επίπεδο επαναπροσδιορίζεται ολοκληρωτικά το υπόστρωμα ασφαλείας, παρέχεται υποστήριξη βελτιστοποιημένων επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας για VoIP εφαρμογές ή online παιχνίδια και προστέθηκαν μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας.

Στο φυσικό επίπεδο υιοθετείται μια νέα τεχνική διαμόρφωσης η scalable OFDMA για την υποστήριξη της μεταφοράς δεδομένων σε κανάλια εύρους ζώνης μεταξύ 1.25 έως 20 MHz μέχρι 2048 υποφερόντων, καθιστώντας αυτό τον τύπο δικτύου ισχυρό παρά την ύπαρξη των παρεμβολών. Με την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση σε συνθήκες σήματος καλής ποιότητας χρησιμοποιείται το 64 QAM σχήμα κωδικοποίησης, ενώ σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιείται το BPSK σχήμα κωδικοποίησης. Σε ενδιάμεσες συνθήκες ποιότητας σήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 16 QAM και το QPSK σχήμα διαμόρφωσης. Η εισαγωγή της υποκαναλοποίησης και στην κάτω ζεύξη και γενικότερα η καλύτερη απόδοση της υποκαναλοποίησης στο πρότυπο αυτό αυξάνει τη διαπεραστικότητα του



στους εσωτερικούς χώρους. Άλλες βασικές βελτιώσεις που εισάγονται στο πρότυπο αυτό αφορούν τον FFT αλγόριθμο, τα υβριδικά αυτόματης αναμετάδοσης αιτήματα (Hybrid ARQs) για ακόμη πιο επιτυχή διόρθωση των σφαλμάτων, τα προηγμένα σχήματα FEC ελέγχου λαθών όπως οι στριβλοκώδικες (turbo codes) και ο LDPC (Low-Density Parity Code) κώδικας έλεγχου για την προαιρετική κωδικοποίηση καναλιού, η τεχνική των προσαρμοστικών κεραιών καθώς και η τεχνολογία MIMO κεραιών προκειμένου το WiMAX να λειτουργεί

**Πίνακας 4.3** Συγκριτικός πίνακας IEEE 802.16, 802.16a, 802.16-2004 και 802.16e προτύπων [1]

|                                | 802.16                                                                                                                               | 802.16a                                                                                     | 802.16-2004                                                                                | 802.16e                                                                                     |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frequency range                | 10–66 GHz                                                                                                                            | 2–11 GHz,                                                                                   | 2–11 GHz,<br>10–66 GHz                                                                     | 2–6 GHz                                                                                     |
| Channel conditions             | Line-of-sight only                                                                                                                   | Nonline-of-sight                                                                            | Nonline-of-sight                                                                           | Nonline-of-sight                                                                            |
| Channel bandwidth              | 20, 25, and 28 MHz                                                                                                                   | 1.25–28 MHz                                                                                 | 1.25–28 MHz                                                                                | 1.25–20 MHz                                                                                 |
| Modulation scheme              | QPSK, 16QAM, and 64QAM                                                                                                               | OFDM, QPSK, 16QAM, and 64QAM                                                                | OFDM, QPSK, 16QAM, and 64QAM                                                               | OFDM, QPSK, 16QAM, and 64QAM                                                                |
| Network architecture supported | PTP, PMP                                                                                                                             | PTP, PMP, mesh                                                                              | PTP, PMP, mesh                                                                             | PTP, PMP, mesh                                                                              |
| Bit rate                       | 32–134 Mbps                                                                                                                          | Up to 75 Mbps                                                                               | Up to 75 Mbps                                                                              | Up to 15 Mbps                                                                               |
| Mobility                       | Fixed                                                                                                                                | Fixed                                                                                       | Fixed                                                                                      | Pedestrian mobility—regional roaming, maximum mobility support: 125 km/h                    |
| Typical cell radius            | 1–3 miles                                                                                                                            | Maximum range is 30 miles on the basis of antenna height, antenna gain, and transmit power  | Maximum range is 30 miles on the basis of antenna height, antenna gain, and transmit power | 1–3 miles                                                                                   |
| Applications                   | Replacement of E1/T1 services for enterprises, backhaul for hot spots, residential broadband access, SOHO (small office/home office) | Alternative to E1/T1, DSL, cable backhaul for cellular and WiFi, VoIP, Internet connections | 801.16 plus 802.16a applications                                                           | 802.16-2004 applications plus fixed VoIP, QoS-based applications, and enterprise networking |

ικανοποιητικότερα σε περιοχές μη οπτικής επαφής [1].

Στον πίνακα 4.3 συγκρίνονται τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των προτύπων που περιγράφηκαν.

#### **4.5.5 IEEE 802.16f-2005**

Το πρότυπο αυτό δημοσιεύθηκε το Σεπτέμβριο του 2005 και αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση του IEEE802.16-2004 προτύπου για τη σταθερή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση. Στόχος του είναι ο καθορισμός μιας βάσης διαχείρισης πληροφοριών (Management Information Base - MIB) για το MAC και το φυσικό επίπεδο, καθώς και συναφών διαδικασιών διαχείρισης που θα επιτρέπουν τη διαχείριση των τυποποιημένων 802.16 συσκευών [1].

#### **4.5.6 IEEE 802.16j-2009**

Το IEEE802.16j πρότυπο το οποίο ολοκληρώθηκε το 2008, προτάθηκε για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και του εύρους κάλυψης των IEEE 802.16e δικτύων. Το πρότυπο αυτό βασίζεται στα multi-hop ασύρματα δίκτυα αναμετάδοσης. Η αρχιτεκτονική αυτών των τύπων δικτύων διαφοροποιείται ως προς τη παρουσία ενός ή περισσότερων σταθμών αναμετάδοσης (Relay Stations - RSs) μέσω των οποίων διεξάγεται η επικοινωνία του σταθμού βάσης και του σταθμού συνδρομητή. Η εισαγωγή του χαρακτηριστικού της αναμετάδοσης έχει σχεδιαστεί ώστε να μην έχει κάποια αρνητική επίδραση στις προδιαγραφές του SS/MS. Ο BS αντικαθίσταται από την έννοια του Multihop Relay BS (MR-BS). Κάθε σταθμός αναμετάδοσης να είναι υπό την εποπτεία του γονικού MR-BS. Ο SS/MS θα πρέπει επίσης να είναι ικανός να επικοινωνεί απευθείας με τον MR-BS. Το πρότυπο αυτό προορίζεται για τη λειτουργία στις αδειοδοτούμενες ζώνες συχνοτήτων και βασίζεται στο OFDMA φυσικό επίπεδο. Το φάσμα κάλυψης της περιοχής ενός σταθμού αναμετάδοσης εκτείνεται σε διάμετρο 200 - 500 μέτρων. Αυτό σημαίνει ότι η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης είναι σημαντικά μικρότερη έναντι εκείνης του BS. Ο σταθμός αναμετάδοσης δε διαθέτει κάποια ενσύρματη σύνδεση, λαμβάνοντας και διαβιβάζοντας δεδομένα στον MR-BS και στα τερματικά των χρηστών αντιστοίχως ασύρματα. Συνεπώς το κόστος της backhaul

σύνδεσης με τη χρήση του RS μειώνεται. Ο σταθμός αναμετάδοσης μπορεί να είναι τοποθετημένος σε κάποιο σταθερό σημείο όπως ένα κτίριο είτε να κινείται με τροχαίες ταχύτητες (Mobile Multihop Relay - MMR). Ο ιστός στον οποίο τοποθετείται ο σταθμός αναμετάδοσης δεν απαιτείται να είναι τόσο υψηλός έναντι αυτού του BS, μειώνοντας τις λειτουργικές δαπάνες της μίσθωσης και συντήρησης πύργων.

#### **4.5.7 IEEE 802.16m**

Το πρότυπο IEEE 802.16m είναι η βασική τεχνολογία για τη δεύτερη έκδοση του mobile WiMAX. Προσφέρει τέσσερις φορές μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων από την τρέχουσα έκδοση του mobile WiMAX. Στόχος του προτύπου είναι η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του WiMAX και η επίτευξη εν κινήσει ρυθμών μετάδοσης 100Mbit/s και 1Gbit/s σταθερού και νομαδικού εύρους ζώνης για λειτουργία στην αδειοδοτούμενη ζώνη συχνοτήτων, όπως ορίζεται από την ITU για τα 4G κινητά δίκτυα επόμενης γενιάς. Προς το παρόν δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το εύρος ζώνης καναλιού που θα χρησιμοποιηθεί από το πρότυπο αν και αναμένεται να είναι 20 MHz ή μεγαλύτερο.

Η δεύτερη έκδοση προορίζεται να είναι συμβατή για τους ήδη υπάρχοντες χρήστες του mobile WiMAX αλλά θα υπάρχει και δυνατότητα αναβάθμισης της πρώτης έκδοσης στη δεύτερη. Η δεύτερη έκδοση του mobile WiMAX αναμένεται να είναι διαθέσιμη στο καταναλωτικό κοινό στο χρονικό διάστημα 2011-2012.

### **4.6 Τεχνολογία Έξυπνων Κεραιών**

#### **4.6.1 Συστήματα Κεραιών Πολλαπλής Εισόδου/Εξόδου**

Οι μεταδόσεις σημάτων παραδοσιακά χρησιμοποιούν μία κεραία στον πομπό και μία στο δέκτη. Ένα τέτοιο παράδειγμα συστήματος ονομάζεται SISO (Single Input Single Output), με τον πομπό και το δέκτη να επικοινωνούν μέσω της κωδικοποίησης και της διαμόρφωσης των σημάτων. Ένα SISO σύστημα είναι απλό και οικονομικό στην υλοποίηση του και χρησιμοποιείται στα τηλεοπτικά και

ραδιοφωνικά συστήματα αλλά και στις τεχνολογίες ασύρματων προσωπικών δικτύων όπως το Bluetooth και το Wi-Fi.

Παρότι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων σε ένα κανάλι - χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του εύρους ζώνης του καναλιού, το εύρος ζώνης είναι γενικά περιορισμένο οπότε και χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι όπως η OFDM και η τεχνική πολλαπλών κεραιών. Η ποικιλόμορφη μετάδοση (transmit diversity) εκμεταλλεύεται την πολυδιόδευση αποστέλλοντας πολλαπλά αντίγραφα του ίδιου συμβόλου μέσω δύο ή περισσότερων κεραιών από την εξέμψαση συσκευή χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερα κανάλια επικοινωνίας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι SIMO (Single Input Multiple Output), MISO (Multiple Input Single Output) και MIMO τεχνικές. Τα SIMO συστήματα αναπτύχθηκαν με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας και χρησιμοποιούν μία κεραία στη συσκευή αποστολής σημάτων και πολλαπλές κεραιές στο δέκτη. Ο δέκτης μπορεί να επιλέξει την καλύτερη μεταξύ των κεραιών του ώστε να λάβει το ισχυρότερο σήμα (switched diversity ή selection diversity) ή να συνδυάσει σήματα από όλες τις κεραιές του ώστε να μεγιστοποιήσει το SNR. Η τελευταία τεχνική είναι γνωστή ως MRC (Maximal Ratio Combining). Το πλεονέκτημα της ποικιλόμορφης μετάδοσης είναι ότι η πολυπλοκότητα μετατοπίζεται στο σταθμό βάσης διατηρώντας το κόστος του σταθμού συνδρομητή χαμηλό. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η MISO (Multiple Input Single Output) και η MIMO τεχνικές. Με τη MISO τεχνική γίνεται χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και μίας μόνο κεραιάς στο δέκτη. Σε αυτού του είδους τα συστήματα εφαρμόζεται στον πομπό η STC (Space Time Coding) τεχνική η οποία επιτρέπει τη διαβίβαση αντιγράφων πληροφοριών από δύο κεραιές διαδοχικά σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές.

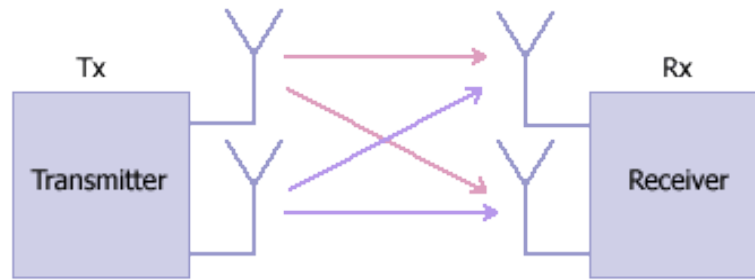
Ακολούθως η MIMO μετάδοση αναφέρεται στη χρήση ισάριθμων πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στο δέκτη. Στη MIMO μετάδοση χρησιμοποιείται είτε η χωρική πολύπλεξη, είτε η STC τεχνική, είτε και οι δύο μαζί. Η εναλλαγή αυτών των καταστάσεων λειτουργίας γίνεται βάση των συνθηκών που επικρατούν σε ένα κανάλι και ονομάζεται προσαρμοστική MIMO εναλλαγή (AMS - Adaptive MIMO Switching). Η χωρική πολύπλεξη είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ανεξάρτητων σημάτων (δηλαδή κωδικοποιημένων και διαμορφωμένων ροών δεδομένων), τα λεγόμενα ρεύματα, από κάθε μία από τις πολλαπλές κεραιές μετάδοσης δηλαδή διαμέσου διαφορετικών χωρικών τομέων. Ως εκ τούτου, η διάσταση του χώρου επαναχρησιμοποιείται περισσότερο από μία φορά. Η ροή

δεδομένων διασπάζεται σε παράλληλες υποροές που μεταδίδονται ταυτόχρονα με τις διαφορετικές κεραιές να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι μετάδοσης (ίδιο εύρος συχνοτήτων). Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο μία κεραιά στο σταθμό συνδρομητή η χωρική πολύπλεξη εφαρμόζεται στην κάτω ζεύξη. Η χωρική πολύπλεξη λειτουργεί μόνο κάτω υπό καλές SNIR (Signal-to-Noise plus Interference) <sup>[2]</sup> συνθήκες δηλαδή προτιμάται για τους χρήστες εκείνους που διαθέτουν καλύτερης ποιότητας σήματα, έτσι ώστε να αφιερώνεται λιγότερος χρόνος για τη διαβίβασή τους.

Σε ένα MIMO σύστημα η ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων με τη STC τεχνική παραμένει η ίδια με το ληφθέν σήμα αυτής της μεθόδου να είναι πιο ισχυρό εξαιτίας του πλεονασμού της μετάδοσης. Εντούτοις με δύο κεραιές μετάδοσης και δύο κεραιές λήψης τα δεδομένα μπορούν να διαβιβαστούν δύο φορές γρηγορότερα σε σχέση με τη STC τεχνική, παρέχοντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ή εξυπηρετώντας περισσότερους χρήστες. Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων είναι έμμεση υπό την έννοια ότι η χωρική πολύπλεξη θα δώσει έμμεσα καλύτερο ρυθμό σφαλμάτων επιτρέποντας υψηλότερου επιπέδου διαμορφώσεις (όπως 16 QAM αντί QPSK).

Γενικά στην υλοποίηση των κυψελοειδών δικτύων κυριαρχεί η χρήση δύο κεραιών στο σταθμό βάσης και μία στο σταθμό συνδρομητή. Με την αύξηση της χρήσης των φορητών συσκευών η χρήση μιας δεύτερης κεραιάς στις φορητές συσκευές είναι συνήθης. Συσκευές που κάνουν χρήση πολλαπλών κεραιών είναι τα κυψελοειδής τεχνολογίας τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές αλλά και συσκευές όπως τα modems και τα set-top boxes. Τα συστήματα κεραιών MIMO εκτός του πολλαπλασιασμού της απόδοσης της μετάδοσης χρησιμοποιούνται για την καλή λειτουργία του WiMAX σε περιβάλλοντα μη οπτικής επαφής. Εάν το MIMO σύστημα διαθέτει ισάριθμο πλήθος κεραιών στον πομπό και στο δέκτη χρησιμοποιώντας την PTP τοπολογία σύνδεσης, με την τοποθέτηση κάθε επιπλέον κεραιάς μπορεί να πολλαπλασιάσει την απόδοση του συστήματος γραμμικά. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.7 ένα 2 X 2 MIMO σύστημα

<sup>[2]</sup>SNIR είναι ο λόγος της ισχύος του επιθυμητού ληφθέντος σήματος ως προς την ισχύ των ανεπιθύμητων σημάτων (θόρυβων και παρεμβολών).



Σχήμα 4.7 MIMO σύστημα κεραιών, 2x2 [2]

διπλασιάζει την απόδοση [2].

#### 4.6.2 Προσαρμοστικά συστήματα κεραιών

Σε ένα προσαρμοστικό σύστημα κεραιάς (Adaptive Antenna System - AAS) τα προς μετάδοση δεδομένα μπορούν να στραφούν προς την κατεύθυνση του δέκτη (σχήμα 4.8). Το WiMAX υποστηρίζει αυτή την τεχνική τόσο στην κάτω όσο και στην άνω ζεύξη, δηλαδή όμοια ο δέκτης κατά τη διάρκεια της λήψης μπορεί να στραφεί προς την κατεύθυνση της εκπέμπουσας συσκευής. Η τεχνική που χρησιμοποιείται από ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται beamforming. Η beamforming τεχνική χρησιμοποιείται στα συστήματα πολλαπλών κεραιών για τη μετάδοση του ίδιου σήματος σε κάθε κεραία, προσαρμόζοντας το πλάτος και τη γωνία του διαγράμματος εκπομπής της κεραιάς μετάδοσης επιτυγχάνοντας αύξηση της φασμαποδοτικότητας, της συνολικής χωρητικότητας του ασύρματου δικτύου

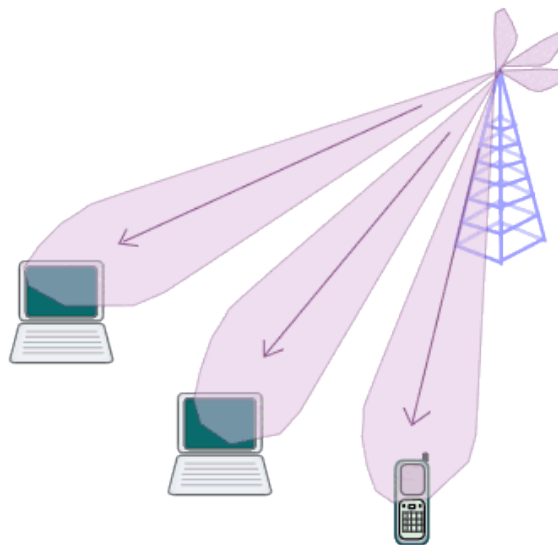


Σχήμα 4.8 WiMAX σταθμός βάσης με χρήση AAS beamforming συστήματος [3]

καθώς και της αξιοπιστίας του.

Στην περίπτωση χρήσης πολλαπλών κεραιών, στο σταθμό βάσης (σχήμα 4.9) γίνεται χρήση της SDMA (Space Division Multiple Access) τεχνικής, όπου οι πολλαπλοί SSs διαχωρίζονται (ως προς το διάστημα) και μπορούν να μεταδώσουν και να λάβουν την ίδια στιγμή από το ίδιο υποκανάλι. Η AAS τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τους πολλαπλούς σταθμούς συνδρομητών εξαλείφοντας τις παρεμβολές από και προς άλλους σταθμούς συνδρομητών βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του σήματος. Σε αντίθεση με τη χωρική πολύπλεξη οι τεχνικές της ποικιλόμορφης μετάδοσης και η beamforming, λειτουργούν αποδοτικά και σε κακές SNIR συνθήκες

Η χρήση της είναι προαιρετική και δεν περιλαμβάνεται στην πιστοποίηση του WiMAX, αλλά λόγω της αποτελεσματικότητάς της ως προς βελτίωση της απόδοσης και της κάλυψης ειδικά στο mobile WiMAX πολλοί προμηθευτές επιλέγουν την ενσωμάτωση αυτής της τεχνικής στα προϊόντα τους. Επιπλέον ο συνδυασμός της AMS τεχνικής με το προσαρμοστικό σύστημα κεραιών προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε ένα WiMAX σύστημα. [3].



**Σχήμα 4.9** WiMAX σταθμός βάσης με χρήση πολλαπλών κεραιών και AAS [3]

#### 4.7 Εφαρμογές WiMAX

Σε ένα WMAN δίκτυο, ο σταθμός βάσης εκτός των συνδέσεων του με τους χρήστες συνδέεται και με το δίκτυο πυρήνα. Συνεπώς η ποιότητα των ευρυζωνικών υπηρεσιών εξαρτάται και από τη διασύνδεση των APs με το δίκτυο κορμού, σύνδεση γνωστή και ως backhaul. Η backhaul σύνδεση αναφέρεται τόσο στη σύνδεση μεταξύ ενός AP και του παρόχου, όσο και στη σύνδεση μεταξύ του παρόχου και του δικτύου πυρήνα. Το κόστος των backhaul συνδέσεων αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης. Αν και αυτό το είδος συνδέσεων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δορυφόρων ωστόσο η χρήση τους προσφέρει περιορισμένο εύρος ζώνης στην άνω ζεύξη και υψηλές καθυστερήσεις. Οι τρέχουσες backhaul συνδέσεις υλοποιούνται με τη μίσθωση T1 γραμμών από ένα τρίτο φορέα παροχής υπηρεσιών οι οποίες είναι αρκετά ακριβές. Έτσι το WiMAX μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση των T1 γραμμών για την υλοποίηση των backhaul συνδέσεων.

Η εισαγωγή του WiMAX αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος ανάπτυξης και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας *καθώς μπορεί να εφαρμοστεί* στα κυψελοειδή δίκτυα κορμού των backhaul συνδέσεων των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας *αποτελώντας έτσι* μια οικονομικότερη πρόταση σε σύγκριση με αυτή της οπτικής ίνας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία και τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών. Επιπλέον των κυψελοειδών συστημάτων το WiMAX μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη backhaul σύνδεση των WiFi hotspots. Η μειωμένη εμβέλεια της WiFi τεχνολογίας αναγκάζει τους διαχειριστές της να τοποθετούν κεραιές σε πολύ κοντινές αποστάσεις ώστε να επιτευχθεί πληρέστερη κάλυψη. Συνεπώς η χρήση του WiMAX μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της περιοχής κάλυψης των WiFi hotspots. Οι backhaul υλοποιήσεις που βασίζονται στο WiMAX χρησιμοποιούν συνήθως την PTP τοπολογία σύνδεσης για LOS περιβάλλοντα.

Επιπλέον τα WiMAX δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως:

- Για την παροχή VoIP υπηρεσιών οι οποίες επιτρέπουν την πραγματοποίηση τηλεφωνικών κλήσεων μέσω Internet στους εν κινήσει χρήστες με πολύ χαμηλές ή και μηδενικές χρεώσεις.
- Για multimedia και real-time εφαρμογές όπως αυτές των βιντεοκλήσεων, των VoD υπηρεσιών και της real-time μετάδοσης τηλεοπτικών ή



ραδιοφωνικών προγραμμάτων, κάτι που για την IEEE 802.11 οικογένεια προτύπων σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό. Η αποστολή ενός μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου με μεγάλα συνημμένα αρχεία καθ' οδόν μέχρι σήμερα είναι πρακτικά ανέφικτη χωρίς το WiMAX, εκτός φυσικά αν χρησιμοποιείται ή όχι και τόσο οικονομική 3G τεχνολογία.

- Για χρήση σε περιοχές που δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί (χώρες τρίτου κόσμου) ή σε περιοχές όπου οι πάροχοι δεν έχουν ισχυρή παρουσία, όπως είναι οι αγροτικές περιοχές αναπτυσσόμενων κρατών.
- Ως εφεδρική λύση σε μια ενδεχόμενη εμφάνιση προβλημάτων των ενσύρματων δικτύων.
- Για την ασφαλή απομακρυσμένη σύνδεση εγκαταστάσεων ιδιωτικών δικτύων με τις κεντρικές τους εγκαταστάσεις. Στα ιδιωτικά αυτά δίκτυα συμπεριλαμβάνονται επιχειρήσεις, κυβερνητικές και τοπικές οργανώσεις, δημόσιοι οργανισμοί καθώς και δίκτυα του τομέα της εκπαίδευσης και της υγείας.
- Για την κάλυψη των αναγκών τηλεοπτικής επιτήρησης (δημόσια ασφάλεια) των απομακρυσμένων και δυσπρόσιτων περιοχών καθώς επίσης και για την πρόληψη της εγκληματικότητας. Παραδείγματα τέτοιων ασύρματων εφαρμογών επιτήρησης είναι αυτά των στρατιωτικών βάσεων και της πρόληψης φυσικών καταστροφών [1].

#### 4.8 Πλεονεκτήματα WiMAX

Το WiMAX παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων ασύρματων και ενσύρματων τεχνολογιών τα οποία εντοπίζονται στους εξής τομείς:

- Γρήγορη εγκατάσταση εντός ολίγων ημερών σε αντίθεση με ένα ενσύρματο δίκτυο όπου η εγκατάστασή του απαιτεί πολλούς μήνες ή ακόμη και χρόνια.
- Αντιμετώπιση των φυσικών περιορισμών που τίθενται λόγω των παραδοσιακών ενσύρματων υποδομών σε περιοχές που είναι αδύνατο να καλυφθούν από τη χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπλήρωμα των δικτύων οπτικών ινών.

- Λογικό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, μεγαλύτερη ευελιξία των επικείμενων επεκτάσεων του δικτύου με λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Φορητότητα. Ο συνδρομητής μπορεί να χρησιμοποιεί τη σύνδεσή του από οπουδήποτε ακόμη και εν κινήσει μέσα στην πόλη ή και ολόκληρη τη χώρα κάτι που δεν είναι εφικτό με τις σημερινές ADSL συνδέσεις, ούτε και από τη Wi-Fi τεχνολογία.

Σε μια ενδεχόμενη μετακόμιση του συνδρομητή δεν είναι απαραίτητο να γίνει εκ νέου ενεργοποίηση ευρυζωνικής σύνδεσης στο χώρο του, όπως ισχύει για τις ADSL γραμμές [1]. φφφφφφ φφφ φφφφ φφφφφφ γγγγγ γγγγγγγγγγγγ σσσ γρα

#### 4.9 Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης

Η IEEE 802 οικογένεια προτύπων χρησιμοποιεί το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer) του OSI μοντέλου για τη μεταφορά δεδομένων, την ανίχνευση και την πιθανή διόρθωση των σφαλμάτων που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο. Αυτό το επίπεδο υποδιαιρείται στα εξής δύο υποεπίπεδα:

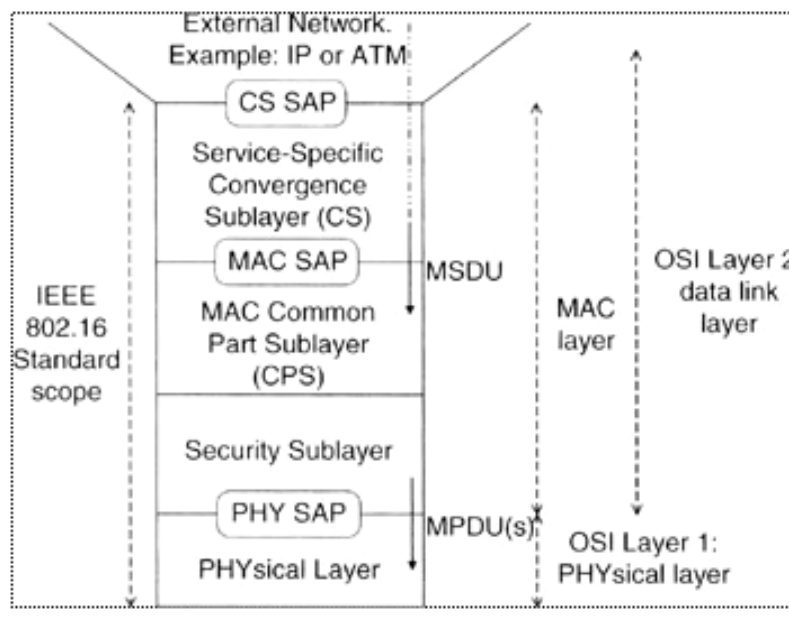
- Στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο κοινό μέσο (Media Access Control - MAC)
- Στο ανώτερο επίπεδο ελέγχου των λογικών συνδέσεων (Logical Link Control - LLC)

Από τα επίπεδα του μοντέλου OSI, η αρχιτεκτονική του WiMAX ορίζει μόνο το φυσικό και το MAC επίπεδο που είναι το κύριο μέρος του επιπέδου ζεύξης δεδομένων με το LLC υποεπίπεδο να βρίσκει εφαρμογή κυρίως στο IEEE 802.2 πρότυπο. Η πρωταρχική λειτουργία του MAC επιπέδου είναι η παροχή μιας διεπαφής μεταξύ των ανώτερων επιπέδων και του φυσικού επιπέδου. Το MAC επίπεδο λαμβάνει από τα ανώτερα επίπεδα πακέτα τα οποία ονομάζονται MAC Service Data Units (MSDUs) και τα οργανώνει σε MAC Protocol Data Units (MPDUs) για την περαιτέρω μεταφορά τους.

Οι κύριες λειτουργίες του MAC επιπέδου είναι:

- Κατάτμηση (segmentation) ή σύνδεση (concatenation) των MAC SDUs σε MAC PDUs.
- Επιλογή του κατάλληλου προφίλ ριπής (burst profile) και του επιπέδου ισχύος για τη μετάδοση των MAC PDUs
- Επαναμετάδοση των εσφαλμένων MAC PDUs που ελήφθησαν από το δέκτη μέσω της ARQ λειτουργίας.
- Έλεγχος της ποιότητας υπηρεσίας και χειρισμός της προτεραιότητας των MAC PDUs.
- Προγραμματισμός της αποστολής των MAC PDUs βάση των διαθέσιμων πόρων του φυσικού επιπέδου.
- Μέσω της διαχείρισης της κινητικότητας (mobility management) παροχή υποστήριξης των υψηλότερων επιπέδων.
- Παροχή ασφάλειας κατά τη μετάδοση δεδομένων και διαχείριση κλειδιών.
- Παροχή λειτουργίας χαμηλής κατανάλωσης και αδρανοποίησης συσκευής.
- 

Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 4.10 το MAC επίπεδο αποτελείται από τρία υποεπίπεδα, το επίπεδο σύγκλισης (Convergence Sublayer - CS), το κοινό επίπεδο (Common Part Sublayer - CPS) και το επίπεδο ασφαλείας (Security Sublayer).



Σχήμα 4.10 Υποεπίπεδα MAC επιπέδου [4]

#### **4.9.1 Επίπεδο Σύγκλισης**

Το επίπεδο σύγκλισης λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του MAC επιπέδου και του τρίτου επιπέδου του OSI μοντέλου, για μια σειρά πρωτοκόλλων υψηλότερου επιπέδου όπως το ATM, το Ethernet και το IP. Είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των λειτουργιών που εξαρτώνται από αυτά τα υψηλότερου επιπέδου πρωτόκολλα, όπως η συμπίεση κεφαλίδας (header suppression) και η απεικόνιση διευθύνσεων (address mapping) όπως είναι οι IP διευθύνσεις. Η απεικόνιση διευθύνσεων είναι απαραίτητη διότι δεν υπάρχει ορατότητα των διευθύνσεων των ανώτερων επιπέδων από το MAC και το φυσικό επίπεδο [4].

Η σουίτα πρωτοκόλλων του IEEE 802.16 ορίζει το επίπεδο σύγκλισης για ATM υπηρεσίες και υπηρεσίες πακέτων. Ωστόσο το WiMAX Forum υλοποιεί το επίπεδο σύγκλισης μόνο για το IP και το Ethernet.

#### **4.9.2 Κοινό Επίπεδο**

Το MAC CPS εκτελεί λειτουργίες σχετικές με τα πακέτα δεδομένων οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων όπως είναι η κατάτμηση και η σύνδεση των MAC SDUs σε MAC PDUs [4].

#### **4.9.3 Υποεπίπεδο ασφαλείας**

Το επίπεδο ασφαλείας είναι υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση, την έγκριση και την κατάλληλη ανταλλαγή κλειδιών μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού συνδρομητή [4].

#### **4.9.4 Καταστολή κεφαλίδας πακέτων**

Ένα από τα βασικά καθήκοντα του επιπέδου σύγκλισης είναι η καταστολή της κεφαλίδας των πακέτων (Payload Header Suppression - PHS). Τα πακέτα που παραδίδονται στο MAC επίπεδο μπορεί να έχουν μέγεθος κεφαλίδας έως και 120 bytes. Το μέγεθος αυτό θεωρείται μεγάλο και με το φαινόμενο της επανάληψης πληροφοριών να είναι συχνό κάποιες από τις πληροφορίες αυτές δε θα πρέπει να διαβιβάζονται εφόσον το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περιορισμένο. Στο WiMAX ο πομπός απαλείφει τα επαναλαμβανόμενα μέρη των κεφαλίδων του ωφέλιμου

φορτίου των MAC SDUs που προέρχονται από τα ανώτερα επίπεδα. Ο δέκτης πρέπει να αποκαταστήσει την κεφαλίδα πριν από τη χρήση των MAC SDUs που λαμβάνει. Η PHS τεχνική βασίζεται σε κάποιους κανόνες οι οποίοι παρέχουν όλες τις απαραίτητες παραμέτρους σχετικά με τη συμπίεση της κεφαλίδας των SDUs. Όταν το SDU φτάνει στο MAC επίπεδο, το επίπεδο σύγκλισης αποφασίζει ποιον κανόνα θα εφαρμόσει βάση παραμέτρων όπως είναι η διεύθυνση προέλευσης προέλευσης και η διεύθυνση προέλευσης. Μόλις επιλεγεί ο κατάλληλος κανόνας παρέχεται το SFID (Service Flow Identifier), το CID (Connection Identifier) και οι σχετικοί παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στο SDU. Ο PHS κανόνας που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από τον τύπο της υπηρεσίας δεδομένου ότι ο αριθμός των bytes που θα απαλειφθούν είναι διαφορετικός για διαφορετικά είδη υπηρεσιών με τη δημιουργία αυτών των κανόνων είναι ευθύνη των ανώτερων επιπέδων και όχι του WiMAX. Η PHS λειτουργία είναι προαιρετική εντούτοις όμως η εφαρμογή της βελτιώνει την αποδοτικότητα του δικτύου σε εφαρμογές όπως το VoIP [4].

#### **4.9.5 Σύνδεσεις και ροές υπηρεσίας**

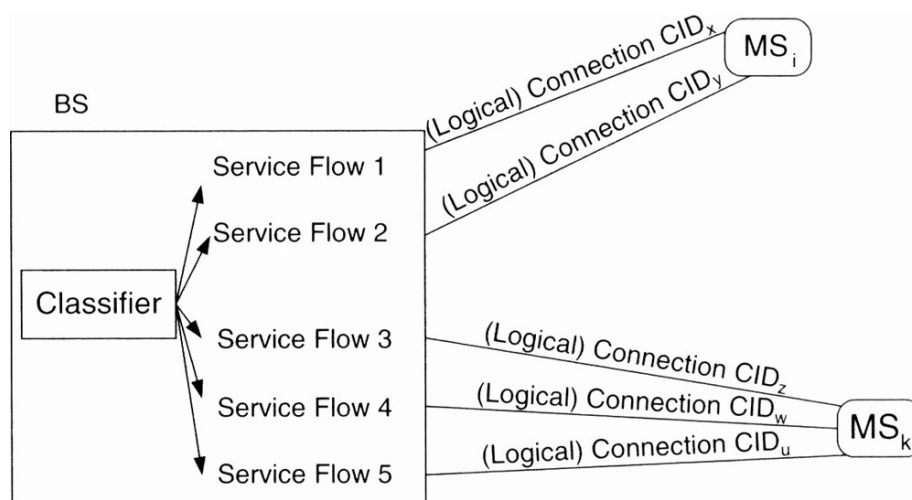
Το MAC επίπεδο του IEEE 802.16-2004 προτύπου είναι connection oriented δηλαδή ορίζεται μία σύνδεση πριν τη μετάδοση δεδομένων. Μία σύνδεση στο MAC επίπεδο συνδέει το σταθμό βάσης και το σταθμό συνδρομητή μονοκατευθυντικά με σκοπό τη μετάδοση μιας ροής υπηρεσίας και προσδιορίζεται μοναδικά από το CID. Συνεπώς το CID ταυτοποιεί μια σύνδεση μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός σταθμού συνδρομητή μέσα από την οποία διέρχονται τα MAC SDUs μιας υπηρεσίας. Τα CIDs είναι διαφορετικά για τη μετάδοση της άνω και της κάτω ζεύξης, με το CID να αποτελεί ένα είδος προσωρινής δυναμικής διεύθυνσης δευτέρου επιπέδου που ορίζεται από το σταθμό βάσης με σκοπό τη μεταφορά δεδομένων και τον έλεγχο κίνησης (control traffic plane). Κάποια CIDs χρησιμοποιούνται για άλλες ανάγκες του συστήματος όπως τη διαχείριση δικτύου, το ranging και τα προσαρμοστικά συστήματα κεραιών. Για την απεικόνιση των διευθύνσεων ανωτέρων επιπέδων στο CID χρησιμοποιείται το επίπεδο σύγκλισης. Μία σύνδεση ορίζεται για ένα μόνο τύπο υπηρεσίας. Παραδείγματος χάριν μία υπηρεσία φωνής και μία υπηρεσία e-mail δεν μπορούν να εξυπηρετούνται από την ίδια σύνδεση. Μετά την καταχώρηση ενός SS/MS στον BS μία σύνδεση συσχετίζεται με μία ροή υπηρεσίας (Service Flow - SF). Μια ροή υπηρεσίας είναι

μία μονοκατευθυντική υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων του MAC επιπέδου στην άνω ή την κάτω ζεύξη η οποία προσδιορίζεται μοναδικά από το SFID. Μια τέτοια ροή ορίζει τις απαιτούμενες παραμέτρους ποιότητας της υπηρεσίας (QoS parameters) για τα SDUs που ανταλλάσσονται στη σύνδεση.

Το επίπεδο σύγκλισης παρέχει τις απαραίτητες μετατροπές και απεικονίσεις (mappings) των δεδομένων σε MAC SDUs που λαμβάνει μέσω του CS SAP (Service Access Point - SAP) από τα ανώτερα επίπεδα. Ένα σημείο πρόσβασης υπηρεσιών (SAP) είναι μία εννοιολογική τοποθεσία μέσω της οποίας ένα επίπεδο του OSI μοντέλου μπορεί να ζητήσει τις υπηρεσίες ενός άλλου επιπέδου του OSI μοντέλου. Στη συνέχεια τα MAC SDUs λαμβάνονται από το CPS μέσω του CPS SAP και αντιστοιχίζονται σε κάποια σύνδεση και ροή υπηρεσίας του CPS μέσω των CID και SFID αντιστοίχως (σχήμα 4.11).

Τα χαρακτηριστικά μιας ροής υπηρεσίας είναι:

- **SFID**. Μία ροή υπηρεσίας προσδιορίζεται μοναδικά από το SFID.
- **CID**. Μία σύνδεση προσδιορίζεται μοναδικά από το CID η αντιστοίχιση του οποίου σε μία ροή υπηρεσίας γίνεται όταν η συγκεκριμένη ροή είναι ενεργή.



Σχήμα 4.11 Απεικόνιση συνδέσεων και ροών υπηρεσιών [4]

- **ProvisionedQoSParamSet.** Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό ορίζει ένα σύνολο QoS παραμέτρων στα οποία γίνεται επίβλεψη. Για παράδειγμα το όνομα της κλάσης της ποιότητας υπηρεσίας (QoS class name) είναι μία από παραμέτρους του ProvisionedQoSParamSet συνόλου. Υπάρχουν πέντε κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας με την τελευταία να έχει προστεθεί από την 802.16e τροποποίηση.
- **AdmittedQoSParamSet.** Το χαρακτηριστικό αυτό ορίζει ένα σύνολο QoS παραμέτρων για το οποίο ο σταθμός βάσης και πιθανόν ο σταθμός συνδρομητή δεσμεύει πόρους. Ο κύριος πόρος που δεσμεύεται για την ενεργοποίηση της ροής είναι το εύρος ζώνης και σε κάποιες περιπτώσεις μνήμη.
- **ActiveQoSParamSet.** Το χαρακτηριστικό αυτό ορίζει ένα σύνολο QoS παραμέτρων το οποίο καθορίζει την υπηρεσία που πραγματικά προσφέρεται. Μόνο μια ενεργή ροή υπηρεσίας μπορεί να προωθεί πακέτα. Το αν μια ροή υπηρεσίας είναι ενεργή ή όχι καθορίζεται από το AdmittedQoSParamSet χαρακτηριστικό. Αν αυτό έχει null τιμή τότε η ροή υπηρεσίας είναι ανενεργή.
- **Authorisation module.** Είναι μια λογική συνάρτηση του σταθμού βάσης η οποία καθορίζει την αποδοχή ή την απόρριψη στις αλλαγές των QoS παραμέτρων. Καθορίζει επίσης τις τιμές των AdmittedQoSParamSet και ActiveQoSParamSet παραμέτρων.

Οι τύποι ροών υπηρεσίας είναι οι εξής:

- **Provisioned service flows.** Αυτός ο τύπος ροής υπηρεσίας χρησιμοποιείται από το σύστημα διαχείρισης δικτύου δεν είναι ενεργός και δεν απασχολεί πόρους. Τα χαρακτηριστικά AdmittedQoSParamSet και ActiveQoSParamSet δεν παίρνουν τιμές σε αυτό το τύπο ροής υπηρεσίας.
- **Admitted service flow.** Ο συγκεκριμένος τύπος υπηρεσίας συνήθως χρησιμοποιείται από εφαρμογές τηλεφωνίας. Σε αυτό τον τύπο οι πόροι είναι καθορισμένοι αλλά χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που μια κλήση είναι επιτυχής.

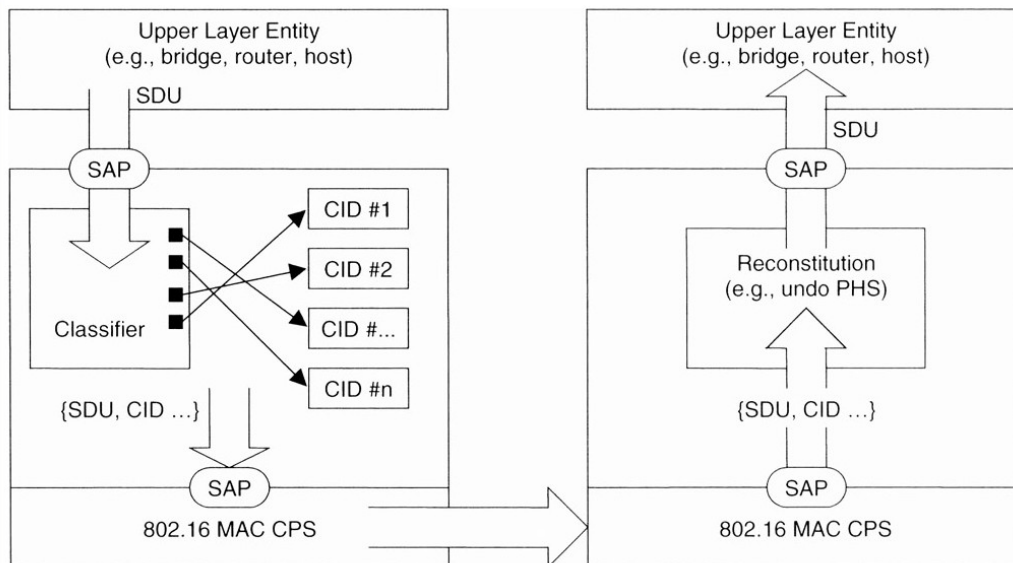
- **Active service flow.** Αυτός ο τύπος υπηρεσίας έχει δεσμευμένους πόρους για χρήση από το σταθμό βάσης για το ActiveQoSParamSet χαρακτηριστικό του. Το ActiveQoSParamSet έχει μη μηδενική τιμή [4].

#### 4.9.6 Κατάταξη και απεικόνιση των MAC SDUs

Η κατάταξη (classification) αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία ένα MAC SDU ανατίθεται (mapped) σε μία σύνδεση για τη μετάδοση από το MAC επίπεδο μιας συσκευής στο MAC επίπεδο μιας άλλης συσκευής. Είναι δηλαδή η διαδικασία ανάθεσης πόρων σε μια εφαρμογή. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική επειδή ο BS εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό χρηστών με διαφορετικές εφαρμογές για τον καθένα. Η συσχέτιση του MAC SDU με μία σύνδεση δημιουργεί επίσης μία συσχέτιση με τα χαρακτηριστικά της ροής υπηρεσίας που υποστηρίζει η συγκεκριμένη σύνδεση. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη μετάδοση των MAC SDUs σύμφωνα με τους απαιτούμενους QoS περιορισμούς.

Η διαδικασία της κατάταξης πρέπει να γίνεται τόσο στην άνω ζεύξη από το σταθμό του συνδρομητή όσο και στην κάτω ζεύξη από το σταθμό βάσης. Η επιτυχής έκβαση της κατάταξης εξαρτάται από την ικανοποίηση κάποιων κριτηρίων που τίθενται από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως η IP διεύθυνση του παραλήπτη των πακέτων και η προτεραιότητα των πακέτων. Το σύνολο αυτών των κριτηρίων αποτελεί τον ταξινομητή (classifier) και εφαρμόζεται σε κάθε πακέτο κατά την είσοδο του στο δίκτυο. Εάν τα κριτήρια αυτά ικανοποιούνται από τα πακέτα, τότε αυτά αποστέλλονται στο SAP του MAC CPS για περαιτέρω μετάδοση στη σύνδεση που ορίζει το CID (σχήμα 4.12) [4].





Σχήμα 4.12 Ταξινόμηση και CID απεικόνιση [4]

#### 4.9.7 Επίπεδο σύγκλισης και ποιότητα υπηρεσίας

Οι σημαντικότεροι QoS παράμετροι είναι:

- **Scheduling service type (QoS class).** Αυτή η παράμετρος ορίζει την QoS κλάση με την οποία συσχετίζεται μια ροή υπηρεσίας. Οι τέσσερις κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας είναι οι UGS, rtPS, nrtPS και BE και αναλύονται παρακάτω. Το πρότυπο IEEE 802.16e ορίζει μία πέμπτη κλάση ποιότητας υπηρεσίας την ertPS.
- **Προτεραιότητα ροής.** Η τιμή αυτής της παραμέτρου καθορίζει ποια ροή υπηρεσίας έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα μεταξύ αυτών που έχουν ίδιες QoS παραμέτρους.
- **Maximum sustained traffic rate.** Αυτή η παράμετρος ορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης μιας υπηρεσίας και εκφράζεται σε bits ανά δευτερόλεπτο.
- **Maximum traffic burst.** Σύμφωνα με αυτή την παράμετρο καθορίζεται το μέγεθος των δεδομένων που μπορούν να σταλούν ή να ληφθούν για μια υπηρεσία.
- **Minimum reserved traffic rate.** Η παράμετρος αυτή εκφράζει τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε μια υπηρεσία ροής.
- **QoS παράμετροι κατασκευαστή.** Αυτή η παράμετρος επιτρέπει σε ένα κατασκευαστή να ορίσει και δικές του παραμέτρους ποιότητας.

- **Tolerated jitter.** Αυτή η παράμετρος ορίζει τη μέγιστη αποδεκτή διακύμανση της καθυστέρησης της μετάδοσης των δεδομένων μιας ροής υπηρεσίας.
- **Maximum latency.** Μέσω αυτής της παραμέτρου εκφράζεται η μέγιστη καθυστέρηση μεταξύ της λήψης ενός πακέτου από τον BS ή τον SS στη διεπαφή δικτύου μέχρι την προώθηση του πακέτου στην ασύρματη διεπαφή.
- **Fixed-length vs variable-length SDU indicator.** Με την παράμετρο αυτή προσδιορίζεται αν τα SDUs είναι σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση της πακετοποίησης.
- **SDU size.** Καθορίζει το μέγεθος ενός SDU στην περίπτωση που μια ροή υπηρεσίας έχει σταθερό μήκος SDU.
- **Request/transmission policy.** Η τιμή αυτής της παραμέτρου προσδιορίζει τη μορφοποίηση των PDUs στην άνω ζεύξη και τους περιορισμούς που τίθενται στη ζήτηση εύρους ζώνης από το σταθμό του συνδρομητή [4].

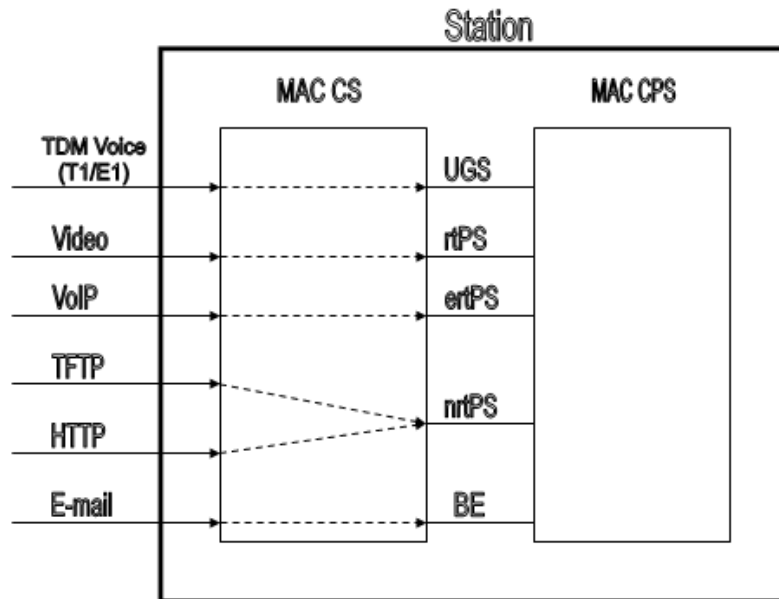
#### 4.9.7.1 Κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας

Στο MAC επίπεδο του WiMAX ορίζονται πέντε QoS κλάσεις (σχήμα 4.13) οι οποίες είναι:

- **Unsolicited Grant Service (UGS).** Η UGS υποστηρίζει real-time ροές υπηρεσιών στην άνω ζεύξη παράγοντας πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους σε μια περιοδική βάση. Χρησιμοποιείται συνήθως στην περίπτωση υπηρεσιών που απαιτούν σταθερό ρυθμό bit ροών (Constant Bit Rate - CBR) όπως είναι η TDM Voice (T1/E1). Η παραγωγή πακέτων σταθερού μεγέθους απαλλάσσει το σταθμό του συνδρομητή από τη ρητή απαίτηση εύρους ζώνης μειώνοντας την καθυστέρηση που επιφέρει αυτή η αίτηση εύρους ζώνης. Η τιμή της request/transmission policy παραμέτρου επιτρέπει στο σταθμό του συνδρομητή να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης ενώ ο σταθμός βάσης δε θα πρέπει να κατανέμει περισσότερο εύρος ζώνης από αυτό που καθορίζεται από τη

maximum sustained traffic rate που ορίζεται στο σύνολο των QoS παραμέτρων.

- **rtPS (real-time Polling Service).** Η υπηρεσία rtPS υποστηρίζει real-time ροές υπηρεσιών στην άνω ζεύξη παράγοντας πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους σε μια περιοδική βάση. Παράδειγμα τέτοιας υπηρεσίας είναι η μετάδοση βίντεο με MPEG κωδικοποίηση. Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της request/transmission policy παραμέτρου απαγορεύει στο σταθμό του συνδρομητή να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης, παρά μόνο το unicast polling επιτρέποντας του να καθορίσει και το μέγεθος των πακέτων. Αυτή η υπηρεσία επιφέρει μεγαλύτερο overhead από τη UGS αλλά υποστηρίζει μεταβλητού μεγέθους πακέτα δεδομένων για τη βέλτιστη απόδοση της μεταφοράς των δεδομένων.
- **extended real-time Polling Service (ertPS).** Η rtPS βασίζεται στην αποτελεσματικότητα των UGS και rtPS και έχει σχεδιαστεί για την υποστήριξη real-time υπηρεσιών με μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω των WiMAX δικτύων όπως είναι η VoIP.
- **non-real-time Polling Service (nrtPS).** Η nrtPS υπηρεσία είναι όμοια της rtPS υποστηρίζοντας επιπλέον τον contention-based polling μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης. Η τιμή της request/transmission policy είναι τέτοια ώστε ο σταθμός του συνδρομητή να χρησιμοποιεί και τον unicast polling μηχανισμό με τη μόνη διαφορά ότι η μέση διάρκεια μεταξύ δύο αιτήσεων που χρησιμοποιούν αυτό το μηχανισμό είναι της τάξεως μερικών δευτερολέπτων, χρόνος συγκριτικά μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν της rtPS υπηρεσίας. Οι σταθμοί συνδρομητών που χρησιμοποιούν το contention-based polling μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης, μπορεί να οδηγηθούν σε σύγκρουση (collision) με προσπάθειες επανεκπομπής των αιτημάτων τους.
- **Best Effort (BE).** Η BE υπηρεσία παρέχει χαμηλά επίπεδα υποστήριξης ποιότητας υπηρεσιών και εφαρμόζεται από υπηρεσίες που δεν τους έχουν τεθεί αυστηρά επίπεδα QoS απαιτήσεων. Ο σταθμός συνδρομητή χρησιμοποιεί μόνο το contention-based polling μηχανισμό αίτησης εύρους ζώνης.



Σχήμα 4.13 Κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας [4]

#### 4.9.8 MAC διευθύνσεις και πλαίσια

Κάθε σταθμός συνδρομητή προσδιορίζεται μοναδικά από μία MAC διεύθυνση αποτελούμενη από 48 bit γνωστή και ως IEEE 802 MAC διεύθυνση. Η MAC διεύθυνση χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του αρχικού ranging για την εγκαθίδρυση της κατάλληλης σύνδεσης για τον SS. Επίσης η MAC διεύθυνση χρησιμοποιείται ως μέρος της διαδικασίας της επικύρωσης (authentication) κατά την οποία ο σταθμός συνδρομητή πιστοποιείται από το σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης διαθέτει ένα BSID (Base Station ID) το οποίο αποτελείται επίσης από 48 bit και δεν πρέπει να συγχέεται με τη MAC διεύθυνση. Το BSID αποτελείται από ένα δείκτη των 24 bit ο οποίος προσδιορίζει τον πάροχο και χρησιμοποιείται για παράδειγμα από το DCD (Downlink Channel Descriptor) MAC μήνυμα διαχείρισης.

Ένα MAC πλαίσιο (MAC frame) αποτελεί μία εναλλακτική ονομασία του MPDU. Κάθε MPDU αποτελείται από μία σταθερού μεγέθους MAC κεφαλίδα (MAC header) η οποία ακολουθείται από το ωφέλιμο φορτίο του MPDU (σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14 Γενική μορφή ενός MAC frame ή MAC PDU [4]

Ένα MPDU μπορεί επίσης να περιλαμβάνει έναν κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check - CRC). Το μήκος του ωφέλιμου φορτίου μπορεί να ποικίλει συνεπώς και το μέγεθος του MAC πλαισίου είναι μεταβλητό.

Εάν υπάρχει ωφέλιμο φορτίο στο MAC PDU τότε αυτό περιέχει ένα ή περισσότερα εκ των παρακάτω:

- 0 ή περισσότερες υποκεφαλίδες οι οποίες κάθε μία από τις οποίες ακολουθείται από ένα MAC SDU.
- 0 ή περισσότερα MAC SDUs
- Τμήμα ή τμήματα ενός MAC SDU

Η κεφαλίδα του MAC PDU διακρίνεται σε δύο τύπους:

- Τη γενικού τύπου MAC κεφαλίδα (*Generic Mac Header - GMH*). Αυτός ο τύπος κεφαλίδας των MAC PDUs περιέχει είτε MAC μηνύματα διαχείρισης είτε δεδομένα του επιπέδου σύγκλισης.
- Τη MAC κεφαλίδα χωρίς ωφέλιμο φορτίο. Τα MAC PDUs αυτού του τύπου δεν περιλαμβάνουν κυκλικό έλεγχο πλεονασμού και χρησιμοποιούνται μόνο στην άνω ζεύξη. Αυτός ο τύπος κεφαλίδας έχει το ίδιο μήκος με την κεφαλίδα γενικού τύπου και εισήχθησε από το IEEE 802.16e πρότυπο για την αίτηση επιπλέον εύρους ζώνης [4].

#### 4.9.9 Τεμαχισμός, πακετοποίηση και συναλύσωση

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας είναι η δυνατότητα του τεμαχισμού (fragmentation) ενός MAC SDU σε πολλά MAC PDUs. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις κακής ποιότητας ενός καναλιού ή όταν το μήκος των πακέτων είναι πολύ μεγάλο, όπως είναι αυτό των IP

πακέτων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πιθανότητα απώλειας ενός τμήματος και όχι ολόκληρου του MAC SDU ενώ το μειονέκτημα έγκυται στην αύξηση του μεγέθους των πληροφοριών των κεφαλίδων. Ο τεμαχισμός επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης όταν η ποιότητα του καναλιού δεν είναι αρκετά καλή σύμφωνα με τις απαιτούμενες QoS παραμέτρους της ροής υπηρεσίας. Η παρουσία του τεμαχισμού υποδηλώνεται από τη τιμή του δεύτερου bit της κεφαλίδας γενικού τύπου. Η διαδικασία του τεμαχισμού όπως και η αντίστροφη διαδικασία της σύνθεσης των MAC PDUs σε MAC SDU (πακετοποίηση) είναι υποχρεωτικές. Η πακετοποίηση στην περίπτωση καλής ποιότητας του καναλιού επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων και είναι ιδανική για πακέτα μικρού μήκους. Η πλευρά η οποία μεταδίδει είναι αυτή που έχει την ευθύνη της απόφασης του αν θα πακετοποιήσει ένα σύνολο MAC SDUs. Η παρουσία της πακετοποίησης υποδηλώνεται από τη τιμή του πρώτου bit της κεφαλίδας γενικού τύπου. Το άθροισμα των bit των κεφαλίδων στην περίπτωση της πακετοποίησης είναι μικρότερο του αθροίσματος των bit των κεφαλίδων αν κάθε SDU μεταδιδόταν ξεχωριστά επειδή όπως προαναφέρθηκε η πακετοποίηση κάνει αποτελεσματική χρήση των πόρων του συστήματος. Ένα αρνητικό χαρακτηριστικό της πακετοποίησης είναι η απώλεια όλων των MAC SDUs από τα οποία αποτελείται το MAC PDU στην περίπτωση απώλειας του [4].

#### **4.9.10 Μηχανισμοί αίτησης και κατανομής εύρους ζώνης**

Στο WiMAX το MAC επίπεδο του σταθμού βάσης είναι το κατ' εξοχήν αρμόδιο για τη κατανομή του εύρους ζώνης σε όλους τους χρήστες, τόσο για την άνω όσο και την κάτω ζεύξη. Η κατανομή εύρους ζώνης στην άνω και κάτω ζεύξη είναι δύο εντελώς διαφορετικές διαδικασίες και είναι υπ' ευθύνη του προγραμματιστή του σταθμού βάσης. Η μοναδική φορά που ο σταθμός συνδρομητή μπορεί να ελέγχει εν μέρει την κατανομή εύρους ζώνης είναι στην περίπτωση που διατηρεί πολλαπλό αριθμό συνδέσεων με το σταθμό βάσης. Σε αυτή την περίπτωση ο σταθμός βάσης διαθέτει συνολικά κάποιο εύρος ζώνης στο σταθμό συνδρομητή και είναι υπ' ευθύνη του SS/MS η κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των πολλαπλών συνδέσεων. Για τη κατανομή εύρους ζώνης στην άνω ζεύξη ο BS βασίζεται στα αιτήματα του SS/MS.

#### 4.9.11 Διαχείριση κινητικότητας

Πέραν της σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης το WiMAX υποστηρίζει και τις εξής τέσσερις επιλογές κινητικότητας:

- **Νομαδική.** Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πάρει ένα σταθερό σταθμό συνδρομητή και να τον επανασυνδέσει από ένα διαφορετικό σημείο σύνδεσης.
- **Φορητή.** Η πρόσβαση αυτή παρέχεται σε μια φορητή συσκευή με την προσδοκία της best-effort λειτουργίας της μεταπομπής.
- **Απλή κινητικότητα.** Ο συνδρομητής μπορεί να κινηθεί με ταχύτητες μέχρι 60 km/h με συνοπτικές διακοπές (μικρότερες του ενός δευτερολέπτου) κατά τη διάρκεια της μεταπομπής.
- **Πλήρης κινητικότητα.** Οι εν κινήσει ταχύτητες του συνδρομητή που υποστηρίζει φθάνουν έως και 120 km/h με καθυστέρηση μικρότερη των 50 ms και απώλεια πακέτων μικρότερη του 1% (seamless handover).

Τα WiMAX δίκτυα αρχικά αναπτύχθηκαν για σταθερές και νομαδικές εφαρμογές και με την μετέπειτα εξέλιξή τους υποστηρίζεται η φορητότητα και η πλήρη κινητικότητα.

Το mobile WiMAX ικανοποιεί δύο πτυχές της κινητικότητας των ασύρματων σταθμών των συνδρομητών εντός μιας μεγάλης περιοχής. Οι προκλήσεις αυτές αναφέρονται πρώτον στη παροχή των μέσων για την έναρξη της αμφίδρομης ανταλλαγής πληροφοριών (session initiation) και της μετάδοσης πακέτων των ανενεργών χρηστών ανεξαρτήτως της θέσης τους μέσα στο δίκτυο, τη λεγόμενη περιαγωγή και δεύτερον στη διατήρηση της ανταλλαγής αυτών των πληροφοριών κατά την κίνηση του χρήστη χωρίς διακοπή. Η δεύτερη είναι γνωστή ως λειτουργία μεταπομπομπής. Η περιαγωγή με τη μεταπομπή αποτελούν στο σύνολο τους τη διαχείριση κινητικότητας (mobility management).

##### 4.9.11.1 Περιαγωγή

Η περιαγωγή επιτυγχάνεται μέσω του εντοπισμού των περιαγόμενων σταθμών των συνδρομητών με της χρήση κεντροποιημένων βάσεων δεδομένων. Αυτές οι

βάσεις δεδομένων διατηρούνται ενήμερες για τη θέση των MSs μέσω των μηνυμάτων που εκπέμπουν οι ίδιοι στο δίκτυο καθώς κινούνται από τη μία περιοχή στην άλλη. Ο αριθμός των σταθμών βάσης στους οποίους αποστέλλονται αυτά τα μηνύματα εξαρτάται από το ρυθμό μετακίνησης των MSs. Η πρόκληση σε αυτή την περίπτωση είναι μεταξύ της επιλογής ενός μεγάλου αριθμού μηνυμάτων που θα αποστέλλονται σε λίγους σταθμούς βάσης ή της επιλογής να αποστέλλεται ένας μικρότερος αριθμός μηνυμάτων σε περισσότερους σταθμούς βάσης για την ενημέρωση της ύπαρξης χρήστη στην περιοχή που καλύπτουν.

#### **4.9.11.2 Μεταπομπή**

Μέσω της μεταπομπής παρέχεται μια μέθοδος για την απρόσκοπτη λειτουργία του MS κατά την εναλλαγή του από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο. Η μεταπομπή απαιτείται να συμβαίνει όσο το δυνατόν πιο σπάνια και με την κατάλληλη επιλογή αλγορίθμων αποφεύγεται η διακοπή της συνεδρίας λόγω χαμηλού σήματος στην περίπτωση που μεσολαβεί μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να ολοκληρωθεί η μεταπομπή. Επίσης κατά τη μεταπομπή θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ύπαρξη διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων από το νέο σταθμό βάσης για την αποφυγή της απώλειας των κλήσεων. Κάποια συστήματα συντηρούν εύρος ζώνης για την είσοδο νέων χρηστών που προέρχονται από τη μεταπομπή, ενώ κάποια άλλα δίνουν προτεραιότητα σε χρήστες που προέρχονται από μεταπομπή έναντι αυτών που αιτούνται την έναρξη νέας συνεδρίας με το σταθμό βάσης. Οι κατηγορίες μεταπομπών που ορίζονται από το WiMAX είναι οι:

- Hard Handover (HHO).
- Fast BS Switching (FBSS).
- Macro Diversity Handover (MDHO).

Κατά τη HHO μεταπομπή η οποία είναι υποχρεωτική ο MS επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης κάθε φορά. Βασίζεται στη break-before-make προσέγγιση κατά την οποία η σύνδεση του MS με τον BS αρχικά τερματίζεται αιφνίδια και κατόπιν δημιουργείται εκ νέου μια σύνδεση με κάποιο άλλο σταθμό βάσης. Οι αποφάσεις για τη HHO λειτουργία παίρνονται από τον BS, τον MS ή από κάποια άλλη οντότητα η οποία βασίζεται στα αποτελέσματα μέτρησης του MS. Ο MS εξετάζει



περιοδικά το ραδιοφάσμα (radio frequency - RF) ελέγχοντας την ποιότητα σήματος των γειτονικών σταθμών βάσης σε διαστήματα που καθορίζει ο BS. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαστημάτων ο MS έχει προαιρετικά τη δυνατότητα να εκτελέσει τη διαδικασία του αρχικού ranging και να συνδεθεί με έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης. Μόλις ληφθεί η απόφαση μεταπομπής ο MS αρχίζει το συγχρονισμό με την κάτω ζεύξη του BS που έχει επιλεγεί, εκτελεί τη ranging διαδικασία εάν δεν έγινε προηγουμένως και έπειτα τερματίζει τη σύνδεση του με τον προηγούμενο BS. Η HHO μεταπομπή είναι περισσότερο φασμαποδοτική συγκριτικά με τις άλλες δύο κατηγορίες μεταπομπών αλλά εισάγει μεγαλύτερη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή στην ιδανική περίπτωση δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 50 ms.

Οι FBSS και MDHO κατηγορίες μεταπομπών είναι προεραϊκές και χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω μείωση της καθυστέρησης. Οι λειτουργίες αυτές χρησιμοποιούν μία make-before-break προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η εγκαθίδρυση της σύνδεσης του MS με τον επόμενο σταθμό βάσης γίνεται πριν τη διακοπή της υπάρχουσας σύνδεσης του MS με τον τρέχων σταθμό βάσης. Σε αυτές τις δύο μεθόδους μεταπομπών ο MS διατηρεί μια σύνδεση σε ισχύ ταυτόχρονα με περισσότερους του ενός BSs.

Στην περίπτωση της FBSS μεταπομπής ο σταθμός συνδρομητή συντηρεί μία λίστα σταθμών βάσης οι οποίοι αποτελούν το ενεργό σύνολο (active set). Αφού εξετάσει τους γειτονικούς σταθμούς βάσης επιλέγει αυτούς οι οποίοι είναι κατάλληλοι για το ενεργό σύνολο. Κατόπιν ελέγχει συνεχώς την ισχύ του σήματος των BSs του ενεργού συνόλου, εκτελώντας τη ranging λειτουργία και διατηρώντας μία σύνδεση σε ισχύ με τον καθένα από αυτούς. Ανάμεσα σε αυτό το πλήθος σταθμών βάσης επιλέγεται ένας BS ο οποίος θα αποτελεί το σταθμό βάσης αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση ο MS επικοινωνεί μόνο με τον BS αναφοράς (anchor BS). Η FBSS μεταπομπή ξεκινά με την απόφαση του MS να λάβει/μεταδώσει δεδομένα από/προς τον BS αναφοράς ο οποίος ενδέχεται και να αλλάξει. Όταν η αλλαγή του BS αναφοράς είναι απαραίτητη μέσα στο ενεργό σύνολο η σύνδεση εναλλάσσεται από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο.

Η MDHO μεταπομπή είναι όμοια με τη FBSS εκτός του γεγονότος ότι ο MS επικοινωνεί με όλους του σταθμούς βάσης στο ενεργό σύνολο (το οποίο εδώ ονομάζεται diversity set) στο ίδιο χρονικό διάστημα, τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη μέσω unicast μηνυμάτων. Στην κάτω ζεύξη ο MS λαμβάνει δεδομένα

από δύο ή περισσότερους σταθμούς βάσης τα οποία συγκρίνει με διάφορες τεχνικές διαφορισμού (diversity combining). Ο MS αποστέλλει δεδομένα σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης και στη συνέχεια πραγματοποιείται συγκριτική επιλογή (diversity selection) προκειμένου να επιλεχθεί η καταλληλότερη άνω ζεύξη. Η απόφαση για την ανανέωση του ενεργού σύνολου και τη διαδικασία αναπροσαρμογής του BS αναφοράς ξεκινά με ειδοποίηση είτε από τον MS (μέσω του MOB\_MSHOREQ μηνύματος) ή από τον BS (μέσω του MOB\_BSHO-REQ μηνύματος). Η MDHO είναι όμοια της soft handover που χρησιμοποιείται από τα GSM, CDMA ή τα UMTS συστήματα και είναι κατάλληλη για εφαρμογές με μικρή ανεκτικότητα στην καθυστέρηση όπως οι εφαρμογές φωνής (VoIP), τηλεδιάσκεψης καθώς και εφαρμογές παιχνιδιών μέσω διαδικτύου. Η χρήση της ωστόσο δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπως αυτές της περιήγησης ιστοσελίδων και του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, διότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων κάποιες χρονικές στιγμές είναι υψηλός και κάποιες άλλες χαμηλός (bursty traffic) [9].

Οι FBSS και MDHO λειτουργίες δεν υποστηρίζονται πλήρως από τα WiMAX δίκτυα καθώς δεν αποτελούν μέρος της WiMAX Forum Release 1 προδιαγραφής δικτύων. Η HHO εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις κινητικότητας χαμηλών ταχυτήτων. Για την κινητικότητα υψηλών ταχυτήτων εφαρμόζονται οι FBSS και MDHO μέθοδοι. Στον πίνακα 4.4 συνοψίζονται οι περιπτώσεις εφαρμογής του κάθε τύπου μεταπομπής.

**Πίνακας 4.4** Περιπτώσεις εφικτών μεταπομπών [9]

| Πρόσβαση            | Ταχύτητα | Handover | 802.16-2004 | 802.16e-2005 |
|---------------------|----------|----------|-------------|--------------|
| Σταθερή πρόσβαση    | Στάσιμη  | Όχι      | Ναι         | Ναι          |
| Νομαδική πρόσβαση   | Στάσιμη  | Όχι      | Ναι         | Ναι          |
| Φορητή              | Ταχύτητα | Hard     | Όχι         | Ναι          |
| Απλή κινητικότητα   | πεζού    | Hard     | Όχι         | Ναι          |
|                     | Χαμηλή   |          |             |              |
| Πλήρης κινητικότητα | τροχαία  | Soft     | Όχι         | Ναι          |
|                     | ταχύτητα |          |             |              |
|                     | Υψηλή    |          |             |              |
|                     | τροχαία  |          |             |              |
|                     | ταχύτητα |          |             |              |

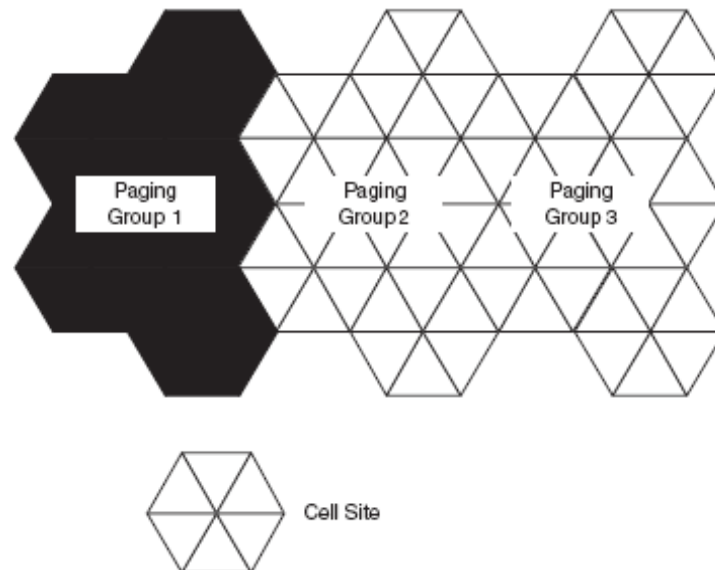
#### **4.9.12 Λειτουργίες εξοικονόμησης ενέργειας**

Η λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας επιτυγχάνεται με την ελεγχόμενη διακοπή της λειτουργίας κάποιων μερών του σταθμού του συνδρομητή όταν αυτός δε μεταδίδει ή δε λαμβάνει δεδομένα. Το WiMAX χρησιμοποιεί δύο μεθόδους σηματοδότησης που καθιστούν το σταθμό του συνδρομητή σε κατάσταση ύπνωσης (sleep mode) ή ηρεμίας (idle mode) όταν αυτός είναι ανενεργός. Οι λειτουργίες της κατάστασης ηρεμίας και της κατάστασης ύπνωσης είναι προαιρετικές.

Κατά την κατάσταση ύπνωσης ο σταθμός συνδρομητή καθίσταται μη διαθέσιμος για κάποια προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Τα χρονικά αυτά διαστήματα καθορίζονται σε συμφωνία με το σταθμό βάσης που είναι συνδεδεμένος ο σταθμός συνδρομητή. Στην κατάσταση ύπνωσης ο MS διαθέτει δύο διαστήματα (time intervals) λειτουργίας το διάστημα ύπνωσης (sleep window) και το διάστημα ακρόασης (listening window) με κάθε διάστημα ύπνωσης να ακολουθείται από ένα διάστημα ακρόασης. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος ύπνωσης απενεργοποιούνται τα περισσότερα των κυκλωμάτων του MS για να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να λαμβάνει ή να αποστέλλει δεδομένα. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος ακρόασης ο MS επανακτά τη σύνδεση του λαμβάνοντας μικρά ποσά δεδομένων από το σταθμό βάσης που είναι συνδεδεμένος. Τα διαστήματα ύπνωσης και ακρόασης καθορίζονται σε συμφωνία με το σταθμό βάσης, τον MS και από την κλάση εξοικονόμησης ενέργειας (Power Saving Class - PCS) της κατάστασης ύπνωσης. Οι κλάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στην περίπτωση της κατάστασης ύπνωσης είναι τρεις. Εάν ο σταθμός συνδρομητή διατηρεί πολλαπλές συνδέσεις ταυτόχρονα για διαφορετικά είδη εφαρμογών μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερες από μία κλάσεις εξοικονόμησης ενέργειας την κάθε μία για το κατάλληλο είδος σύνδεσης. Στην πρώτη κλάση μετά από κάθε διάστημα ύπνωσης ο MS “ξυπνά” για ένα σύντομο σταθερού μεγέθους διάστημα ακρόασης το οποίο ακολουθείται από ένα διάστημα ύπνωσης. Κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος ακρόασης ο MS λαμβάνει ένα μήνυμα από το σταθμό βάσης το οποίο φανερώνει εάν έχουν φθάσει δεδομένα από τον BS κατά το διάστημα ύπνωσης. Στην περίπτωση αυτή ο MS εξέρχεται από την κατάσταση ύπνωσης στην κατάσταση ηρεμίας λαμβάνοντας τα δεδομένα από τον BS. Στην πρώτη κλάση το διάστημα ύπνωσης αυξάνεται εκθετικά από μία ελάχιστη σε μία μέγιστη τιμή. Μετά τη μέγιστη αυτή τιμή όλα τα

διαστήματα ύπνωσης έχουν το ίδιο μέγεθος ενώ ο BS σε οποιαδήποτε στιγμή της κατάστασης ύπνωσης μπορεί να επαναπροσδιορίσει το μέγεθος του διαστήματος της. Η αλλαγή του μεγέθους του διαστήματος ύπνωσης από τον BS στην κάτω ζεύξη συμβαίνει όταν ο BS διαπιστώσει πως το διάστημα ακρόασης δεν επαρκεί για να στείλει τα απαιτούμενα δεδομένα. Αυτή η κλάση εξοικονόμησης ενέργειας χρησιμοποιεί τις BE και nrtPS υπηρεσίες ποιότητας για εφαρμογές όπως αυτές της περιήγησης ιστού, του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και του FTP. Η δεύτερη κλάση κάνει χρήση ενός σταθερού μεγέθους διαστήματος ύπνωσης με το διάστημα ακρόασης που ακολουθεί να είναι επίσης σταθερού μεγέθους και χρησιμοποιείται στην περίπτωση των UGS υπηρεσιών για εφαρμογές μετάδοσης βίντεο και VoIP. Σε αντίθεση με τις άλλες δύο, η τρίτη κλάση αποτελείται από ένα μόνο διάστημα ύπνωσης και χρησιμοποιείται για multicast μεταδόσεις και για τη διαχείριση των μεταδόσεων στο MAC επίπεδο όταν ο MS γνωρίζει πότε να αναμένει την επόμενη μετάδοση δεδομένων. Για τη διευκόλυνση της μεταπομπής στην κατάσταση ύπνωσης επιτρέπεται στο σταθμό συνδρομητή η σάρωση των σταθμών βάσης για τη συλλογή πληροφοριών σχετικές με τη μεταπομπή.

Η κατάσταση ηρεμίας παρέχει στον MS ένα μηχανισμό έτσι ώστε αυτός να είναι περιοδικά διαθέσιμος για τη μετάδοση δεδομένων κάτω ζεύξης του σταθμού βάσης χωρίς όμως να απαιτείται η εγγραφή ενός MS σε κάποιο σταθμό βάσης. Η κατάσταση ηρεμίας προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας διότι το δίκτυο επωφελείται από την εξάλειψη των παρεμβολών και της ανάγκης της μεταπομπής των ανενεργών MS. Συγκεκριμένα παρέχεται μία απλή και αποτελεσματική μέθοδο ειδοποίησης (paging) του MS κατά την οποία οι σταθμοί βάσης ομαδοποιούνται σε σύνολα (paging groups) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15. Ένα από αυτά τα σύνολα σταθμών βάσης ανατίθεται στον MS πριν αυτός εισέλθει στη κατάσταση ηρεμίας και ανανεώνεται περιοδικά όταν ο σταθμός βάσης “ξυπνά”. Ο MS ελέγχει περιοδικά τη μετάδοση δεδομένων κάτω ζεύξης αποφασίζοντας με ποιο σύνολο σταθμών βάσης θα συσχετισθεί ανανεώνοντας έτσι τακτικά το paging group. Χωρίς αυτή τη διαδικασία ο MS θα έπρεπε να συσχετίζεται με όλους τους BSs του δικτύου [9].



Σχήμα 4.15 Ομαδοποίηση σταθμών βάσης σε paging groups [9]

#### 4.9.13 Θέματα ασφαλείας στο WiMAX

Το επίπεδο ασφαλείας του MAC επιπέδου των IEEE 802.16 προτύπων είναι το αντικείμενο συζήτησης αυτής της ενότητας. Η ασφάλεια παρέχεται μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού του συνδρομητή και όχι στο ενσύρματο δίκτυο “πίσω” από το σταθμό βάσης. Η ασφάλεια κατά μήκος ολόκληρου του δικτύου είναι δυνατή με την εφαρμογή επιπλέον ελέγχων ασφαλείας που δεν ορίζονται από τα IEEE πρότυπα.

Οι στόχοι ασφαλείας επιτυγχάνονται από τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Επικύρωση
- Έγκριση
- Ανταλλαγή κλειδιών
- Κρυπτογράφηση δεδομένων

Η διαδικασία της επικύρωσης πιστοποιεί την ταυτότητα των οντοτήτων που απαιτούν πρόσβαση στις υπηρεσίες δικτύου. Παράδειγμα επικύρωσης αποτελεί η χρήση κωδικών (passwords). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες (όπως κλοπή των κωδικών), για το λόγο αυτό απαιτείται μια πιο αυστηρή διαδικασία επικύρωσης της ταυτότητας των χρηστών. Αυτό πρακτικά

επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ψηφιακών πιστοποιητικών. Η διαδικασία της έγκρισης δίνει στην οντότητα την απαιτούμενη πρόσβαση καθορίζοντας ωστόσο και τα όρια χρήσης (ώρες πρόσβασης, μέγεθος του διατιθέμενου αποθηκευτικού χώρου, και ούτω καθ' εξής). Η ανταλλαγή κλειδιού είναι μια μέθοδος που αναφέρεται στη κρυπτογραφία κατά την οποία κρυπτογραφημένα κλειδιά ανταλλάσσονται μεταξύ των χρηστών για την επιτυχή χρήση των αλγόριθμων κρυπτογράφησης. Σημειώνεται ότι τα μηνύματα διαχείρισης δεν κρυπτογραφούνται από τα IEEE 802.16 πρότυπα, διότι η προσθήκη κρυπτογράφησης σε αυτά μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις λειτουργίες τους στο δίκτυο. Παράδειγμα τέτοιων μηνυμάτων αποτελούν αυτά που αποφασίζουν το χρόνο που απαιτείται για την είσοδο στο δίκτυο.

#### **4.9.13.1 Πιστοποιητικό X.509**

Κάθε σταθμός συνδρομητή διαθέτει ένα X.509 ψηφιακό πιστοποιητικό εγκατεστημένο εκ του κατασκευαστή. Το ITU-T X.509 πιστοποιητικό δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 1988 ως μέρος των συστάσεων του καταλόγου X.500 ορίζοντας μια τυποποιημένη μορφή πιστοποιητικού που χρησιμοποιείται από την IEEE 802.16 οικογένεια προτύπων. Οι σταθμοί συνδρομητών που συμμορφώνονται με τα πρότυπα αυτά πρέπει να χρησιμοποιούν τη τρίτη έκδοση του X.509. Κάθε SS φέρει ένα μοναδικό X.509 ψηφιακό πιστοποιητικό που εκδίδεται από το κατασκευαστή του SS, γνωστό ως SS X.509 πιστοποιητικό. Ακριβέστερα το πιστοποιητικό αυτό εκδίδεται και υπογράφεται από μια αρχή έκδοσης πιστοποιητικών (Certification Authority - CA) και εγκαθίσταται από το κατασκευαστή. Το δημόσιο κλειδί του κατασκευαστή τοποθετείται στο πιστοποιητικό αυτό, έτσι με τον τρόπο αυτό κάθε SS διαθέτει ένα δημόσιο κλειδί. Αυτό το ψηφιακό πιστοποιητικό περιέχει το δημόσιο κλειδί του SS το οποίο κρυπτογραφείται με τον RSA αλγόριθμο κρυπτογράφησης (SS RSA κλειδί) καθώς και τη MAC διεύθυνση (ID) του SS. Στη περίπτωση που ο σταθμός συνδρομητή δε φέρει ένα X.509 πιστοποιητικό εγκατεστημένο εκ του κατασκευαστή, χρησιμοποιεί εσωτερικούς αλγόριθμους για την εγκατάσταση του. Ο σταθμός βάσης στο πρότυπο 802.16-2004 φέρει επίσης ένα X.509 πιστοποιητικό. Ο BS χρησιμοποιεί το δημόσιο κλειδί του πιστοποιητικού του SS, προκειμένου να επαληθεύσει τη

γνησιότητα του πιστοποιητικού και στη συνέχεια επικυρώνει τον SS. Η επικύρωση γίνεται με τη χρήση του PKM πρωτοκόλλου [4].

#### 4.9.13.2 Πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού και ασφαλείας

Το υπόστρωμα ασφαλείας του MAC επιπέδου περιέχει δύο κύρια συστατικά πρωτόκολλα:

- Το πρωτόκολλο ενθυλάκωσης το οποίο είναι υπεύθυνο για τη κρυπτογράφηση της κίνησης στο δίκτυο ορίζοντας τους κανόνες εφαρμογής των αλγορίθμων κρυπτογράφησης στο ωφέλιμο φορτίο των MAC PDUs.
- Ένα PKM πρωτόκολλο. Το πρότυπο IEEE 802.16-2004 χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού και ασφαλείας (Privacy and Key Management Protocol version1 – PKMv1) για την ασφαλή διανομή των κλειδιών από το σταθμό βάσης στο σταθμό συνδρομητή και για την υπό όρους πρόσβαση στις υπηρεσίες δικτύου. Συνεπώς μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε το PKM ως ένα πρωτόκολλο επικύρωσης.

Τα κλειδιά που χρησιμοποιούνται στο PKMv1 πρωτόκολλο είναι τα εξής:

- **AK (Authorization Key):** Είναι το κλειδί που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της έγκρισης. Ο σταθμός βάσης ενεργοποιεί ένα AK για κάθε τερματικό σταθμό συνδρομητή και το αποστέλλει σε αυτόν. Επίσης χρησιμοποιείται για τη παραγωγή άλλων κλειδιών.
- **To SS δημόσιο κλειδί:** Είναι ένα κλειδί του σταθμού συνδρομητή το οποίο χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της έγκρισης από το σταθμό βάσης για τη κρυπτογράφηση του AK κλειδιού με τη βοήθεια του RSA αλγόριθμου κρυπτογράφησης.
- **TEK (Traffic Encryption Key):** Όπως και το όνομά του υποδηλώνει είναι ένα κλειδί που χρησιμοποιείται για τη κρυπτογράφηση των δεδομένων, συγκεκριμένα του ωφέλιμου φορτίου των MAC PDUs με τη χρήση των AES και DES αλγορίθμων κρυπτογράφησης.
- **KEK (Key Encryption Key):** Αυτό το κλειδί λαμβάνεται από το AK κλειδί και χρησιμοποιείται για τη κρυπτογράφηση του TEK κλειδιού.

Το PKMv1 διακρίνεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος χειρίζεται την επικύρωση των σταθμών των συνδρομητών και την ανταλλαγή των κλειδιών επικύρωσης και το δεύτερο την ανταλλαγή TEK κλειδιών.

#### **4.9.13.3 Συσχετίσεις ασφαλείας**

Το PKMv1 κάνει χρήση των συσχετίσεων ασφαλείας (Security Association - SA). Μια συσχέτιση ασφαλείας είναι ένα σύνολο πληροφοριών που ο BS και ο SS μοιράζονται για τη μεταξύ τους επίτευξη της ασφαλούς επικοινωνίας. Οι πληροφορίες αυτές είναι ένα σύνολο μεθόδων για τη κρυπτογράφηση και επικύρωση των δεδομένων και την ανταλλαγή του TEK κλειδιού κρυπτογράφησης (Cryptographic Suite). Το ακριβές περιεχόμενο μιας συσχέτισης ασφαλείας εξαρτάται από το παραπάνω σύνολο και μπορεί να είναι τα κλειδιά κρυπτογράφησης, η περίοδος ισχύος τους, κλπ. Οι συσχετίσεις ασφαλείας διαχειρίζονται από το σταθμό βάσης και για κάθε υπηρεσία που προσφέρεται από τον BS ορίζεται μία ξεχωριστή συσχέτιση ασφαλείας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της έγκρισης ο σταθμός συνδρομητή παρέχει στο σταθμό βάσης μία λίστα συσχετίσεων ασφαλείας (Cryptographic Suite). Ο σταθμός βάσης επιλέγει μία από αυτές να είναι η πρωταρχική συσχέτιση ασφαλείας και τη στέλνει ως απάντηση στο αίτημα του SS για έγκριση. Γενικά κάθε SS έχει μία πρωταρχική συσχέτιση ασφαλείας και 2 ή περισσότερες SAs για τις uplink και downlink.

Διακρίνουμε τρεις τύπους συσχετίσεων ασφαλείας. Την SA έγκρισης, την SA δεδομένων για τις unicast συνδέσεις και την ομαδική συσχέτιση ασφαλείας (Group Security Association - GSA) για τις multicast συνδέσεις. Η συσχέτιση ασφαλείας έγκρισης επιτελεί τη διαδικασία της επικύρωσης και της ανταλλαγής κλειδιού. Μία συσχέτιση ασφαλείας δεδομένων χρησιμοποιείται σε μία unicast σύνδεση για τη προστασία των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των BS και SS. Περιέχει ένα SAID (Security Association Identifier) το οποίο προσδιορίζει μοναδικά τη συσχέτιση ασφαλείας και ένα TEK κλειδί. Διακρίνεται σε πρωταρχική και δυναμική. Η πρωταρχική συσχέτιση ασφαλείας προσδιορίζει μία μοναδική σύνδεση μεταξύ ενός BS και ενός SS, ενώ η δυναμική δημιουργείται και διαγράφεται κατά την αρχικοποίηση και το τερματισμό συγκεκριμένων ροών υπηρεσιών. Η ομαδική συσχέτιση ασφαλείας είναι λιγότερο ασφαλής επειδή τα περιεχόμενα της



μοιράζονται σε περισσότερους του ενός σταθμούς συνδρομητών με τους οποίους ο σταθμός βάσης επικοινωνεί στη περίπτωση των multicast συνδέσεων. Περιέχει τα GTEK και GKEK κλειδιά, με το GTEK κλειδί χρησιμοποιείται για τη κρυπτογράφηση των δεδομένων των multicast συνδέσεων και το GKEK για τη κρυπτογράφηση του GTEK αντιστοίχως [4].

#### **4.9.13.4 HMAC αλγόριθμος κρυπτογράφησης**

Ο HMAC (Hashed Message Authentication Code) αλγόριθμος κρυπτογράφησης χρησιμοποιείται για την επικύρωση μηνυμάτων και τον έλεγχο ακεραιότητας. Με τη χρήση του HMAC ο παραλήπτης του μηνύματος μπορεί να προσδιορίσει ποιος είναι ο αποστολέας του. Χρησιμοποιεί δύο κλειδιά επικύρωσης το HMAC\_KEY\_D για τις συνδέσεις κάτω ζεύξης του και το HMAC\_KEY\_U για τις συνδέσεις άνω ζεύξης.

#### **4.9.13.5 Διαδικασία έγκρισης προτύπου IEEE 802.16-2004**

Η διαδικασία της έγκρισης ξεκινά από το σταθμό του συνδρομητή. Κάθε τερματικό έχει το δικό του μοναδικό X.509 ψηφιακό πιστοποιητικό το οποίο περιλαμβάνει μεταξύ άλλων το δημόσιο κλειδί και τη MAC διεύθυνση. Ο σταθμός συνδρομητή στέλνει δύο μηνύματα στο σταθμό βάσης. Το πρώτο είναι το αίτημα για την επικύρωση του και περιλαμβάνει το X.509 πιστοποιητικό. Το δεύτερο είναι το αίτημα έγκρισης του X.509 το οποίο περιλαμβάνει τους αλγόριθμους κρυπτογράφησης που ο SS υποστηρίζει, το ID της πρωταρχικής συσχέτισης ασφαλείας καθώς και μία λίστα των συσχετίσεων ασφαλείας που υποστηρίζει. Μετά τη λήψη και των δύο μηνυμάτων ο BS επικυρώνει το σταθμό συνδρομητή πιστοποιώντας το X.509 και ενεργοποιεί το AK κλειδί κρυπτογραφώντας το με το RSA δημόσιο κλειδί. Επιπλέον αποφασίζει ποιοι αλγόριθμοι θα χρησιμοποιηθούν για την κρυπτογράφηση των δεδομένων (τις λεγόμενες και συσχετίσεις ασφαλείας). Οι προαναφερθείσες πληροφορίες λαμβάνονται από το σταθμό συνδρομητή με ένα μήνυμα απάντησης στο αίτημα έγκρισης του BS (Authorization Reply message) οι οποίες περιέχουν επιπρόσθετα το SAID της πρωταρχικής συσχέτισης ασφαλείας, τη περίοδο ισχύος του AK και έναν αριθμό ακολουθίας

του AK. Στο στάδιο αυτό ο SS δε μπορεί να χρησιμοποιήσει ακόμη τους πόρους του δικτύου. Στη συνέχεια στέλνει ένα αίτημα στον BS για ένα TEK κλειδί για την κρυπτογράφηση των δεδομένων (Key Request). Ο σταθμός βάσης ελέγχει αν ο σταθμός συνδρομητή έχει πάρει την έγκριση του και ενεργοποιεί το TEK κλειδί (Key Reply message), κρυπτογραφώντας το με τη βοήθεια του KEK κλειδιού. Σε αυτό το σημείο ο SS έχει το δικαίωμα να χρησιμοποιήσει τους πόρους του δικτύου. Η χρήση του X.509 εμποδίζει την πλαστή μετάδοση των προαναφερθέντων στοιχείων των “κλωνοποιημένων” σταθμών συνδρομητών στο σταθμό βάσης. Έτσι αριθμός ακολουθίας του AK εμποδίζει τη λεγόμενη “επίθεση επανάληψης” (replay attack) [5].

#### **4.9.13.6 Διαδικασία έγκρισης IEEE 802.16e και IEEE 802.16-2009 προτύπων**

Το υπόστρωμα ασφαλείας στο πρότυπο IEEE 802.16e επαναπροσδιορίστηκε με τη χρήση της δεύτερης έκδοσης του PKM πρωτοκόλλου (PKMv2) εξαιτίας του γεγονότος ότι υπήρχαν κάποια κενά ασφαλείας και επειδή γενικά οι απαιτήσεις ασφαλείας στη παροχή κινητών υπηρεσιών δεν είναι ίδιες με αυτές των σταθερών υπηρεσιών. Το PKMv2 κατά κύριο λόγο χρησιμοποιεί την ίδια βάση με το PKMv1. Η κύρια διαφορά τους έγκυται στη διαδικασία της αμοιβαίας επικύρωσης που χρησιμοποιεί το PKMv2, δηλαδή της επικύρωσης και του BS από τον SS/MS.

Η αμοιβαία επικύρωση που βασίζεται στο RSA επιτυγχάνεται με την ανταλλαγή ενός pre-PAK (pre – Primary AK) κλειδιού μεταξύ του σταθμού βάσης και του MS/SS για τη παραγωγή του AK κλειδιού. Η ανταλλαγή ξεκινά με τον SS/MS να αποστέλλει ένα μήνυμα έγκρισης (authorization information message) στο σταθμό βάσης το οποίο περιέχει το X.509 ψηφιακό πιστοποιητικό, καθώς και ένα αίτημα έγκρισης του μηνύματος (authorization request message). Ο σταθμός βάσης ελέγχει το X.509 πιστοποιητικό και αν το πιστοποιητικό είναι έγκυρο, στέλνει ένα απαντητικό μήνυμα έγκρισης στον SS/MS. Στη συνέχεια το pre-PAK κλειδί αποστέλλεται από τον BS στον MS, κρυπτογραφημένο με το δημόσιο κλειδί του MS, για να προκύψει το PAK κλειδί. Το PAK κλειδί θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τη παραγωγή του AK κλειδιού. Ο SS/MS ελέγχει με τη σειρά του το X.509 πιστοποιητικό που του αποστέλλει ο BS. Εάν το πιστοποιητικό είναι έγκυρο,

τότε ο σταθμός βάσης και ο SS/MS προχωρούν στο επόμενο στάδιο της επικύρωσης για τη παραγωγή του AK.

Η επικύρωση που βασίζεται στο RSA, προσφέρει δύο επιλογές για τη παραγωγή του AK κλειδιού. Η πρώτη είναι η επικύρωση βασισμένη μόνο στο RSA και η δεύτερη είναι η επικύρωση βασισμένη στο EAP κατόπιν της RSA έγκρισης. Στη πρώτη περίπτωση ο BS και ο SS/MS εκτελούν τις ίδιες διαδικασίες στο pre – PAK κλειδί για τη παραγωγή του AK. Όπως προαναφέραμε το PAK προκύπτει από το pre – PAK σε συνδυασμό με τη MAC διεύθυνση του SS/MS και το ID του σταθμού βάσης. Τέλος το AK παράγεται από το PAK κλειδί, τη MAC διεύθυνση του SS/MS και το ID του BS. Στη δεύτερη περίπτωση το pre – PAK παραδίδεται στον SS/MS και χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ενός κλειδιού ακεραιότητας του EAP πρωτοκόλλου (EAP Integrity Key - EIK) για την ασφάλεια της πρώτης EAP ανταλλαγής. Η πρώτη αυτή ανταλλαγή έχει ως αποτέλεσμα τη παραγωγή του MSK (master session key) κλειδιού από το οποίο παράγεται ένας αριθμός άλλων κλειδιών επικύρωσης και κρυπτογράφησης. Ο BS και ο SS/MS περικλύπτουν το μέγεθος του MSK κλειδιού για να προκύψει το PMK(pairwise master key) κλειδί, αλλά και για τη δημιουργία ενός άλλου EIK κλειδιού για τη προστασία μιας προαιρετικής διαδικασίας επικύρωσης EAP χρηστών. Το PMK, η MAC διεύθυνση του SS/MS, και το ID του BS χρησιμοποιείται έπειτα για την παραγωγή του AK. Αυτή η περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο κατά την αρχική είσοδο στο δίκτυο. Για κάθε επόμενη είσοδο ή επικύρωση, χρησιμοποιείται μόνο η πρώτη περίπτωση της επικύρωσης που βασίζεται μόνο στο RSA. Κατά την ολοκλήρωση της επικύρωσης ο BS και ο SS/MS μοιράζονται το AK. Τότε το PMK χρησιμοποιεί το AK κλειδί για τη παραγωγή του KEK κλειδιού αλλά και για τα κλειδιά επικύρωσης μηνυμάτων που χρησιμοποιούνται για την ασφαλή ανταλλαγή των TEK κλειδιών.

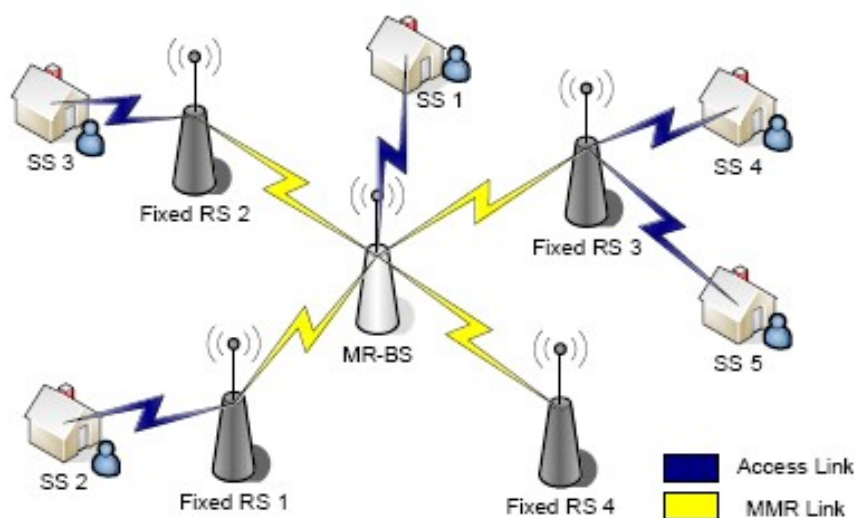
Η κρυπτογράφηση δεδομένων γίνεται με χρήση του AES (Advanced Encryption Standard) αλγόριθμου κρυπτογράφησης επειδή είναι πιο ασφαλής σε σύγκριση με τον DES στο IEEE 802.16-2004, με την υλοποίηση του AES να είναι προαιρετική [5].

#### 4.9.13.7 Ζητήματα ασφαλείας προτύπου IEEE 802.16j – 2009

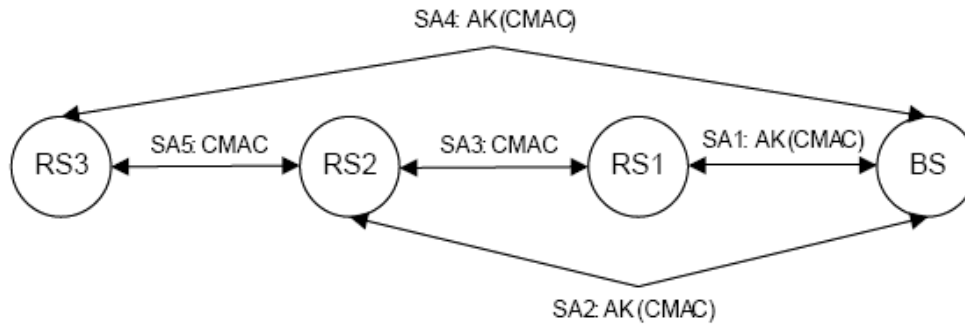
Οι μηχανισμοί ασφαλείας που χρησιμοποιούνται στο IEEE 802.16j-2009 πρότυπο είναι οι ίδιοι με αυτούς του IEEE 802.16-2009 προτύπου. Η αρχιτεκτονική ασφαλείας δε περιγράφεται σε επίπεδο access link, δηλαδή μεταξύ του RS και του SS/MS, αλλά μεταξύ του MR-BS (Multihop Relay Station) και του RS (Mobile Multi-relay Link – MMR, σχήμα 4.16).

Η αρχιτεκτονική ασφαλείας που προτείνεται στο πρότυπο αυτό θεωρεί ότι ο MR-BS αποστέλλει unicast μηνύματα ελέγχου σε οποιοδήποτε RS, καθώς και broadcast και multicast μηνύματα σε ένα σύνολο σταθμών αναμετάδοσης που έχει υπό τον έλεγχο του. Ωστόσο ένας σταθμός αναμετάδοσης μπορεί να αποστέλλει unicast μηνύματα στο σταθμό βάσης αλλά και στους σταθμούς αναμετάδοσης, εφόσον απέχουν από αυτόν ένα βήμα αναμετάδοσης (1-hop). Το σχήμα 4.17 απεικονίζει την προτεινόμενη αυτή αρχιτεκτονική.

Στο IEEE 802.16e πρωτόκολλο τα δεδομένα και κάθε μήνυμα ελέγχου που αποστέλλεται από τον BS στον MS επικυρώνονται και κρυπτογραφούνται. Ωστόσο σε έναν RS του IEEE 802.16j - 2009 η διαδικασία της κρυπτογράφησης δεν υλοποιείται εφόσον τα πακέτα έρχονται ήδη κρυπτογραφημένα από τον προηγούμενο RS. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ασφαλείας αυτού του προτύπου επιτρέπει την επικύρωση κάθε οντότητας καθώς και την επικύρωση και τον έλεγχο ακεραιότητας των μηνυμάτων ελέγχου που αποστέλλονται από ένα σταθμό αναμετάδοσης.



Σχήμα 4.16 Παράδειγμα αρχιτεκτονικής multi-hop relay συστήματος [6]



Σχήμα 4.17 Αρχιτεκτονική ασφαλείας multi-hop relay συστήματος [5]

Για τη λειτουργία του WiMAX δικτύου σύμφωνα με την multihop αναμετάδοση, απαιτείται επιπλέον η εγκαθίδρυση μιας ζώνης ασφαλείας (Security Zone - SZ). Οι ζώνες ασφαλείας αποτελούν ένα σύνολο συσχετίσεων και πληροφοριών ασφάλειας προκειμένου να υποστηριχθεί η ασφαλής επικοινωνία κατά μήκος του IEEE 802.16j δικτύου, μεταξύ του MR-BS, των σταθμών αναμετάδοσης και των SSs/MSs. Οι SZs προσδιορίζονται με τη χρήση του SAID, εκτός αυτών που ορίζονται μεταξύ δύο RS. Οι σταθμοί αναμετάδοσης και οι SSs/MSs γίνονται μέλη της ζώνης ασφαλείας του MR-BS με τη διαδικασία της επικύρωσης χρησιμοποιώντας το PKMv2 πρωτόκολλο. Με το PKMv2 ο MR-BS παρέχει ασφαλή διανομή των στοιχείων διαμόρφωσης (keying material) στον RS ή στον SS/MS, με τον RS και τον SS/MS να συγχρονίζουν τα στοιχεία διαμόρφωσης με τον MR-BS. Επιπλέον ο MR-BS κάνει χρήση του PKMv2 για να επιβάλλει την υπό όρους πρόσβαση στις υπηρεσίες δικτύου. Στο IEEE 802.16j - 2009 ορίζονται πρόσθετα PKMv2 μηνύματα καθώς και τη διαδικασία επαναχρησιμοποίησης κλειδιού ιεραρχικά, για τη δημιουργία νέων ζωνών ασφαλείας βασισμένων σε ήδη υπάρχουσες ζώνες ασφαλείας (SZs bootstrapping). Κατά την επικύρωση ο MR-BS παραδίδει τα στοιχεία διαμόρφωσης της SZ που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ακεραιότητας και τη προστασία των μηνυμάτων διαχείρισης στη SZ.

Η ζώνη ασφαλείας μεταξύ ενός MR-BS και ενός RS χρησιμοποιείται για την επικύρωση των μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ αυτών. Εγκαθιδρύεται κατά τη διάρκεια της αρχικής εισόδου στο δίκτυο και της έγκρισης, ή κατά τη διάρκεια της επαναεπικύρωσης βασιζόμενη στο AK κλειδί. Το AK κοινό διαμοιραζόμενο κλειδί εγκαθιδρύεται από το PKMv2 μεταξύ του MR-BS και του MS, αλλά και μεταξύ του RS και του SS. Η επικύρωση των μηνυμάτων ελέγχου που μεταφέρονται μεταξύ των RSs βασίζεται στον CMAC αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιεί τα

CMAC\_KEY\_U, CMAC\_KEY\_D κλειδιά τα οποία παράγονται από το AK κλειδί. Κάθε SZ διαθέτει διαφορετικά AK κλειδιά.

Γενικά τα μηνύματα ελέγχου που μεταφέρονται μεταξύ του SS/MS και MR-BS ή μεταξύ του RS και MR-BS και επικυρώνονται από τα CMAC\_KEY\_U και CMAC\_KEY\_D κλειδιά. Οι ενδιαμέσοι κόμβοι δεν είναι ικανοί να τροποποιήσουν ή να επαναλάβουν τα μηνύματα.

Η ζώνη ασφαλείας μεταξύ δύο γειτονικών RS χρησιμοποιείται για την επικύρωση του αποστολέα ενός μηνύματος ελέγχου μεταξύ αυτών των δύο RSs. Έχει ως στόχο την προστασία της ακεραιότητας των μηνυμάτων ελέγχου μεταξύ της σύνδεσης αυτών των RSs κάνοντας χρήση του CMAC αλγόριθμου, ο οποίος είναι πιο ασφαλής έναντι του HMAC αλγορίθμου. Για μια ζώνη ασφαλείας μεταξύ δύο σταθμών αναμετάδοσης τα στοιχεία διαμόρφωσης παράγονται βάση της προηγούμενης SA και διανέμονται με βάση την προ-προηγούμενη SA. Για παράδειγμα ο RS2 αιτείται στον MR-BS τη παραγωγή και μεταφορά των CMAC\_KEY\_U2 και CMAC\_KEY\_D2 κλειδιών στον RS1, μέσω της SA1 που διαθέτει ο MR-BS με τον RS1. Για παράδειγμα τα στοιχεία διαμόρφωσης της SA3 προέρχονται από την SA2 του RS2 και του MR-BS. Ο RS2 τα ζητά από τον MR-BS χρησιμοποιώντας την SA2. Κατόπιν μεταφέρονται στον RS1 με τη χρήση της SA1.

Ο RS2 είναι ο σταθμός αναμετάδοσης ο οποίος αρχικοποιεί την εγκαθίδρυση μιας ζώνης ασφαλείας μεταξύ αυτού και του RS1. Θεωρώντας ότι διαθέτουμε αυτούς τους δύο σταθμούς αναμετάδοσης προκύπτουν οι εξής ζώνες ασφαλείας (σχήμα 4.18):

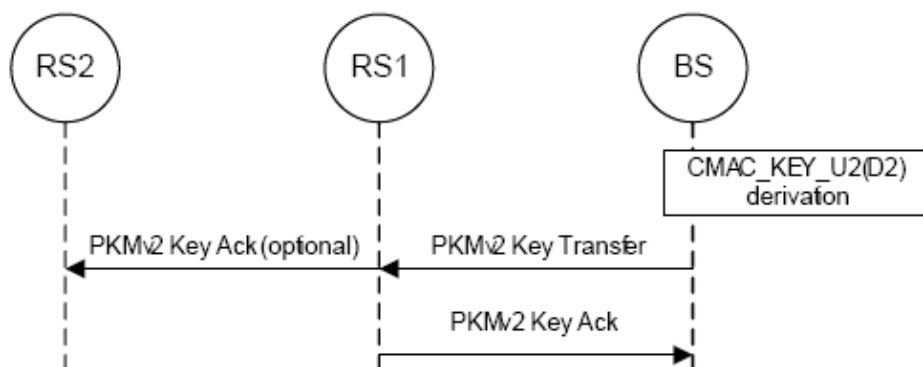
- Σε πρώτη φάση γίνεται η εγκαθίδρυση της ζώνης ασφαλείας μεταξύ του RS1 και του MR-BS με την πραγματοποίηση των διαδικασιών της επικύρωσης και της παραγωγής κλειδιού.
- Για την εγκαθίδρυση της ζώνης ασφαλείας μεταξύ του RS2 και του MR-BS πραγματοποιούνται επίσης οι διαδικασίες της επικύρωσης και της παραγωγής κλειδιού. Τα CMAC\_KEY\_U<sub>2</sub> και CMAC\_KEY\_D<sub>2</sub> κλειδιά παράγονται στον RS2 ή προαιρετικά στον MR-BS. Γενικά ο δημιουργός του μηνύματος επικύρωσης υπολογίζει τη MAC διεύθυνση χρησιμοποιώντας το κλειδί το οποίο μοιράζεται με τον επόμενο RS. Εν συνεχεία αυτός ο RS αφαιρεί τη παλιά MAC διεύθυνση και υπολογίζει εκ νέου τη νέα MAC

διεύθυνση χρησιμοποιώντας το κλειδί που μοιράζεται με τον αμέσως επόμενο RS.

- Το IEEE 802.16e-2005 πρότυπο δεν υποστηρίζει τη λειτουργία διανομής κλειδιού για τη δημιουργία ενδιάμεσων SZs, δηλαδή SZs μεταξύ των σταθμών αναμετάδοσης. Για την εγκαθίδρυση κλειδιού μεταξύ δύο RSs προτείνονται οι ακόλουθες τροποποιήσεις στο PKMv2. Κατά την επιτυχή επικύρωση του RS2 ο MR-BS στέλνει ένα μήνυμα μεταφοράς κλειδιού στον RS1 ως σταθμό που προηγείται. Η μεταφορά των κλειδιών περιλαμβάνει τα CMAC\_KEY\_U2 και CMAC\_KEY\_D2 κλειδιά ως αντίστοιχα κλειδιά του RS2. Τα κλειδιά αυτά κρυπτογραφούνται από το KEK του RS1. Κατά τη λήψη του μηνύματος κλειδιού από τον MR-BS ο RS1 στέλνει στον MR-BS και (προαιρετικά) στον RS2 ένα μήνυμα αποδοχής. Με αυτό το τρόπο ο RS1 και ο MR-BS είναι ενήμεροι για την καθιέρωση του SA μεταξύ του RS1 και του RS2 [5].

#### 4.10 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX σχεδιάστηκε βάση κάποιων αρχών που συναντάμε στο WiFi και συγκεκριμένα στο πρότυπο IEEE 802.11a και καθορίζει τη φυσική σύνδεση μεταξύ των συστατικών μερών που επικοινωνούν μεταξύ τους ως προς και τις δύο κατευθύνσεις (άνω και κάτω ζεύξη). Είναι δηλαδή υπεύθυνο για τη διαβίβαση των ακολουθιών των bit προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τον τύπο του σήματος που χρησιμοποιείται, το είδος της διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης, την ισχύς μετάδοσης καθώς και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 4.18 Εγκαθίδρυση ζωνών ασφαλείας για τη multihop αναμετάδοση [5]

#### 4.10.1 FDD και TDD τεχνικές μετάδοσης

Στο WiMAX η μετάδοση κάτω ζεύξης αναφέρεται στην εκπομπή του σταθμού βάσης ενώ η μετάδοση άνω ζεύξης αναφέρεται στην εκπομπή του σταθμού του συνδρομητή. Η μετάδοση αυτών των πληροφοριών μεταξύ των δύο σταθμών γίνεται με δύο είδη τεχνικών αμφίδρομης εκπομπής, την FDD που είναι μια τεχνική διαχωρισμού ως προς τη συχνότητα και την TDD, που είναι μια τεχνική διαχωρισμού ως προς το χρόνο. Η FDD τεχνική απαιτεί δύο ξεχωριστά κανάλια, ένα για τη μετάδοση της κάτω ζεύξης και ένα για την άνω ζεύξη. Τα δύο αυτά κανάλια καταλαμβάνουν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων η μετάδοση στα οποία μπορεί να γίνει ταυτοχρόνως. Στα FDD συστήματα οι δομές των πλαισίων της άνω και κάτω ζεύξης είναι όμοιες καθιστώντας τα ιδανικά για υπηρεσίες φωνής διπλής κατεύθυνσης. Αυτός είναι ο λόγος όπου η FDD τεχνική έχει υιοθετηθεί από τα 2G και 3G κυψελοειδή δίκτυα. Τα δύο αυτά κανάλια παρεμβάλλονται από μια ζώνη συχνοτήτων μεγέθους 100 MHz η οποία προφυλάσσει την άνω και κάτω ζεύξη από τις μεταξύ τους πιθανές παρεμβολές.

Η TDD τεχνική χρησιμοποιεί ένα κανάλι μετάδοσης με την άνω και κάτω ζεύξη να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων σε διαφορετικές όμως χρονικές στιγμές. Για την αποφυγή της σύγκρουσης των δεδομένων των διαφορετικών κατευθύνσεων μεσολαβεί ένας χρονικός διαχωρισμός ασφαλείας που ονομάζεται TTG (Transmit Transition Gap). Στα TDD συστήματα οι δομές των πλαισίων των δύο ζεύξεων μπορούν να είναι διαφορετικές μεταξύ τους. Επομένως η TDD τεχνική είναι καταλληλότερη για ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης μεταξύ της άνω και κάτω ζεύξης, έχοντας όμως δυνατότητα υποστήριξης και συμμετρικών ρυθμών μετάδοσης. Η χρήση της ίδιας ζώνης συχνοτήτων προσφέρει υψηλότερη φασματική απόδοση και συνεπώς εξοικονόμηση εύρους ζώνης κάνοντας τα TDD συστήματα πιο οικονομικά και απλά στην υλοποίηση. Στις περισσότερες των εφαρμογών (εκτός ίσως από τη μετάδοση φωνής), η μετάδοση είναι ασύμμετρη, δηλαδή το μεγαλύτερο ποσοστό δεδομένων μεταδίδεται από την κάτω ζεύξη (π.χ. internet, video & audio streaming, IPTV κ.λπ.) και για το λόγο αυτό προτιμάται η χρήση της TDD. Σημειώνεται ότι στη mesh τοπολογία υποστηρίζεται μόνο τη TDD τεχνική [1].



#### 4.10.2 Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας

Στο χώρο των τηλεπικοινωνιών ως διαμόρφωση ορίζεται η διαδικασία μεταβολής ενός περιοδικού σήματος συνήθως υψίσυχνου, με στόχο την κωδικοποίηση σε αυτό ενός σήματος χαμηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει κωδικοποιημένη πληροφορία. Το υψίσυχο αυτό σήμα καλείται και φέρον και συνήθως είναι ένα σήμα απλής συχνότητας (π.χ. μία ημιτονοειδής κυματομορφή). Η διαμόρφωση απαιτείται για να μπορέσει να διέλθει το σήμα από κάποιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι.

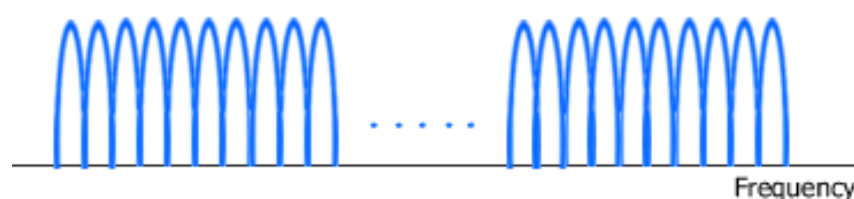
Η διαμόρφωση με πολύπλεξη συχνότητας ορθογωνίων φερουσών (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) ανήκει στην οικογένεια συστημάτων μετάδοσης που ονομάζεται διαμόρφωση πολυφερόντων (Multicarrier Modulation - MCM) και βασίζεται στην ιδέα της διαίρεσης των υψηλού ρυθμού ροών δεδομένων σε ροές χαμηλότερου ρυθμού μετάδοσης. Κάθε επιμέρους ροή δεδομένων αντιστοιχίζεται σε έναν υποφορέα και κατόπιν διαμορφώνεται με κάποιο τύπο του PSK ή του QAM σχήματος διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση πολλαπλών φερόντων περιορίζει ή εξαλείφει τη διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference - ISI) κάνοντας το χρόνο του κάθε συμβόλου αρκετά μεγάλο έτσι ώστε η καθυστέρηση που προξενείται από το κανάλι μετάδοσης να είναι ασήμαντη ως προς το χρόνο του συμβόλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ενός συμβόλου τόσο περισσότεροι είναι οι υποφορείς και άρα η αποδοτικότητα του φάσματος.

Η OFDM θεωρείται κατάλληλη για περιβάλλοντα αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων υψηλών ταχυτήτων, σε συνθήκες μη οπτικής επαφής. Βασίζεται στην τεχνική της πολύπλεξης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM) η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη και παράλληλη μετάδοση πολλαπλών σημάτων διαφόρων πομποδεκτών, σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων (υποφορείς). Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 4.19 η FDM χρησιμοποιεί ζώνες



Σχήμα 4.19 Πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας [7]

ασφαλείας μεταξύ των υποφορέων για τη μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής. Ως εκ τούτου, αυτή η λύση δε μοιάζει να είναι αποδοτική και να κάνει αποτελεσματική χρήση του φάσματος συχνοτήτων. Αντιθέτως στην OFDM οι υποφορείς επιλέγονται να είναι ορθογώνια τοποθετημένοι μεταξύ τους καταργώντας την ανάγκη ύπαρξης ζωνών ασφαλείας και άρα απαιτείται μικρότερο εύρος ζώνης (σχήμα 4.20). Επειδή υπάρχουν περισσότεροι υποφορείς προς διαμόρφωση και συνεπώς μετριάζοντας οι παρεμβολές αυτή η μέθοδος είναι περισσότερο φασμαποδοτική. Η OFDM υποστηρίζει τόσο την TDD όσο και την FDD τεχνική μετάδοσης, υιοθετώντας τη μέθοδο του γρήγορου Fourier μετασχηματισμού (Fast Fourier Transform - FFT) και του αντίστροφου Fourier μετασχηματισμού (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT). Η IFFT μέθοδος χρησιμοποιείται από έναν WiMAX δέκτη για τη δημιουργία μιας OFDM κυματομορφής από διαμορφωμένες ροές δεδομένων, ενώ η FFT χρησιμοποιείται από έναν WiMAX δέκτη για την αποδιαμόρφωση των ροών δεδομένων. Ο Fourier μετασχηματισμός είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος που μετατρέπει μία συνάρτηση χρόνου σε συνάρτηση συχνοτήτων. Το μέγεθος του FFT που χρησιμοποιεί είναι 256, που σημαίνει ότι το αρχικό σήμα του καναλιού υποδιαιρείται σε 256 υποφορείς. Από τους 256 υποφορείς οι 192 χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων (data subcarriers), οι 8 για συγχρονισμό, τον υπολογισμό της συχνότητας και της φάσης των ληφθέντων σημάτων (pilot subcarriers) [1] και οι υπόλοιποι υποφορείς ως ζώνες ασφαλείας (null subcarriers). Αυτός είναι και ο λόγος που η OFDM τεχνική χαρακτηρίζεται ως ένα σχήμα πολλαπλών φερόντων. Γενικά η επιλογή ενός FFT μεγάλου μεγέθους μειώνει το διάστημα μεταξύ των υποφορέων αυξάνοντας τη διάρκεια του συμβόλου. Δεδομένου ότι στην OFDM τεχνική το μέγεθος του FFT είναι σταθερό, η απόσταση μεταξύ των υποφορέων ποικίλει ανάλογα με το εύρος ζώνης του



**Σχήμα 4.20** Ορθογωνική Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας [7]

καναλιού. Όταν γίνεται χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης η απόσταση μεταξύ των υποφερόντων αυξάνεται και συνεπώς ο χρόνος του συμβόλου μειώνεται.

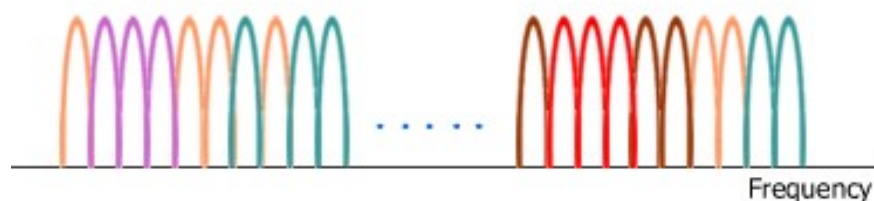
Το OFDM σχήμα χρησιμοποιείται από πολλές ευρέως χρησιμοποιούμενες εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεοπτική αναμετάδοση στην Ευρώπη, την Αυστραλία και την Ιαπωνία, στην ψηφιακή αναμετάδοση ήχου στην περιοχή της Ευρώπης, στα ADSL modems και στα IEEE802.11a/g πρότυπα [1].

#### 4.10.3 Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης και υποκαναλοποίηση

Η διαδικασία της υποκαναλοποίησης (subchannelization) αναφέρεται στην ομαδοποίηση των διαθέσιμων υποφερόντων σε ομάδες που ονομάζονται υποκανάλια. Το IEEE 802.16-2004 επιτρέπει την περιορισμένη χρήση της υποκαναλοποίησης μόνο στην άνω ζεύξη, ορίζοντας 16 υποκανάλια τα οποία μπορούν ανά 1, 2, 4, 8 ή όλα μαζί να ανατεθούν σε ένα σταθμό συνδρομητή.

Στο φυσικό επίπεδο του IEEE 802.16e-2005, χρησιμοποιείται η πολλαπλή πρόσβαση με πολυπλεξία διαίρεσης ορθογώνιων συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA) η οποία βασίζεται στην OFDM. Όπως η OFDM έτσι η OFDMA κάνει χρήση των υποφερόντων χωρίς να παρεμβάλει ζώνες ασφαλείας ενδιάμεσα τους υποστηρίζοντας ωστόσο την υποκαναλοποίηση τόσο στην άνω όσο και στη κάτω ζεύξη (σχήμα 4.21).

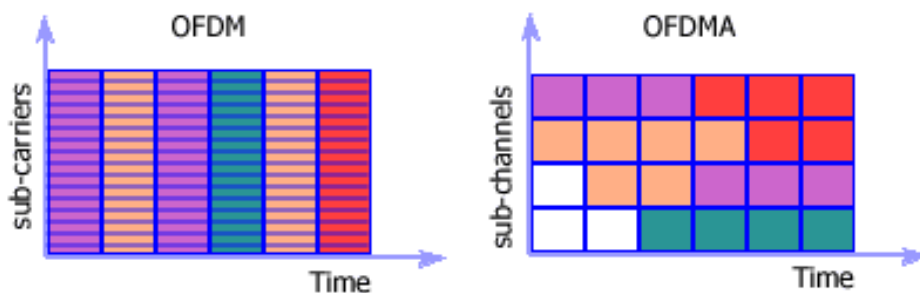
Τα υποκανάλια και σε αυτή την περίπτωση αποτελούν την ελάχιστη μονάδα πόρων που μπορεί να αναθέσει ένας σταθμός βάσης σε ένα σταθμό συνδρομητή. Συνεπώς διαφορετικά κανάλια μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικούς συνδρομητές για ταυτόχρονη χρήση, προκύπτοντας έτσι ένας αποτελεσματικός



Σχήμα 4.21 Ορθογωνική Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης [7]

μηχανισμός πολλαπλής πρόσβασης. Στην κάτω ζεύξη ένα υποκανάλι μπορεί να προορίζεται για διαφορετικούς χρήστες. Στην άνω ζεύξη όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.22 ένας πομπός μπορεί να αποδοθεί σε ένα ή περισσότερα υποκανάλια. Η ομαδοποίηση των υποφερόντων σε υποκανάλια στην άνω ζεύξη επιτρέπει στους σταθμούς των συνδρομητών να μεταδίδουν χρησιμοποιώντας ένα κλάσμα του συνολικού εύρους ζώνης που τους έχει ανατεθεί από το σταθμό βάσης. Αυτό έχει ως συνέπεια την εξοικονόμηση ισχύος του σταθμού συνδρομητή και άρα τη βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του.

Τα υποκανάλια μπορεί να αποτελούνται από γειτονικούς ή μη γειτονικούς (τυχαία κατανεμημένους) υποφορείς που είναι κατανεμημένοι κατά μήκος ολόκληρου του φάσματος συχνοτήτων. Αυτά που σχηματίζονται χρησιμοποιώντας τους τυχαία κατανεμημένους υποφορείς παρέχουν μεγαλύτερη ποικιλομορφία συχνοτήτων (frequency diversity) η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις κινητές εφαρμογές. Το WiMAX ορίζει διαφορετικά σχήματα υποκαναλοποίησης βασισμένα στους κατανεμημένους αυτούς φορείς για την άνω και κάτω ζεύξη. Ένα από αυτά ονομάζεται μερική χρήση υποφερόντων (Partial Usage of Subcarriers - PUSC), η υλοποίηση της οποίας είναι υποχρεωτική για όλες τις κινητές εφαρμογές του WiMAX. Το PUSC ορίζει 15 και 17 υποκανάλια για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα, με εύρος ζώνης καναλιού 5 MHz. Για κανάλι εύρους 10 MHz προβλέπονται 30 και 35 καναλιών αντίστοιχα. Το σχήμα υποκαναλοποίησης που βασίζεται στη χρήση γειτονικών υποφερόντων ονομάζεται προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC). Η προσαρμοστική διαμόρφωση αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος στο σύνολό της. Αν και η δυνατότητα συχνοτικού διαφορισμού δεν υπάρχει σε αυτό το



Σχήμα 4.22 Υποκαναλοποίηση άνω ζεύξης [7]

σχήμα μπορεί να εφαρμοσθεί ο διαφορισμός πολλαπλών χρηστών (multiuser diversity). Με το διαφορισμό πολλαπλών χρηστών ένα σύστημα κερδίζει σε χωρητικότητα αν κάθε χρήστης συσχετιστεί με ένα υποκανάλι. Γενικά η χρήση γειτονικών υποφερόντων είναι καταλληλότερη για σταθερές και μικρής κινητικότητας εφαρμογές. Τα WiMAX συστήματα προβαίνουν στη χρήση της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης προκειμένου να επωφεληθούν των διακυμάνσεων ενός καναλιού.

Ένας σταθμός συνδρομητή μπορεί με τη χρήση ενός δείκτη ανάδρασης να ενημερώνει το σταθμό βάσης για την ποιότητα της ροής δεδομένων της κάτω ζεύξης. Εν συνεχεία ο σταθμός βάσης ενημερώνεται για την ποιότητα του καναλιού της κάτω ζεύξης από την ποιότητα του ληφθέντος σήματος υπολογίζοντας κατ' αυτό το τρόπο την ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας ανά χρήστη ορίζοντας έτσι τον κατάλληλο μηχανισμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Η βασική ιδέα της AMC τεχνικής είναι η μετάδοση σε υψηλούς ρυθμούς όσο η ποιότητα του καναλιού είναι καλή και η μετάδοση δεδομένων σε χαμηλότερους ρυθμούς στην περίπτωση υποδεέστερης ποιότητας καναλιού. Σε ένα OFDMA δίκτυο η κατανομή των υποκαναλιών στους χρήστες γίνεται με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι και τις απαιτήσεις των δεδομένων. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ο χρήστης στο σταθμό βάσης τόσο αυξάνεται και ο αριθμός καναλιών που του ανατίθενται κάνοντας χρήση ενός υψηλότερου βαθμού σχήματος διαμόρφωσης (π.χ. 64QAM). Όσο ο χρήστης απομακρύνεται από το σταθμό βάσης ο αριθμός των καναλιών που του ανατίθενται επαναπροσδιορίζεται δυναμικά και μειώνεται. Ωστόσο με την απομάκρυνση του χρήστη από το σταθμό βάσης η ισχύς που κατανέμεται για κάθε κανάλι αυξάνεται [21]. Στην περίπτωση αυτή το SNR μειώνεται ενώ στην περίπτωση που ο BS επιλέξει να καταναίμει λιγότερη ισχύ σε ένα σταθμό συνδρομητή το SNR αυξάνεται. Η υποκαναλοποίηση επιτρέπει στο σταθμό βάσης να καταναίμει περισσότερη ισχύ στα υποκανάλια που προορίζονται για σταθμούς συνδρομητών εντός κτιρίων για την αύξηση της περιοχής κάλυψης αυτών.

Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στην άνω και κάτω ζεύξη είναι τα BPSK, QPSK, 16 QAM και 64 QAM. Ωστόσο κατά τη χρήση της OFDMA τεχνικής η χρήση της 64 QAM στην άνω ζεύξη και η χρήση της BPSK στην κάτω ζεύξη είναι προαιρετικές. Στο IEEE 802.16e-2005 πρότυπο το μέγεθος των υποφερόντων που προκύπτει από τον FFT μετασχηματισμό μπορεί να είναι 128,

256, 1024 ή 2048 (πίνακας 4.5). Με την αύξηση του εύρους ζώνης αυξάνεται και το μέγεθος του FFT κατά τέτοιο τρόπο ώστε η απόσταση μεταξύ των υποφερόντων να είναι κατά είναι πάντα 10.94 KHz. Αυτό διατηρεί τη διάρκεια των OFDM συμβόλων σταθερή. Η σταθερή απόσταση μεταξύ των υποφερόντων παρέχει καλύτερη ποιότητα σήματος Το συγκεκριμένο διάστημα των 10.94 KHz συνεπάγεται τη χρήση του αριθμού των 128, 256, 1024 ή 2048 υποφερόντων όταν το εύρος ζώνης είναι 1.25MHz, 5MHz, 10MHz ή 20MHz αντίστοιχα. Οι τιμές μεταξύ των 1.25 και των 20MHz προκύπτουν από το διαφορετικό μέγεθος των καναλιών που υποστηρίζει κάθε χώρα. Όταν κατά τη χρήση διαφορετικών προτύπων το μέγεθος του FTT διαφέρει, δεν υποστηρίζεται η διαλειτουργικότητα του εξοπλισμού τους. Μια εναλλακτική χρήση έναντι της OFDMA λειτουργίας με ελάχιστες διαφορές είναι η scalable OFDMA (sOFDMA), η οποία υποστηρίζει επίσης την υποκαναλοποίηση [1].

#### 4.10.4 Δομή θυρίδας και πλαισίου

Σε ένα WiMAX σύστημα, ο ελάχιστος πόρος που μπορεί να κατανεμηθεί στο πεδίο της συχνότητας ή στο πεδίο του χρόνου για μια δεδομένη ζεύξη ονομάζεται θυρίδα (slot). Κάθε θυρίδα αποτελείται από ένα υποκανάλι, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα, δύο ή τρία OFDM σύμβολα, αναλόγως με το σχήμα υποκαναλοποίησης που χρησιμοποιείται. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται μια σειρά θυρίδων η οποία αποκαλείται περιοχή δεδομένων (data region) του χρήστη. Αυτές οι περιοχές δεδομένων κατανέμονται στους χρήστες με τη βοήθεια κάποιου αλγόριθμων χρονοπρογραμματισμού ανάλογα της ζήτησης, τις απαιτήσεις ποιότητας της

**Πίνακας 4.5** Μέγεθος υποφερόντων σε διαφορετικά πρότυπα και διαφορετικές τεχνικές διαμόρφωσης [4]

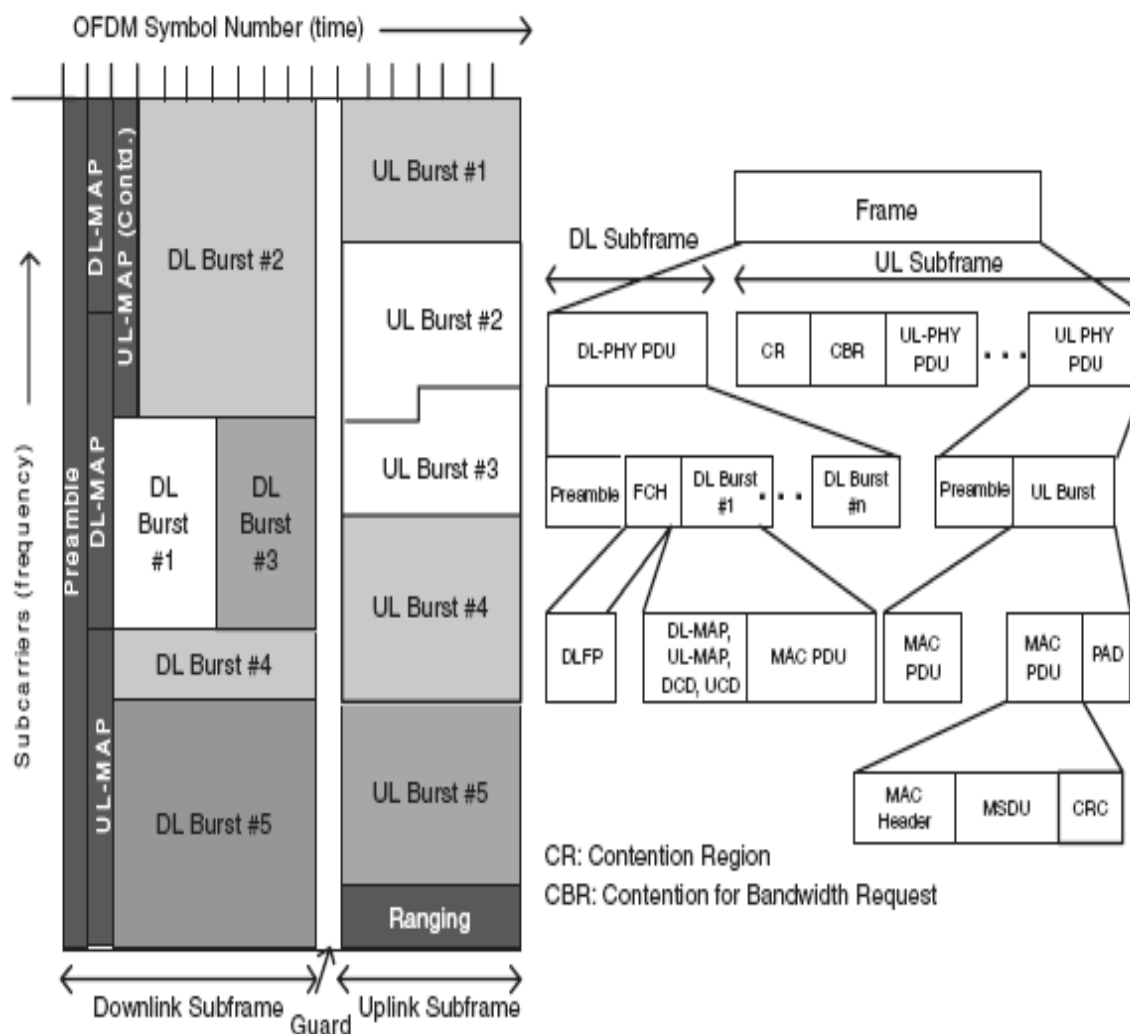
| 802.16-2004 (fixed) | 802.16e (mobile) |
|---------------------|------------------|
| Single Carrier      | Single Carrier   |
| OFDM 256 FFT        | OFDM 256 FFT     |
| OFDMA 2048 FFT      | OFDM 2048 FFT    |
|                     | sOFDMA 1024 FFT  |
|                     | sOFDMA 512 FFT   |
|                     | sOFDMA 128 FFT   |

υπηρεσίας και τις συνθήκες του καναλιού.

Στο σχήμα 4.23 απεικονίζεται ένα OFDM πλαίσιο όταν εφαρμόζεται η TDD τεχνική. Το πλαίσιο υποδιαιρείται σε δύο υποπλαίσια, ένα πλαίσιο κάτω ζεύξης το οποίο ακολουθείται από ένα πλαίσιο άνω ζεύξης με ένα διάστημα ασφαλείας (guard interval) μεταξύ τους. Ο λόγος του υποπλαισίου της κάτω ζεύξης προς το υποπλαίσιο της άνω ζεύξης κυμαίνεται από 3:1 έως 1:1 για την υποστήριξη των διαφορετικών αναγκών ροής κίνησης. Κάποια σταθερά WiMAX συστήματα υποστηρίζουν και τη FDD τεχνική στην περίπτωση της οποίας η δομή του πλαισίου είναι ίδια με αυτή της TDD με τη διαφορά ότι η μετάδοση γίνεται την ίδια χρονική στιγμή σε διαφορετικές όμως συχνότητες. Ωστόσο στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιείται η TDD τεχνική εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που διαθέτει όπως ο πιο ευέλικτος διαμοιρασμός του εύρους ζώνης στην άνω και κάτω ζεύξη, το ότι δεν απαιτεί δύο διαφορετικές συχνότητες μετάδοσης και ότι επιτρέπει έναν απλό σχεδιασμό στη πλευρά του δέκτη. Το μειονέκτημα της TDD όμως έγκυται στο ότι απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ των πολλαπλών σταθμών βάσης, για την αποφυγή φαινομένων παρεμβολών [1].

Όπως απεικονίζεται και από το σχήμα 4.23 ένα υποπλαίσιο κάτω ζεύξης ξεκινά με το preamble, το οποίο χρησιμοποιείται για διαδικασίες όπως ο συχνοτικός και χρονικός συγχρονισμός και η αρχική εκτίμηση καναλιού (initial channel estimation). Το preamble στη συνέχεια ακολουθείται από μία κεφαλίδα ελέγχου πλαισίου (Frame Control Header – FCH), η οποία παρέχει στο πλαίσιο πληροφορίες παραμετροποίησης, όπως το MAP μήνυμα, την τεχνική διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και τους χρησιμοποιούμενους υποφορείς. Τα MAP μηνύματα της άνω και κάτω ζεύξης (UL-MAP και DL-MAP) καθορίζουν τις περιοχές δεδομένων που ανατίθενται στους χρήστες. Αυτά τα μηνύματα εκπέμπονται ευρέως (broadcasted) αμέσως μετά την κεφαλίδα ελέγχου πλαισίου της κάτω ζεύξης.

Τα MAP μηνύματα περιλαμβάνουν για κάθε χρήστη ένα προφίλ ριπής στο οποίο ορίζεται το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που ορίζεται σε αυτήν τη ζεύξη. Αν και τα MAP μηνύματα αποτελούν έναν αξιόπιστο τρόπο για την πληροφόρηση της δομής του πλαισίου και του προφίλ ριπής των σταθμών των συνδρομητών από το σταθμό βάσης, μπορεί να δημιουργηθεί ένα σημαντικό



Σχήμα 4.23 Δομή OFDM ενός TDD frame [1]

επίβαρο (overhead) ειδικά στην περίπτωση μεγάλου αριθμού χρηστών με μικρό μέγεθος πακέτων, όπως στη περίπτωση της VoIP τεχνολογίας. Για τη μετρίαση αυτού του φαινομένου τα συστήματα του mobile WiMAX προβλέπουν την προαιρετική χρήση πολλαπλών sub-MAP μηνυμάτων όπου μεταδίδονται σε κάθε χρήστη με ρυθμούς αναλόγως του SNR που επικρατεί σε κάθε έναν από αυτούς.

Το WiMAX είναι αρκετά ευέλικτο σε ζητήματα που αφορούν τον αριθμό των χρηστών και των πακέτων που πολυπλέκονται ανά πλαίσιο. Ένα μόνο πλαίσιο κάτω ζεύξης μπορεί να περιέχει πολλαπλές ριπές διαφόρων μεγεθών και τύπων δεδομένων για τους διάφορους χρήστες. Επίσης το μέγεθός του μπορεί να κυμαίνεται σε διάρκεια από 2 έως και 20 ms, με κάθε ριπή να περιέχει πολλαπλά αλυσιδωτά πακέτα σταθερού ή μεταβλητού μεγέθους ή και μέρη πακέτων που έχουν ληφθεί από υψηλότερα επίπεδα.



Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης αποτελείται από πολλαπλές ριπές διαφόρων χρηστών. Ένα μέρος αυτού ανατίθεται για contention-based πρόσβαση, μέσω του καθορισμού συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων (contention slots) τα οποία επιτρέπουν στις συσκευές να ζητήσουν τυχαία κάποια υπηρεσία από το σύστημα. Όταν ο σταθμός συνδρομητή αποκτήσει το πρώτο contention slot μπορεί να μεταδώσει ένα μήνυμα για να απαιτήσει την πρόσβαση στο σύστημα. Το υποπλαίσιο άνω ζεύξης χρησιμοποιείται ως κανάλι ταξινόμησης (ranging channel), για τη ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος κατά την είσοδο στο δίκτυο ή για αιτήσεις εύρους ζώνης στην άνω ζεύξη από τους σταθμούς συνδρομητών. Επιπλέον, best-effort δεδομένα μπορούν να σταλούν στο contention-based κανάλι όταν η ποσότητα των δεδομένων είναι πολύ μικρή για να αφιερωθεί ένα ολόκληρο κανάλι για την αποστολή τους. Επιπλέον το υποπλαίσιο άνω ζεύξης διαθέτει ένα κανάλι δείκτη ποιότητας καναλιού (Channel-Quality Indicator Channel - CQICH) για να τροφοδοτεί το σταθμό βάσης με τις πληροφορίες αυτές και ένα κανάλι αναγνώρισης (acknowledgment channel) για το σταθμό συνδρομητή για να τροφοδοτεί την κάτω ζεύξη.

Για το χειρισμό των χρονικών αποκλίσεων το WiMAX υποστηρίζει προαιρετικά τη συχνή χρήση μικρών preambles (midables). Στην άνω ζεύξη αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται ανά 8, 16 ή 32 σύμβολα και στην κάτω ζεύξη να τοποθετούνται στην αρχή κάθε ριπής. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση των midables ανά 10 σύμβολα επιτρέπουν τη κινητικότητα σε ταχύτητες έως 150 Km/h.

#### **4.10.5 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση**

Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση αυξάνει σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος. Οι συνδυασμοί των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης στο WiMAX αποτελούν τα προφίλ ριπής, με την αλλαγή αυτών των τεχνικών να γίνεται ανά ριπή αναλόγως με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι. Με τη χρήση ενός δείκτη ποιότητας καναλιού (channel quality indicator) ο σταθμός συνδρομητή μπορεί να ενημερώνει το σταθμό βάσης για την ποιότητα του καναλιού της κάτω ζεύξης. Για την άνω ζεύξη ο σταθμός βάσης μπορεί να υπολογίσει την ποιότητα καναλιού βάση της ποιότητας του ληφθέντος σήματος. Ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) του σταθμού βάσης μπορεί να υπολογίσει της

άνω και κάτω ζεύξης για κάθε χρήστη επιλέγοντας το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης το οποίο θα αυξάνει την διαεκπεραιότητα (throughput) για κάθε δεδομένο SNR. Άλλοι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης είναι η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του χρήστη, οι καιρικές συνθήκες και οι παρεμβολές των σημάτων. Ο πίνακας 4.6 απαριθμεί τους διαφορετικούς τύπους σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υποστηρίζει το WiMAX. Στην άνω ζεύξη τα QPSK, 16 QAM, και 64 QAM σχήματα διαμόρφωσης είναι υποχρεωτικά τόσο για το fixed όσο και για το mobile WiMAX. Όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός της διαμόρφωσης (high-order modulation) τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται. Ωστόσο οι τεχνικές υψηλότερου βαθμού διαμόρφωσης είναι πιο ευαίσθητες στο θόρυβο και σε παρεμβολές προκαλώντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης εσφαλμένων bit (Bit Error Rate - BER).

Η κωδικοποίηση καναλιού καλύπτει την απαίτηση της συντήρησης των υψηλών ρυθμών μετάδοσης, μέσω της αποτροπής και της διόρθωσης των σφαλμάτων. Η τεχνική της κωδικοποίησης καναλιού πραγματοποιείται μέσω της διαδικασιών της τυχαιοποίησης (randomization), της αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων (Forward Error Correction - FEC) και της διεμπλοκής (interleaving) κατά την εκπομπή με τη σειρά που αναφέρονται. Οι αντίστοιχες διαδικασίες κατά τη λήψη εφαρμόζονται με αντίστροφη σειρά. Σκοπός της τυχαιοποίησης είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων μέσω της κρυπτογράφησης φυσικού επιπέδου, ώστε να αποτραπεί μια πιθανή αποκωδικοποίηση των δεδομένων από κάποιο κακόβουλο δέκτη (rogue receiver). Η τυχαιοποίηση εφαρμόζεται σε κάθε FEC block στην άνω και κάτω ζεύξη. Ένα FEC block αποτελείται από έναν αριθμό

**Πίνακας 4.6** Υποστηριζόμενα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης φυσικού επιπέδου [9]

|            | Downlink                                                                                                                                                                                         | Uplink                                                                                                                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modulation | BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; BPSK optional for OFDMA-PHY                                                                                                                                          | BPSK, QPSK, 16 QAM; 64 QAM optional                                                                                                                                       |
| Coding     | Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6<br>Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC, RS-Codes for OFDM-PHY | Mandatory: convolutional codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6<br>Optional: convolutional turbo codes at rate 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; repetition codes at rate 1/2, 1/3, 1/6, LDPC |

υποκαναλιών το πλήθος των οποίων εξαρτάται από το σχήμα κωδικοποίησης καναλιού και το τύπο της διαμόρφωσης. Τα preambles δεν υφίστανται τη διαδικασία της τυχαιοποίησης. Οι υποχρεωτικοί FEC κώδικες που χρησιμοποιούνται βασίζονται στη δυαδική, μη αναδρομική συνελκτική κωδικοποίηση (Convolutional Coding - CC). Ενδεικτικά αναφέρουμε τον RS-CC (Reed–Solomon Convolutional Code) για το OFDM PHY. Ωστόσο γίνεται χρήση και κάποιων προαιρετικών FEC κωδικών στο OFDM και στο OFDMA PHY όπως ο CTC (Convolutional Turbo Code) και ο LDPC (Low Density Parity Check). Ο CTC αξίζει ιδιαίτερης προσοχής εξαιτίας της πολύ καλής απόδοσης και της ευρείας χρήσης του και από άλλα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα όπως το HSDPA και το 1xEV-DO. Η διεμπλοκή εκτελείται ανεξάρτητα σε κάθε FEC block και χρησιμοποιείται για την προστασία της μετάδοσης έναντι των ακολουθιών διαδοχικών σφαλμάτων που είναι δύσκολο να διορθωθούν. Αυτές οι ακολουθίες σφαλμάτων μπορεί να οδηγήσουν στην απώλεια των μεταδιδόμενων ριπών. Η διεμπλοκή μέσω κάποιου διαφορισμού μπορεί να διευκολύνει τη διόρθωση αυτών των σφαλμάτων. [1].

#### **4.10.6 Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων**

Γνωρίζοντας την ευελιξία του φυσικού επιπέδου του WiMAX οι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων ποικίλουν και εξαρτώνται κυρίως από το εύρος ζώνης του καναλιού, τον τύπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται καθώς και τον αριθμό των υποκαναλιών. Ο πίνακας 4.7 απαριθμεί τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που επιτυγχάνονται στο WiMAX ανάλογα με το εκάστοτε σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται.

#### **4.10.7 Παραλλαγές διεπαφών φυσικού επιπέδου**

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX υποστηρίζει πέντε διαφορετικούς τύπους διεπαφών με τον κάθε ένα να χρησιμοποιεί διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, τεχνικές μετάδοσης και διαμόρφωσης σε συνθήκες οπτικής ή μη οπτικής επαφής. Οι τύποι διεπαφών που χρησιμοποιούνται συνοψίζονται στον πίνακα 4.8.

**Πίνακας 4.7** Ρυθμοί μετάδοσης φυσικού επιπέδου με διαφορετικό εύρος ζώνης καναλιού [1]

| Channel bandwidth        | 3.5MHz                     | 1.25MHz   | 5MHz           | 10MHz       | 8.75MHz <sup>a</sup> |       |        |       |        |              |
|--------------------------|----------------------------|-----------|----------------|-------------|----------------------|-------|--------|-------|--------|--------------|
| PHY mode                 | 256 OFDM                   | 128 OFDMA | 512 OFDMA      | 1,024 OFDMA | 1,024 OFDMA          |       |        |       |        |              |
| Oversampling             | 8/7                        | 28/25     | 28/25          | 28/25       | 28/25                |       |        |       |        |              |
| Modulation and Code Rate | PHY-Layer Data Rate (kbps) |           |                |             |                      |       |        |       |        |              |
|                          | DL                         | UL        | DL             | UL          | DL                   | UL    | DL     | UL    | DL     | UL           |
| BPSK, 1/2                | 946                        | 326       | Not applicable |             |                      |       |        |       |        |              |
| QPSK, 1/2                | 1,882                      | 653       | 504            | 154         | 2,520                | 653   | 5,040  | 1,344 | 4,464  | 1,120        |
| QPSK, 3/4                | 2,822                      | 979       | 756            | 230         | 3,780                | 979   | 7,560  | 2,016 | 6,696  | 1,680        |
| 16 QAM, 1/2              | 3,763                      | 1,306     | 1,008          | 307         | 5,040                | 1,306 | 10,080 | 2,688 | 8,928  | 2,240        |
| 16 QAM, 3/4              | 5,645                      | 1,958     | 1,512          | 461         | 7,560                | 1,958 | 15,120 | 4,032 | 13,392 | 3,360        |
| 64 QAM, 1/2              | 5,645                      | 1,958     | 1,512          | 461         | 7,560                | 1,958 | 15,120 | 4,032 | 13,392 | 3,360        |
| 64 QAM, 2/3              | 7,526                      | 2,611     | 2,016          | 614         | 10,080               | 2,611 | 20,160 | 5,376 | 17,856 | 4,480        |
| 64 QAM, 3/4              | 8,467                      | 2,938     | 2,268          | 691         | 11,340               | 2,938 | 22,680 | 6,048 | 20,088 | 5,040        |
| 64 QAM, 5/6              | 9,408                      | 3,264     | 2,520          | 768         | 12,600               | 3,264 | 25,200 | 6,720 | 22,320 | <b>5,600</b> |

**Πίνακας 4.8** Παραλλαγές διεπαφών φυσικού επιπέδου

| Τύπος Διεπαφής           | Ζώνη Συχνοτήτων                                                                          | Συνθήκη Μετάδοσης | Τύπος Διαμόρφωσης    | Τεχνική Μετάδοσης  |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| <b>WirelessMAN-SC</b>    | 10-66GHz                                                                                 | LOS               | Single Carrier (SC)  | FDD και TDD        |
| <b>WirelessMAN-SCa</b>   | 2-11GHz                                                                                  | NLOS              | Single Carrier (SC)  | FDD και TDD        |
| <b>WirelessMAN-OFDM</b>  | 2-11GHz                                                                                  | NLOS              | OFDM                 | FDD και TDD        |
| <b>WirelessMAN-OFDMA</b> | 2-11GHz                                                                                  | NLOS              | 2048 υπο-φορέων OFDM | FDD και TDD        |
| <b>WirelessHUMAN</b>     | Ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων κάτω των 11GHz<br>Αδειοδοτούμενη ζώνη συχνοτήτων κάτω των 11GHz | NLOS              | SC, OFDM, OFDMA      | TDD<br>FDD και TDD |

#### **4.11 Επίλογος**

Η WiMAX τεχνολογία σήμερα προσφέρει ένα εύρος προτύπων με από τα πιο πρόσφατα εξ' αυτών να είναι το IEEE 802.j-2009. Το πρότυπο αυτό προτάθηκε για την αύξηση του εύρους κάλυψης και του ρυθμού δεδομένων των mobile WiMAX δικτύων και βασίζεται στα multi-hop ασύρματα δίκτυα αναμετάδοσης. Επιπλέον το IEEE 802.16m πρότυπο αποτελεί τη βασική τεχνολογία της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του mobile WiMAX, στόχος του οποίου είναι η μακροπρόθεσμη εξέλιξη του WiMAX και η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης για τους εν κινήσει χρήστες 100 Mbps και για τους σταθερούς χρήστες της τεχνολογίας ρυθμούς μετάδοσης έως 1 Gbps. Η 2<sup>η</sup> έκδοση του mobile WiMAX αναμένεται να είναι διαθέσιμη στο χρονικό διάστημα 2011-2012.

#### 4.12 Βιβλιογραφία

- [1] Syed A., Mohammad I., (Sep. 2007), “WiMAX Applications”, CRC Press
- [2] <http://www.conniq.com/WiMAX/mimo-02.htm> (Τελευταία πρόσβαση 22/06/2010)
- [3] <http://www.conniq.com/WiMAX/aas.htm> (Τελευταία πρόσβαση 22/06/2010)
- [4] Loutfi N., (2007), “WiMAX-Technology for Broadband Wireless Access “, John Wiley & Sons, Ltd, ENST Bretagne , France
- [5] <http://csrc.nist.gov/publications/drafts/800-127/draft-sp800-127.pdf> (Τελ. πρόσβ. 22/06/2010)
- [6] V. Genc, S. Murphy, J. Murphy, “Performance Analysis of Transparent Relays in 802.16j MMR Networks”, UCD School of Computer Science and Informatics Dublin, Ireland
- [7] <http://3g4g.blogspot.com/2007/06/ofdm-and-ofdma-difference.html> (Τελ. πρόσβ. 22/06/2010)
- [9] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, (2007) “Fundamentals of WiMAX”, Prentice Hall, US
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX#WiMAX\\_Forum](http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX#WiMAX_Forum) (Τελευταία πρόσβαση 22/06/2010)

---

## Κεφάλαιο 5

# IPTV over WiMAX

---





## 5.1 Εισαγωγή

Με τις υπηρεσίες της IPTV τεχνολογίας να είναι διαθέσιμες στους συνδρομητές ανά πάσα στιγμή, ο επόμενος στόχος της IPTV τεχνολογίας είναι να τις καθιστήσει διαθέσιμες σε οποιοδήποτε σημείο βρίσκεται ο συνδρομητής [1] χωρίς απώλειες στην ποιότητα του ήχου και της εικόνας, μέσω οποιοδήποτε δικτύου και μέσω οποιασδήποτε φορητής συσκευής. Επιθυμία των συνδρομητών επίσης είναι η πρόσβαση μέσω αυτών των συσκευών και σε άλλες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων [2]. Σε αυτό το σημείο απαιτείται μια ασύρματη τεχνολογία η οποία θα υποστηρίζει το χαρακτηριστικό της κινητικότητας.

Οι περισσότερες υπηρεσίες τηλεόρασης διανέμονται έως και σήμερα κυρίως με τη χρήση επίγειων ή δορυφορικών τεχνολογιών. Αν και με τη χρήση των ασύρματων τεχνολογιών προστίθενται επιπλέον παράγοντες εξασθένησης αυτές ωστόσο δεν αποτελούν ουσιαστικό εμπόδιο για τη διανομή των IPTV υπηρεσιών σε φορητές συσκευές μικρής οθόνης, καθιστώντας το WiMAX μια εναλλακτική λύση ασύρματης πρόσβασης έναντι της DSL τεχνολογίας και των καλωδιακών υποδομών. Μετά την υιοθέτησή του WiMAX τον Οκτώβριο του 2007 από το IMT-2000 της ITU το οποίο αποτελεί το «χαρτοφυλάκιο» των 3G προτύπων, το WiMAX θεωρείται πλέον μία επιλογή για τη διανομή IPTV υπηρεσιών μέσω των 3G τεχνολογιών παρά μία εναλλακτική λύση. Επειδή το WiMAX αποτελεί μια τεχνολογία πρόσβασης βασισμένη στο IP είναι πολύ πιο αποτελεσματικό για υπηρεσίες που βασίζονται στο IP συγκριτικά με τις τρέχουσες 3G τεχνολογίες [3].

Η μετάδοση πολυεκπομπής του WiMAX σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, σε περιοχές μη οπτικής επαφής καθώς και η αποδοτικότητα της συμπίεσης επιτρέπει σε ένα σταθμό βάσης να αποστέλλει πακέτα βίντεο σε ένα υποσύνολο του συνόλου των σταθμών των συνδρομητών με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση εύρους ζώνης. Γενικά τα δίκτυα πυρήνα είναι packet-based ωστόσο τα δίκτυα πρόσβασης δεν είναι πάντα packet-based. Ένα WiMAX δίκτυο το οποίο είναι ένα εξολοκλήρου IP δίκτυο πρόσβασης προσφέρει διαφάνεια στα packet-based δίκτυα πυρήνα. Η real-time μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων απαιτεί μικρούς χρόνους καθυστέρησης κάτι το οποίο ικανοποιείται μέσω της rtPS υπηρεσίας των προσφερόμενων QoS μηχανισμών του MAC επιπέδου ενός WiMAX δικτύου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η άμεση αλλαγή των καναλιών που παρακολουθεί ο χρήστης. Στο φυσικό επίπεδο του WiMAX, η χρήση της OFDM και της OFDMA τεχνικής προσφέρει ανθεκτικότητα στην εξασθένηση των καναλιών που προκύπτει

εξαιτίας της πολυδιόδευσης (multipath fading channels). Η χρήση της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αλλά και της αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος και βελτιώνει την ποιότητα της μετάδοσης των υπηρεσιών βίντεο. Επιπλέον το φυσικό επίπεδο του WiMAX υποστηρίζει ποικίλα μεγέθη πλαισίων και κλιμακούμενο (scalable) εύρος ζώνης. Όλα τα παραπάνω καθιστούν το WiMAX μια ιδανική επιλογή για τη διανομή των IPTV εφαρμογών έναντι των καλωδιακών, του DSL και των δορυφορικών λύσεων [1].

## 5.2 Πλεονεκτήματα IPTV over WiMAX

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση των WiMAX δικτύων για τη διανομή των IPTV υπηρεσιών είναι τα εξής:

- **Κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών.** Όπως έχει προαναφερθεί η xDSL τεχνολογία και η καλωδιακή ευρυζωνική πρόσβαση δεν είναι εφικτή σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές είτε λόγω των φυσικών περιορισμών που τίθενται είτε λόγω του μικρού αριθμού των πιθανών χρηστών. Σε αυτή την περίπτωση η χρήση του WiMAX αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για τη διανομή των IPTV υπηρεσιών σε αυτούς τους χρήστες.
- **Μεγιστοποίηση του αριθμού των συνδρομητών.** Είναι προφανές ότι η επιτυχία των φορέων παροχής των IPTV υπηρεσιών αξιολογείται από τον όγκο των κερδών, γεγονός που εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των IPTV συνδρομητών. Συνεπώς το WiMAX προσφέροντας μεγαλύτερες περιοχές κάλυψης και μεγαλύτερο εύρος ζώνης συγκριτικά με άλλες ασύρματες τεχνολογίες μπορεί να φιλοξενήσει και μεγαλύτερο πλήθος συνδρομητών.
- **Επεκτασιμότητα και μικρότερο κόστος.** Η επέκταση της xDSL τεχνολογίας και το κόστος της καλωδίωσης δεν είναι τόσο προσιτή όσο των WMAN τεχνολογιών όπως είναι το WiMAX.
- **Σύγκλιση υπηρεσιών.** Οι φορείς παροχής υπηρεσιών αναζητούν νέες λύσεις για την παροχή triple play ή quadruple play υπηρεσιών, με το WiMAX να αποτελεί μια καλή εν δυνάμει λύση για την παροχή νέων υπηρεσιών όπως η mobile VoIP τηλεφωνία. Με τη λειτουργία της IPTV τεχνολογίας διαμέσου του WiMAX επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση του

κόστους καθώς διατίθενται περισσότερες υπηρεσίες κάτω από μια κοινή υποδομή.

- **Υποστήριξη μελλοντικών τάσεων.** Το WiMAX φαίνεται να κερδίζει έδαφος όσον αφορά την υποστήριξη κάποιων μελλοντικών τάσεων της IPTV τεχνολογίας όπως είναι η κινητικότητα και η διανομή HDTV περιεχομένου. Οι IPTV υπηρεσίες γίνονται πλέον ελκυστικές όχι μόνο για τους οικιακούς IPTV συνδρομητές αλλά και για τους εν κινήσει χρήστες χωρίς απώλειες στην ποιότητα του διανεμηθέν περιεχομένου [2].

### 5.3 Τεχνολογικές προκλήσεις

Οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η διανομή των IPTV υπηρεσιών μέσω του WiMAX έγκεινται στα εξής χαρακτηριστικά:

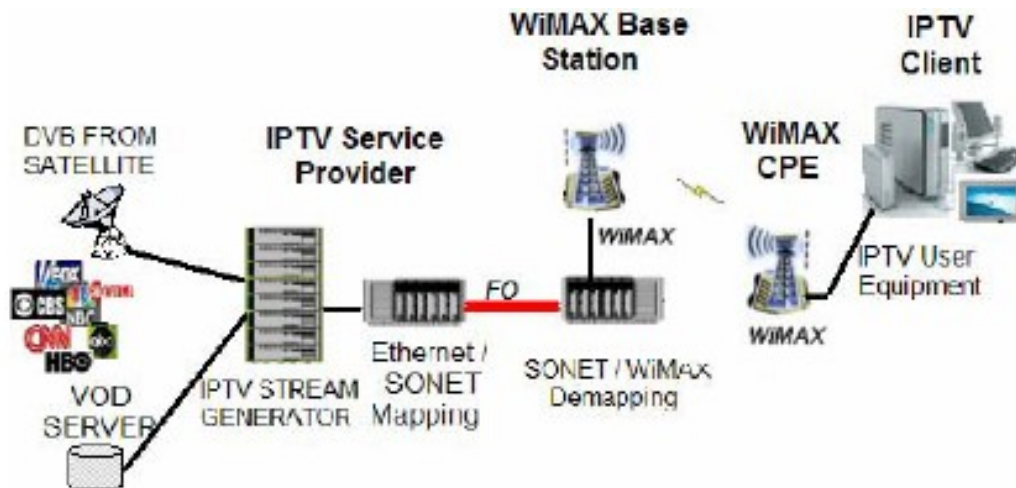
- **Jitter.** Ένα πρόβλημα που προκύπτει κατά το χειρισμό βίντεο από τα IP δίκτυα, αφορά τον τρόπο με τον οποίο το δίκτυο χειρίζεται τα δεδομένα. Το IP δίκτυο διασπά τα δεδομένα σε πακέτα τα οποία αποστέλλει έπειτα ξεχωριστά, με αυτά ανασυντίθενται στον τελικό προορισμό τους. Εντούτοις, λόγω αλλαγών στη δρομολόγηση, της συμφόρησης των δικτύων ή λόγω του συγχρονισμού, δε φθάνουν όλα τα πακέτα στο προορισμό τους με τον ίδιο ρυθμό ή ακόμη και στη σωστή σειρά. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση ενός buffer στον οποίο αποθηκεύονται τα πακέτα.
- **Overhead.** Σε ένα packet-based σύστημα κατά τη μεταφορά ενός πακέτου από επίπεδο σε επίπεδο αυξάνεται το overhead στο αρχικό πακέτο δηλαδή αυξάνεται το μέγεθος της κεφαλίδας του πακέτου με συνέπεια να μειώνεται η χωρητικότητα του ωφέλιμου φορτίου και επέρχεται αλλαγή στην ποιότητα του IPTV σήματος. Καθώς οι UDP, TCP και IP κεφαλίδες παραμένουν μέσα στο ωφέλιμο φορτίο και δεν μπορούν να προσεγγιστούν μέσα σε ένα σύστημα WiMAX, το επιπλέον overhead που δημιουργείται από το WiMAX μπορεί να μειωθεί με τη χρήση της PHS τεχνικής καθώς και με τη μέθοδο συμπίεσης της κεφαλίδας (Robust Header Compression - ROHC) [1]. Πιο συγκεκριμένα η PHS αφαιρεί τις περιττές πληροφορίες του ωφέλιμου φορτίου της κεφαλίδας στο MAC SDU. Η τεχνική αυτή οδηγεί σε μια

μικρότερη κεφαλίδα η οποία πρέπει να αποκατασταθεί πριν τη χρήση της από το δέκτη [4, 5].

- **Κατανάλωση ισχύος.** Δεδομένου ότι η προβολή ενός προγράμματος μπορεί να διαρκέσει μερικές ώρες, η κατανάλωση ισχύος είναι ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα στο σχεδιασμό ενός συστήματος WiMAX για την υποστήριξη των IPTV υπηρεσιών. Μία καλή λύση φαίνεται να είναι οι διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του WiMAX όπως η κατάσταση ύπνωσης και η κατάσταση ηρεμίας. Ένας άλλος τρόπος μείωσης της κατανάλωσης ισχύος είναι η χρήση δεκτών υψηλής ευαισθησίας. Δεδομένου ότι το επίπεδο ισχύος του πομπού και η ευαισθησία του δέκτη είναι αντιστρόφως ανάλογα, όσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του δέκτη τόσο χαμηλότερη ισχύς απαιτείται από τον πομπό γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών των φορητών συσκευών [1].
- **Χωρητικότητα συστήματος.** Η ανάγκη για την ικανοποίηση ολοένα και μεγαλύτερου πλήθους IPTV συνδρομητών φαίνεται να ικανοποιείται από το WiMAX μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών υψηλής απόδοσης από το σταθμός βάσης, κάθε μία από τις οποίες κατατέμνεται σε μικρότερους τομείς για ολοκληρωμένη κάλυψη 360° (sectorized antennas). Αυτός ο τύπος κεραιών είναι ένας ακόμη τρόπος για την αύξηση της ποιότητας των IPTV υπηρεσιών σε ακόμη μεγαλύτερες αποστάσεις για ένα μεγάλο πλήθος σταθερών και εν κινήσει συνδρομητών [6].

#### 5.4 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική

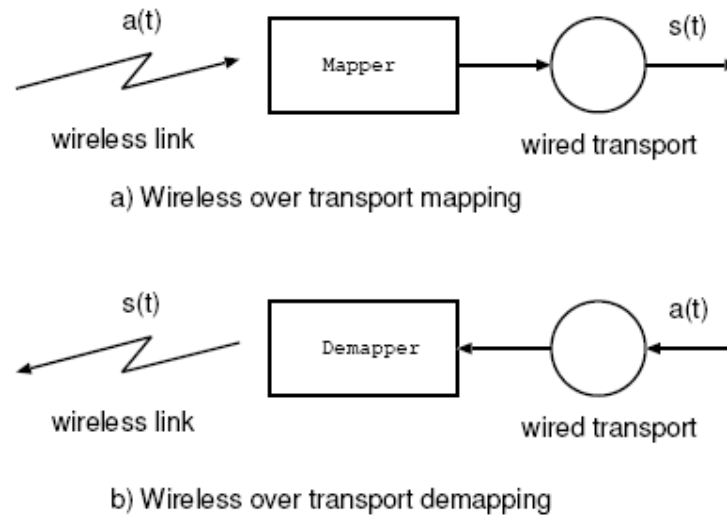
Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική για τη μετάδοση των IPTV υπηρεσιών μέσω του WiMAX, για ένα σταθερό συνδρομητή [6]. Εάν ο φορέας παροχής υπηρεσιών διαθέτει ένα σταθμό βάσης, μια IPTV ροή δεδομένων ενθυλακώνεται σε OFDM frames, διαφορετικά τα δεδομένα ανατίθενται σε μια ενδιάμεση σύνδεση μεταξύ του παρόχου και του σταθμού βάσης. Αυτή η ενδιάμεση σύνδεση μπορεί να είναι υλοποιηθεί με τη χρήση του SONET. Σε αυτό



Σχήμα 5.1 Αρχιτεκτονική διανομής IPTV υπηρεσιών για σταθερούς WiMAX συνδρομητές [6]

το σημείο είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των δεδομένων στον πάροχο καθώς και στο σταθμό βάσης μέσω των mapping και demapping διαδικασιών.

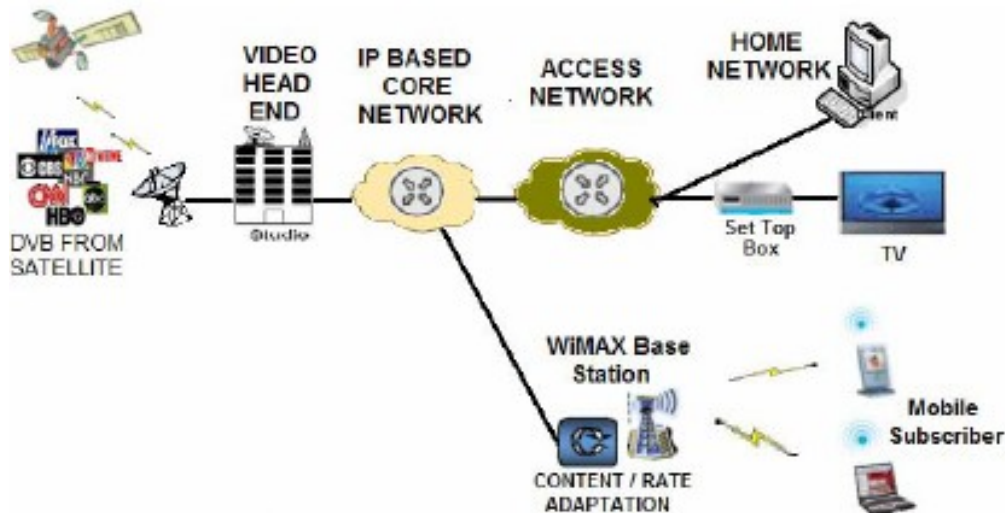
Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5.2 η mapping διαδικασία αναφέρεται στην ενθυλάκωση των πακέτων των δεδομένων που προέρχονται από την εναέρια σύνδεση στο Ethernet/SONET δίκτυο μεταφοράς και η demapping διαδικασία στην αφαίρεση αυτών των πληροφοριών ελέγχου από τα πακέτα των δεδομένων κατά τη μεταφορά τους από το Ethernet/SONET στην εναέρια σύνδεση [7]. Τα πακέτα των δεδομένων μπορεί να προέρχονται από διαφορετικές εφαρμογές και άρα να έχουν διαφορετική προτεραιότητα. Παραδείγματος χάριν τα πακέτα μιας ροής βίντεο έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα έναντι των πακέτων εφαρμογών του διαδικτύου. Επιπλέον οι συνθήκες που επικρατούν στο WiMAX κανάλι επηρεάζουν τη διαδικασία άφιξης αυτών στο Ethernet/SONET δίκτυο. Κατά τη mapping διαδικασία το εύρος ζώνης στο Ethernet/SONET δίκτυο προσαρμόζεται ανάλογα με την κίνηση που έρχεται από το ασύρματο δίκτυο. Η προτεινόμενη προσαρμογή του εύρους ζώνης βασίζεται στη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού και όχι στο ποσοστό του καναλιού που χρησιμοποιείται. Ακόμη και αν δεν υπάρχει κίνηση στην άνω ζεύξη, το εύρος ζώνης προσαρμόζεται ανάλογα με τη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού. Κατά τη demapping διαδικασία η ιδανική λύση θα ήταν να προσαρμοστεί το εύρος ζώνης στο ασύρματο κανάλι που δέχεται την κίνηση από το Ethernet/SONET δίκτυο μεταφοράς. Αυτό όμως δεν είναι εφικτό και κατά συνέπεια γίνεται προσαρμογή του εύρους ζώνης του



**Σχήμα 5.2** Mapping και demapping διαδικασία κατά τη μεταφορά πακέτων [7]

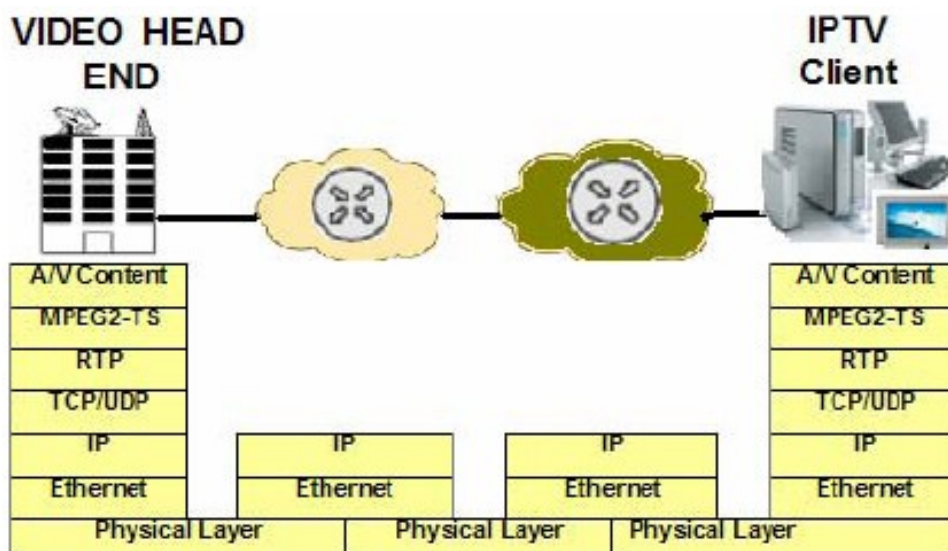
καναλιού της κάτω ζεύξης στο Ethernet/SONET δίκτυο. Η προσαρμογή του εύρους ζώνης σε αυτό το δίκτυο ωστόσο εισάγει κάποια καθυστέρηση, όπως επίσης προκαλεί την απώλεια κάποιων πακέτων. Η απώλεια των πακέτων στην κάτω ζεύξη αυτής της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη αυτής της άνω ζεύξης διότι η εξασθένηση του καναλιού (channel fading) συμβαίνει γρηγορότερα σε σχέση με την προσαρμογή του εύρους ζώνης [7]. Εν συνεχεία τα OFDM frames μεταφέρονται από το σταθμό βάσης στο σταθμό συνδρομητή μέσω της εναέριας σύνδεσης. Ο σταθμός συνδρομητή λαμβάνει αυτά τα frames και παράγει τις ροές βίντεο.

Στην περίπτωση των εν κινήσει IPTV συνδρομητών, το IPTV περιεχόμενο αποστέλλεται σε έναν προσαρμογέα περιεχομένου/ρυθμού (content/rate adapter) του σταθμού βάσης. Ο προσαρμογέας αυτός είναι αρμόδιος για τη διαμόρφωση του εύρους ζώνης της IPTV υπηρεσίας σύμφωνα με το διαθέσιμο WiMAX εύρος ζώνης, εκτελεί το decapsulation των IPTV ροών και ενθυλακώνει ξανά τις ροές αυτές. Δηλαδή η προσαρμογή γίνεται σε δύο βήματα, την προσαρμογή ρυθμού και την προσαρμογή περιεχομένου. Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε απεικονίζεται στο σχήμα 5.3 και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για την περίπτωση των εν κινήσει συνδρομητών όσο και στην περίπτωση των σταθερών συνδρομητών.



Σχήμα 5.3 Διανομή IPTV υπηρεσιών για σταθερούς και εν κινήσει WiMAX συνδρομητές [6]

Στο IPTV data center (ή video headend) οι πλέον κωδικοποιημένες και συμπιεσμένες MPEG ροές των real-time και VoD προγραμμάτων ενθυλακώνονται ως μηνύματα του RTP πρωτοκόλλου και μεταφέρονται ως UDP ή TCP μηνύματα (datagrams) στο IP επίπεδο. Για τις real-time υπηρεσίες βίντεο χρησιμοποιούνται UDP πόρτες, ενώ για τις VoD TCP πόρτες [1]. Κατόπιν τα IP πακέτα ενθυλακώνονται σε Ethernet frames και αποστέλλονται στο σταθμό βάσης μέσω του φυσικού επιπέδου όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.4. Ο σταθμός βάσης που αποτελεί μέρος του δικτύου πυρήνα [1] λαμβάνει αυτά τα δεδομένα

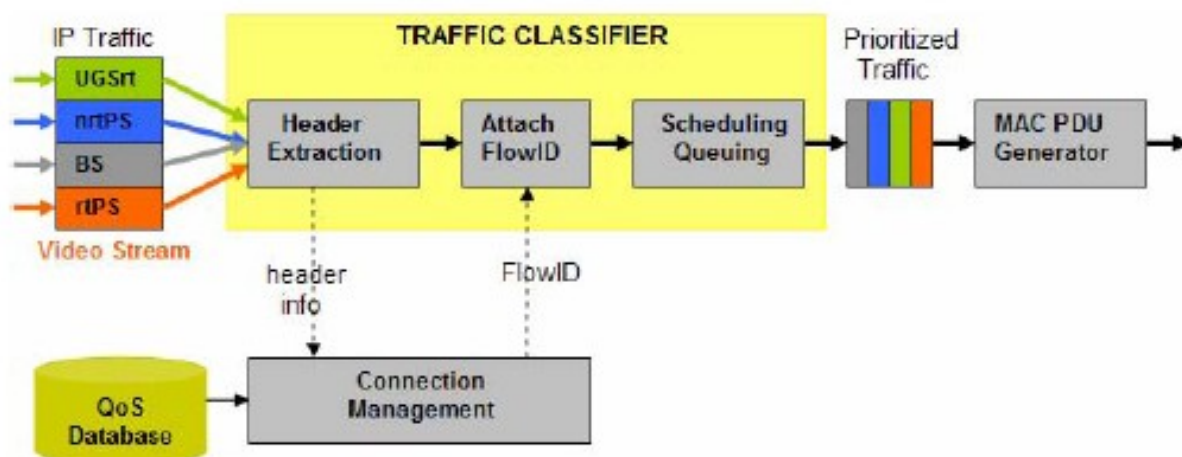


Σχήμα 5.4 Στοιβα πρωτοκόλλων για τη διανομή IPTV εφαρμογών [6]

αφαιρεί τις πληροφορίες που ενθυλακώθηκαν στα δεδομένα μέχρι το IP επίπεδο και ενθυλακώνει ξανά αυτά τα δεδομένα σε MAC και PHY PDUs.

Στο μοντέλο αυτό προτείνεται η χρήση ενός ταξινομητή κίνησης (traffic classifier) στο MAC επίπεδο (σχήμα 5.5). Ο σταθμός βάσης λαμβάνει την IP κίνηση της κάτω ζεύξης η οποία μπορεί να περιέχει δεδομένα διαφορετικών τύπων υπηρεσιών (δεδομένα διαδικτύου, φωνής, βίντεο, κ.λπ.). Ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας η κίνηση ανατίθεται σε μια διαφορετική QoS κλάση με μια ροή βίντεο να χρησιμοποιεί τη rtPS. Ο ταξινομητής κίνησης όπως υποδηλώνεται και από το όνομα του ταξινομεί την εισερχόμενη κίνηση ανάλογα με την προτεραιότητά της και τις QoS απαιτήσεις. Αρχικά αφαιρούνται οι πληροφορίες κεφαλίδας των IP πακέτων και αποστέλλονται σε μια μονάδα διαχείρισης της σύνδεσης (connection management unit). Βάσει αυτών των πληροφοριών κεφαλίδας η μονάδα αυτή ορίζει ένα μοναδικό FlowID για κάθε πακέτο. Το FlowID περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο υπηρεσίας και τον τύπο σύνδεσης κάθε πακέτου και αποθηκεύεται σε μια QoS βάση σύμφωνα με την QoS πολιτική του πρωτοκόλλου. Κατόπιν ο ταξινομητής κίνησης επισυνάπτει τα παραγόμενα FlowIDs στα IP πακέτα και το Scheduling/Queueing μπλοκ ταξινομεί την IP κίνηση καταλλήλως.

Στην περίπτωση αυτή η IPTV ροή ενός βίντεο είναι αυτή που πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας παράγονται τα WiMAX MAC PDUs και αποστέλλονται στο φυσικό επίπεδο του WiMAX δικτύου. Η ίδια διαδικασία υλοποιείται και αντιστρόφως για την επικοινωνία του σταθμού βάσης με το IPTV data center.



Σχήμα 5.5 QoS υποστήριξη MAC επιπέδου [6]

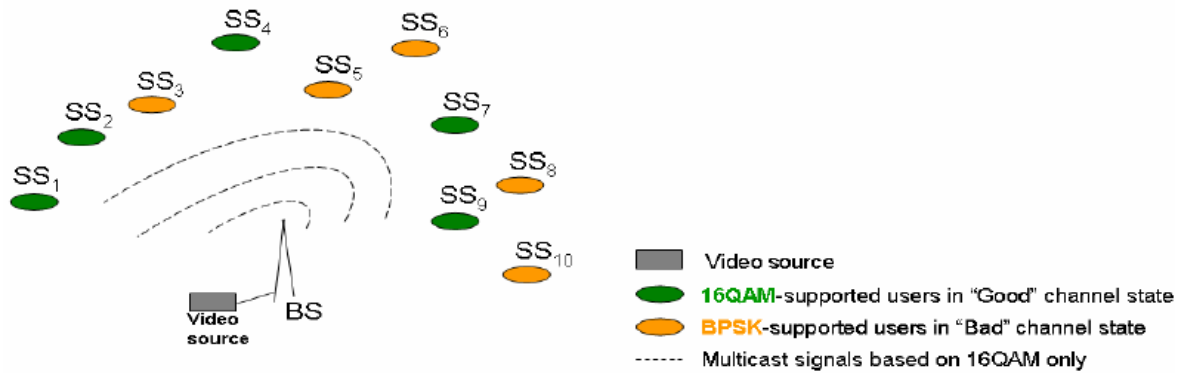


Στο φυσικό επίπεδο προτείνεται η χρήσης της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ως σύστημα υποκαναλοποίησης καθώς επίσης και αλγόριθμοι διαχείρισης ισχύος στον πομπό και στο δέκτη για τη βελτίωση της παροχής των IPTV υπηρεσιών στους χρήστες.

### **5.5 Multicast διανομή IPTV over WiMAX συστήματος**

Παρόλα τα φαινομενικά οφέλη της διανομής των IPTV υπηρεσιών μέσω του WiMAX προκύπτουν διάφορα προβλήματα με το πιο κοινό εξ' αυτών να είναι αυτό της συμφόρησης το οποίο προκαλείται λόγω της χωρητικότητας του σταθμού βάσης ο οποίος μπορεί να υποστηρίξει περιορισμένο αριθμό multicast καναλιών και συνεπώς περιορισμένο αριθμό ενεργών συνδρομητών. Προκειμένου η λειτουργία της IPTV τεχνολογίας μέσω του WiMAX να είναι επιτυχής το WiMAX σύστημα καλείται να αξιοποιήσει την ποικιλότητα εξασθένιση των καναλιών (fading channel diversity) κατά την πολυεκπομπή του βίντεο.

Στην περίπτωση ενός μόνο χρήστη για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων ή διαφορετικά την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, εφαρμόζεται η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση, διάφορες τεχνικές ελέγχου της ισχύος κ.λπ. Ο σταθμός βάσης του WiMAX είναι εκείνος που αποφασίζει το βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης ενός βίντεο καθώς και τη στρατηγική με την οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη ποιότητά του. Ωστόσο κατά την πολυεκπομπή ενός βίντεο από το σταθμό βάσης σε πολλούς σταθμούς συνδρομητών τα πακέτα λαμβάνονται με διαφορετικούς ρυθμούς λόγω του διαφορετικού SNR τους, το οποίο είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συνθηκών που επικρατούν στα κανάλια των SSs. Οι συνθήκες των καναλιών εξαρτώνται από την απόσταση των SSs από τον κοινό σταθμό βάσης και από την ποικιλότητα εξασθένιση τους κατά την πολυεκπομπή του βίντεο. Για παράδειγμα όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5.6 κατά την αποστολή από το σταθμό βάσης ενός σήματος πολυεκπομπής το οποίο χρησιμοποιεί το 16QAM σχήμα διαμόρφωσης, μόνο οι SSs των οποίων η συνθήκες των καναλιών τους είναι «καλές» μπορούν να αποκωδικοποιήσουν το ληφθέν σήμα. Αν όμως ο ρυθμός μετάδοσης του σήματος είναι μικρότερος, δηλαδή χρησιμοποιείται το BPSK σχήμα διαμόρφωσης δε γίνεται επαρκή εκμετάλλευση των πόρων των SSs των οποίων οι συνθήκες των καναλιών τους «καλές». Είναι λοιπόν καίριας σημασίας η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του



Σχήμα 5.6 Multicast μετάδοση βίντεο σε υπό την ποικιλότητα εξασθένηση των καναλιών [2]

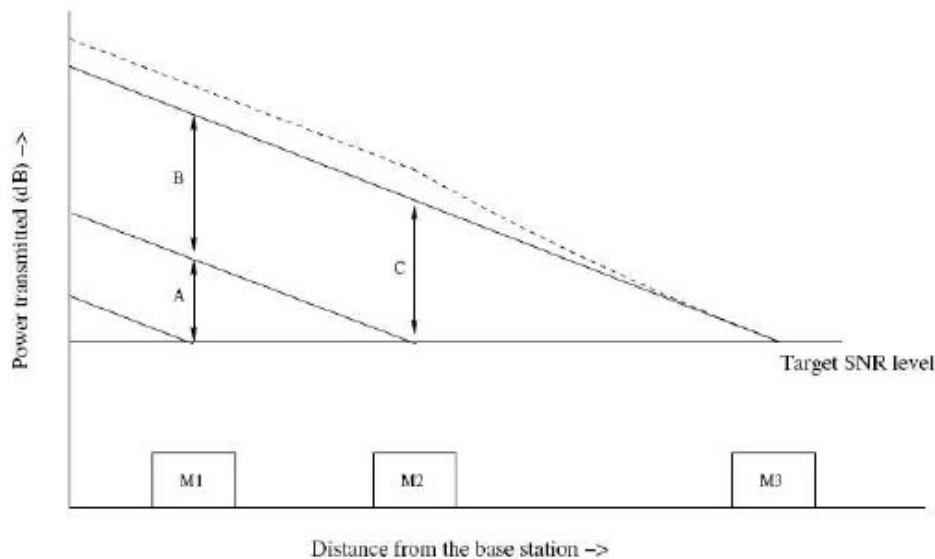
εύρους ζώνης κατά τη διανομή του IPTV περιεχομένου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εκμετάλλευση της ποικιλότητας εξασθένησης των καναλιών.

### 5.5.1 Superposition Coded Multicasting τεχνική δύο επιπέδων

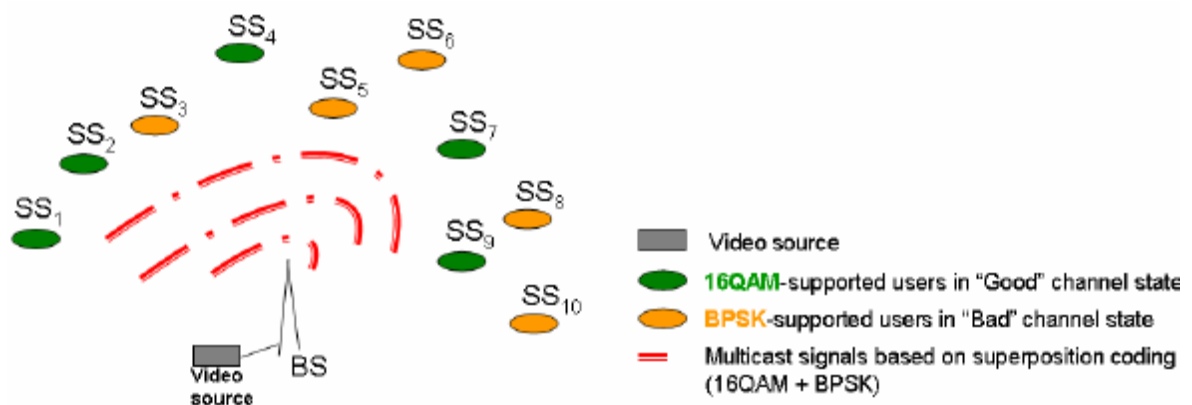
Μια πιθανή λύση στο προαναφερθέν πρόβλημα είναι η εφαρμογή της SPCM τεχνικής δύο επιπέδων (2-level Superposition Coded Multicasting) η οποία με τη superposition κωδικοποίηση στο φυσικό επίπεδο του WiMAX διαμορφώνει κατάλληλα το multicast σήμα. Η superposition κωδικοποίηση χρησιμοποιείται γενικότερα για την αύξηση της ολικής χωρητικότητας του χρήστη σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών μέσω της εκμετάλλευσης της χωρικής ή χρονικής ανομοιομορφίας της ισχύος των κοινών broadcasted σημάτων μεταξύ των χρηστών [8, 9, 10].

Από το σχήμα 5.7 συμπεραίνεται πως ότι το SNR του M1 χρήστη είναι αρκετό έτσι ώστε ο M1 να αποκωδικοποιήσει τα μηνύματα που προορίζονται και για τους δύο υπόλοιπους χρήστες μαζί, καθώς και ότι το SNR του M2 είναι τέτοιου μεγέθους ώστε να μπορεί ο M2 να αποκωδικοποιήσει τα μηνύματα που προορίζονται για το χρήστη M3.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και αξιοποιώντας τη superposition κωδικοποίηση, προτείνεται ένα σχήμα πολυεκπομπής το οποίο βασίζεται στη superposition κωδικοποίηση δύο επιπέδων (2-level Superposition Coded Multicast - SPCM). Σύμφωνα με το σχήμα 5.8 το προς πολυεκπομπή σήμα δημιουργείται



**Σχήμα 5.7** Διαφορά ισχύος μεταξύ των χρηστών ενός ασύρματου συστήματος [10]

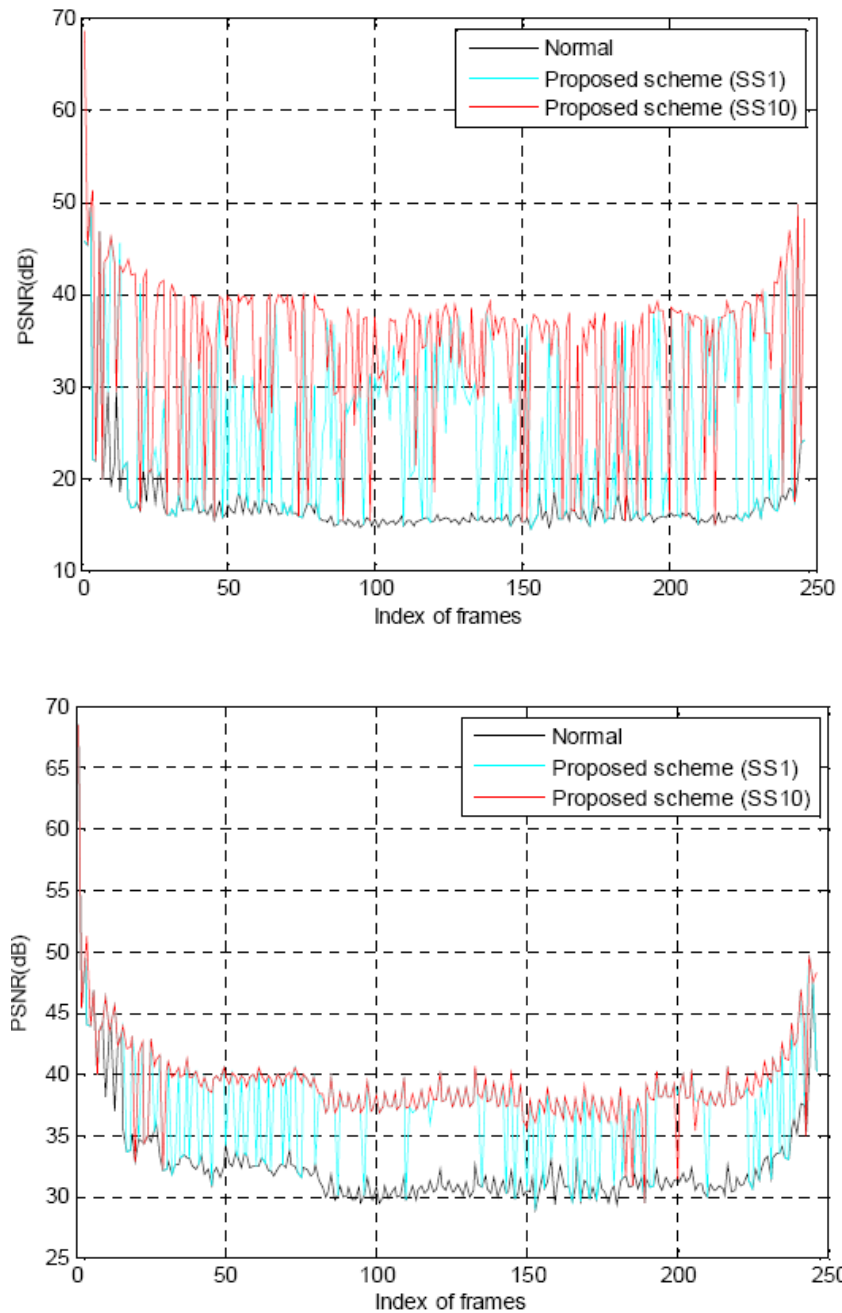


**Σχήμα 5.8** Προτεινόμενο σχήμα multicast μετάδοσης δύο επιπέδων με τη χρήση superposition κωδικοποίησης [2]

ώστε να περιέχει κάποια δεδομένα διαμορφωμένα από το BPSK σχήμα και κάποια δεδομένα διαμορφωμένα από το 16QAM σχήμα, θεωρώντας ότι όλοι οι SSs μπορούν να υιοθετήσουν το BPSK σχήμα όταν οι συνθήκες των καναλιών τους δεν είναι καλές. Τα δεδομένα κάθε frame κατηγοριοποιούνται σε δεδομένα βασικής και υψηλής ποιότητας. Έτσι για τη διασφάλιση της ποιότητας ενός βίντεο τα δεδομένα που καθορίζουν τη βασική ποιότητα κάθε frame διαμορφώνονται από το BPSK σχήμα για παράδειγμα ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα με τη χρήση του 16QAM σχήματος καθορίζουν την υψηλότερη ποιότητα. Με βάση αυτό το σχήμα κάθε SS μπορεί να αποκωδικοποιήσει τουλάχιστον τα BPSK σήματα λαμβάνοντας

έτσι τη βασική ποιότητα όταν επικρατούν «κακές» συνθήκες στο κανάλι ή μπορεί να λάβει τη μέγιστη ποιότητα αποκωδικοποιώντας τόσο τα BPSK όσο και τα 16QAM σήματα όταν οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι είναι «καλές». Το συγκεκριμένο παράδειγμα για λόγους απλότητας χρησιμοποιεί δύο τύπους διαμόρφωσης ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση οποιουδήποτε αριθμού σχημάτων διαμόρφωσης. Ο τύπος διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν οι SSs επιλέγεται από το σταθμό βάσης βάσει των πληροφοριών (feedbacks) που του αποστέλλουν οι SSs.

Θεωρούμε πως εξαιτίας της εξασθένησης των δεδομένων κατά την αποστολή τους οι συνθήκες των frames αλλάζουν από το ένα frame στο επόμενο, καθώς επίσης και ότι οι συνθήκες του καναλιού κάθε SS δε μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης κάθε frame. Στο σχήμα 5.9α και 5.9β φαίνονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε σε κάθε frame, μεταξύ του προτεινόμενου σχήματος και του παραδοσιακού σχήματος μετάδοσης μετρώντας την ποιότητα του βίντεο του SS1 και του SS10 η οποίοι διαθέτουν το χαμηλότερο και το υψηλότερο SNR αντίστοιχα. Η μέτρηση της ποιότητας του βίντεο εκτιμάται βάσει του PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) δείκτη. Κατά την προσομοίωση, το ποσοστό δεδομένων βασικής ποιότητας σε κάθε frame είναι 40% στο διάγραμμα του σχήματος 5.9(α) και 80% στο διάγραμμα του σχήματος 5.9(β). Το παραδοσιακό σχήμα μετάδοσης χρησιμοποιεί είτε μόνο το BPSK σχήμα διαμόρφωσης είτε μόνο το 16QAM σχήμα διαμόρφωσης, ανάλογα ποιο σχήμα διαμόρφωσης μπορούν να υποστηρίξουν όλοι οι SSs μαζί [2]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα έχει υψηλότερο PSNR (δηλαδή καλύτερη ποιότητα βίντεο) από το παραδοσιακό σχήμα μετάδοσης τόσο για το SS1 όσο και για το SS10 και επιπλέον ότι το PSNR των SS1 και SS10 είναι μεγαλύτερο όταν το ποσοστό των δεδομένων βασικής ποιότητας μέσα στο frame είναι μικρότερο.



**Σχήμα 5.9 (α), (β)** Σύγκριση του PSNR μεταξύ του παραδοσιακού σχήματος μετάδοσης και του προτεινόμενου 2-level SPCM σχήματος για το SS1 και το SS10 αντίστοιχα [2]

### 5.6 Βέλτιστη κατανομή ρυθμού μετάδοσης για την εξελικτική multicast διανομή βίντεο μέσω του WiMAX

Σε ένα WiMAX δίκτυο ο σταθμός βάσης είναι αρμόδιος για την κατανομή του εύρους ζώνης, για την εγγύηση της ποιότητας των υπηρεσιών αλλά και της δίκαιης πρόσβασης των χρηστών στους πόρους του δικτύου (fairness). Επίσης η

προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση είναι μία αποτελεσματική τεχνική για τη βελτίωση της μέσης ρυθμοαπόδοσης ή για τη μείωση της κατανάλωσης των πόρων.

Σε προγενέστερη μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί έχει προταθεί η χρήση ενός MP-AMC αλγόριθμου, ο οποίος ρυθμίζει τον αριθμό χρονοθυρίδων και το σχήμα διαμόρφωσης κάθε επιπέδου ενός scalable βίντεο. Η μελέτη αυτή θεωρεί ότι χρησιμοποιούνται όλες οι χρονοθυρίδες κατά την πολυεκπομπή χωρίς την εξέταση της πιθανότητας κάποιων ανεπαρκών χρονοθυρίδων. Επίσης η μελέτη αυτή γίνεται πιο πολύπλοκη καθώς τίθενται περισσότεροι περιορισμοί όπως η επιλογή του χαμηλότερου ρυθμού κωδικοποίησης για το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στο χαμηλότερο επίπεδο ποιότητας [11].

Η προτεινόμενη μέθοδος αναφέρεται στη χρήση της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και ενός σχήματος ανάθεσης των συμβόλων για την πολυεκπομπή ενός βίντεο. Για την επίτευξη της προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης κατά την πολυεκπομπή (rate-adaptive multicast), χρησιμοποιείται η προσαρμοστική διαμόρφωση σε συνδυασμό με τη layered multicast τεχνική η οποία βασίζεται στην τεχνική την εξελικτικής κωδικοποίησης βίντεο (SVC). Συγκεκριμένα το σχήμα διαμόρφωσης αλλάζει ανάλογα με το μέγεθος κάθε επιπέδου του video και τον αριθμό των διαθέσιμων συμβόλων σε κάθε GoF κάθε επιπέδου. Κατόπιν της εύρεσης του βέλτιστου σχήματος διαμόρφωσης προτείνεται επίσης ένας γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

### **5.6.1 Προτεινόμενο σχήμα βέλτιστης κατανομής του ρυθμού μετάδοσης**

Όπως έχουμε προαναφέρει στα wirelessMAN-OFDMA συστήματα, μια θυρίδα (slot) ορίζεται ως η ελάχιστη μονάδα κατανομής δεδομένων. Ο καθορισμός μιας OFDMA θυρίδας εξαρτάται από τη δομή των OFDMA συμβόλων. Ο τύπος της δομής του OFDMA συμβόλου που χρησιμοποιείται στην προτεινόμενη υλοποίηση είναι η μερική χρήση των υποκαναλιών στην κάτω ζεύξη (PUSC). Συνεπώς οι σχέσεις μεταξύ των θυρίδων, των υποκαναλιών και των συμβόλων μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

$$\text{Symbol} = \text{Slot} \times \text{Subchannel} \times 2$$

Στην προτεινόμενη υλοποίηση θεωρούμε ότι η ισχύς διάδοσης των καναλιών (channel propagation power) μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταξύ του σταθμού βάσης και του SS, για την αναπαράσταση των συνθηκών του καναλιού κάθε SS χρησιμοποιείται το Two-Ray Ground Reflection μοντέλο διάδοσης [12] το οποίο διατυπώνεται ως εξής:

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \frac{h_t^2 \times h_r^2}{d^4}$$

Όπου οι μεταβλητές  $P_t$  και  $P_r$  αντιπροσωπεύουν την ισχύ του πομπού και του δέκτη αντιστοίχως και οι  $G_t$ ,  $G_r$  δείχνουν το κέρδος των κεραιών αποστολής και λήψης σημάτων. Οι μεταβλητές  $h_t$  και  $h_r$  αναφέρονται στο ύψος του πομπού και του δέκτη, ενώ η  $d$  αναφέρεται στην απόσταση σε μέτρα μεταξύ της κεραίας του πομπού και του δέκτη. Με τη χρήση της 2<sup>ης</sup> έκδοσης του JSVM λογισμικού του H.264 προτύπου συμπίεσης βίντεο, παράγονται  $L+1$  επίπεδα βίντεο τα οποία περιλαμβάνουν ένα βασικό επίπεδο και  $L$  προηγμένα επίπεδα σύμφωνα με την κλιμακωσιμότητα του SNR του SVC προτύπου συμπίεσης βίντεο. Ένας δέκτης μπορεί να λαμβάνει ένα ή περισσότερα από τα προηγμένα επίπεδα ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι του. Για τη διατήρηση της βασικής ποιότητας του βίντεο για όλους τους δέκτες, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι δέκτες μπορούν να λάβουν τουλάχιστον το βασικό επίπεδο ποιότητας. Επομένως, το σχήμα διαμόρφωσης που θα επιλεγεί για το βασικό επίπεδο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ισχυρό για την ικανοποίηση όλων των μελών της multicast ομάδας. Με άλλα λόγια, το σχήμα διαμόρφωσης που επιλέγεται δεν είναι απαραίτητα το QPSK αλλά αυτό με το χαμηλότερο SNR σε ολόκληρη τη multicast ομάδα.

### 5.6.2 Επιλογή συνδυασμών των σχημάτων διαμόρφωσης

Ένας σταθμός βάσης «σκανάρει» την κάτω ζεύξη ενός καναλιού και συλλέγει στατιστικά στοιχεία για τους SSs. Με βάση αυτά τα στοιχεία καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό πλήθος σχημάτων διαμόρφωσης για κάθε SS σύμφωνα με το SNR του τελευταίου το οποίο λαμβάνεται από τη ranging διαδικασία.

Για τη βεβαίωση ότι κάθε δέκτης θα λάβει όλα τα δεδομένα του βασικού επιπέδου επιλέγεται η ομάδα των SSs που υποστηρίζει το μικρότερο σχήμα διαμόρφωσης (όπως φαίνεται και από τον πίνακα 5.1 είναι η ομάδα των 6 SSs η οποία

υποστηρίζει το QPSK σχήμα διαμόρφωσης). Συνεπώς η PER (Packet Error Rate) τιμή του δέκτη πρέπει να είναι 0. Γενικά ο αριθμός των διαθέσιμων συμβόλων πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων του βασικού επιπέδου έτσι ώστε το βασικό επίπεδο να λαμβάνεται ολοκληρωτικά. Μετά την κατανομή των διαθέσιμων συμβόλων στα δεδομένα του βασικού επιπέδου (Base Layer - BL), τα σύμβολα που απομένουν κατανέμονται στα προηγμένα επίπεδα (Enhancement Layers - ELs) σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά EL1, EL2..., EL(i). Ο απαιτούμενος αριθμός συμβόλων για κάθε EL, καθορίζεται από το μέγεθος του επιπέδου, το σχήμα διαμόρφωσης του επιπέδου, και τον αριθμό των διαθέσιμων συμβόλων. Επιπλέον ο απαιτούμενος αριθμός συμβόλων για κάθε EL, επηρεάζεται επίσης από τα χαρακτηριστικά των χαμηλότερων επιπέδων και τον αριθμό των συμβόλων που απομένουν μετά τη μετάδοση των χαμηλότερων επιπέδων. Το μέγεθος του κάθε επιπέδου, ο αριθμός των συμβόλων σε αυτό και το σχήμα διαμόρφωσης πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης αποτελεσματικά για κάθε περίοδο ενός GOP.

Για τη μέτρηση της απόδοσης του συνδυασμού σχημάτων διαμόρφωσης στα επίπεδα ( $Mod_{BL}$ ,  $Mod_{EL1}$ , ...,  $Mod_{EL(L)}$ ) χρησιμοποιείται το PSNR για τη μέτρηση της αλλοίωσης της ποιότητας. Επιπλέον όπως συμβαίνει συνήθως θα πρέπει να ισχύει η σχέση  $Mod_{BL} \leq Mod_{EL1} \leq \dots \leq Mod_{EL(L)}$ , δηλαδή το σχήμα διαμόρφωσης των υψηλότερων επιπέδων ποιότητας να είναι ισχυρότερο από αυτά των χαμηλότερων επιπέδων. Κατόπιν του υπολογισμού του αριθμού των συμβόλων κάθε επιπέδου, το μέγεθος αυτών μετατρέπεται στο ρυθμό μετάδοσης κάθε επιπέδου. Ο ρυθμός λήψης των δεδομένων του χρήστη υπολογίζεται βάσει του ρυθμού λήψης και της PER τιμής που ισχύει για κάθε επίπεδο. Η PER για κάθε επίπεδο μπορεί να είναι είτε 0 είτε 1. Για τον υπολογισμό της, εάν το SNR του δέκτη είναι μεγαλύτερο ή ίσο του SNR του EL επιπέδου (το οποίο SNR εξαρτάται από τη διαμόρφωση του EL), τότε η PER ενός EL επιπέδου για το δέκτη είναι 0, διαφορετικά παίρνει την τιμή 1. Η μέτρηση του PSNR για κάθε χρήστη εξαρτάται από τη σχέση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων και της αλλοίωσης της εικόνας για το συγκεκριμένο χρήστη.

Η βέλτιστη λύση προκύπτει από την εύρεση του ιδανικού συνδυασμού σχημάτων διαμόρφωσης ο οποίος θα ελαχιστοποιεί την αλλοίωση κάθε GoF. Χρησιμοποιώντας αυτό το προτεινόμενο σχήμα μπορούμε να λάβουμε το βέλτιστο



συνδυασμό των σχημάτων διαμόρφωσης, πάντα σύμφωνα με το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης, το μέγεθος κάθε επιπέδου ενός GoF και τον αριθμό των διαθέσιμων συμβόλων. Το τελικό κριτήριο για την απόδοση του προτεινόμενου σχήματος της βέλτιστης κατανομής του ρυθμού μετάδοσης είναι η μέση τιμή του PSNR όλων των χρηστών μιας multicast ομάδας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διαφορετική προτεραιότητα των χρηστών, πρέπει να δίνεται έμφαση στους χρήστες με υψηλότερη προτεραιότητα στην επιλογή της διαμόρφωσης.

### 5.6.3 Χρήση Γενετικού Αλγορίθμου για τη μείωση της πολυπλοκότητας

Η προσπάθεια εύρεσης του βέλτιστου συνδυασμού σχημάτων διαμόρφωσης ο οποίος θα ελαχιστοποιεί την αλλοίωση ενός GoF, επιφέρει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος προτείνεται η χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου ο οποίος θα διατηρεί την ακρίβεια αυτής της αναζήτησης. Με βάση αυτόν το γενετικό αλγόριθμο ορίζεται ένα «χρωμόσωμα» το οποίο αντιπροσωπεύει έναν συνδυασμό σχημάτων διαμόρφωσης, και περιέχει  $L + 1$  «γονίδια» για κάθε ένα σχήμα διαμόρφωσης (ModBL, ModEL1, ..., ModEL(L)). Κάποια από αυτά τα «χρωμοσώματα» τα οποία μπορεί να μην είναι ικανά να υπακούουν στους περιορισμούς της προτεραιότητας των χρηστών καλούνται παράνομα χρωμοσώματα και πρέπει να διορθωθούν. Λόγω αυτών των παράνομων «χρωμοσωμάτων» πρέπει η θέση των «γονιδίων» να επαναπροσδιορίζεται έτσι ώστε να ισχύει η  $Mod_{BL} \leq Mod_{EL1} \leq \dots \leq Mod_{EL(L)}$  σχέση. Ο γενετικός αυτός αλγόριθμος κάνει χρήση ενός Roulette wheel αλγορίθμου επιλογής. Σύμφωνα με αυτόν τα «γονίδια» που είναι καταλληλότερα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες «επιβίωσης» έναντι των άλλων. Επιπλέον χρησιμοποιείται η one-cut-point μέθοδος διασταύρωσης [13] για την παραγωγή των «απογόνων». Βάσει ενός ποσοστού αλλαγής, μία μερίδα των «γονιδίων» αλλάζει. Για τη διαβεβαίωση ότι το καταλληλότερο «χρωμόσωμα» δε θα χαθεί, γίνεται αντιγραφή του «χρωμοσώματος» που θεωρείται καταλληλότερο στην επόμενη «γενιά». Όταν η εξέλιξη ολοκληρώνεται, το «χρωμόσωμα» με την μεγαλύτερη καταλληλότητα μεταξύ όλων των «γενεών» θεωρείται ότι είναι η αμέσως προηγούμενη καταλληλότερη λύση από τη βέλτιστη λύση που προτείνεται

για την εύρεση του καταλληλότερου συνδυασμού σχημάτων διαμόρφωσης με την ελάχιστη αλλοίωση σε ένα GoF.

### **5.7 Cross-layer σχεδιασμός για την ανθεκτική διανομή IPTV υπηρεσιών μέσω WiMAX**

Οι δέκτες μιας ασύρματης multicast διανομής έχουν διαφορετικό SNR με αποτέλεσμα την υποστήριξη διαφορετικών ταχυτήτων ταυτοχρόνως. Αυτό το πρόβλημα της ποικιλομορφίας των καναλιών μεταξύ των μελών της multicast ομάδας αποτελεί πρόκληση για την επιλογή μιας αποτελεσματικής μεθόδου για τη multicast διανομή βίντεο ροών από το σταθμό βάσης.

Η προσέγγιση της επαναμετάδοσης στην περίπτωση απώλειας πακέτων δεν είναι αποτελεσματική για μια multicast διανομή, επειδή η απώλεια των πακέτων ποικίλει από χρήστη σε χρήστη και ωφελεί μόνο ένα υποσύνολο των μελών της multicast ομάδας.

Στην παρούσα παράγραφο προτείνεται ένα διεπίπεδο σχήμα (cross-layer design framework) πολυεκπομπής το οποίο ενσωματώνει την MDC (Multiple Description Coding) κωδικοποίηση εξάλειψης (erasure coding<sup>1</sup>) στο επίπεδο εφαρμογών των κλιμακούμενων ροών βίντεο (scalable video streams), σε συνδυασμό με την SPCM τεχνική στο MAC και στο φυσικό επίπεδο. Το προτεινόμενο σχήμα αντιμετωπίζει την ποικιλομορφία των καναλιών (channel diversity) μεταξύ των χρηστών μετριάζοντας την αρνητική επίδραση της βραχυπρόθεσμης διακύμανσης των καναλιών (short-term channel fluctuation) ώστε να είναι βέλτιστη η multicast διανομή ενός βίντεο.

#### **5.7.1 Προγενέστερες μελέτες**

Πολλές μελέτες πάνω στο cross-layer σχεδιασμό αναφέρονται στη βελτίωση της ποιότητας κατά τη unicast μετάδοση ενός βίντεο και στη βελτίωση της απόδοσης ως προς τη καθυστέρηση με τη ρύθμιση παραμέτρων στα διάφορα επίπεδα του δικτύου. Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν τα όρια καθυστέρησης των frames

<sup>[1]</sup>Η erasure κωδικοποίηση είναι μία μέθοδος εξάλειψης σφαλμάτων κατά την οποία ένα μήνυμα  $k$  συμβόλων μετασχηματίζεται σε ένα μεγαλύτερο μήνυμα  $n$  συμβόλων, έτσι ώστε το αρχικό μήνυμα να μπορεί να ανακτηθεί από ένα υποσύνολο των  $n$  αυτών συμβόλων.

ενός βίντεο στο επίπεδο εφαρμογών, τον αριθμό και την προτεραιότητα των ARQ προσπαθειών αναμετάδοσης στο MAC επίπεδο, τον αριθμό των OFDM υποφερόντων που ορίζονται στο φυσικό επίπεδο, κ.λπ. [104-19]. Μία τέτοια cross-layer προσέγγιση μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη ή κλιμακώσιμη για μία multicast διανομή ώστε τελικά να εξοικονομεί εύρος ζώνης και να υποστηρίζει περισσότερα IPTV κανάλια.

Όμοια με το στόχο της SPCM τεχνικής δύο επιπέδων, η cross-layer προσέγγιση χρησιμοποιεί τεχνικές προσαρμοστικής κατανομής της ισχύος και κωδικοποίησης καναλιού ενός CDMA συστήματος το οποίο χαρακτηρίζεται από παρεμβολές και περιορισμένο εύρος ζώνης, σε συνδυασμό με ένα multiresolution σχήμα διαμόρφωσης για την ταυτόχρονη διανομή μιας βασικής ποιότητας στους δέκτες οι οποίοι δεν διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιών και τη μεγιστοποίηση της ποιότητας στους δέκτες οι οποίοι διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιών.

Αν και οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις είναι αποτελεσματικές στην περίπτωση της ποικιλομορφίας των καναλιών μεταξύ των χρηστών, αποτυγχάνουν να διατηρήσουν/προστατέψουν την ποιότητα της Σχήμας των ροών. Συγκεκριμένα η εφαρμογή SPCM τεχνικής ή της multiresolution διαμόρφωσης ξεχωριστά δεν διευθυνσιοδοτεί ζητήματα απώλειας δεδομένων διαμόρφωσης επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του βίντεο, ειδικά αυτών στα υψηλότερα επίπεδα εξαιτίας της βραχυπρόθεσμης διακύμανσης των καναλιών η οποία συνηθίζεται στα ασύρματα συστήματα.

Για τη διατήρηση της ποιότητας ενός βίντεο σε συνθήκες διακύμανσης του καναλιού υιοθετείται στο επίπεδο εφαρμογών η MDC (Multiple Description Coding) τεχνική ή στο επίπεδο μεταφοράς η Digital Fountain τεχνική κωδικοποίησης (erasure coding). Η Digital Fountain τεχνική βασίζεται στην κωδικοποίηση  $k$  πακέτων δεδομένων σε  $n$  πακέτα, ώστε να ισχύει η σχέση  $n = k + h$  και  $h > 0$  με το  $h$  φανερώνει τον αριθμό των επιπλέον πακέτων so that the original packets can be recovered from any  $k$  received encoded packets in a computationally efficient manner [20]. Για την υλοποίηση της Digital Fountain τεχνικής έχει προταθεί η χρήση ενός διεπίπεδου σχήματος (cross-layer scheme) το οποίο συνδυάζει τη Digital Fountain κωδικοποίηση με μια multicast πολιτική που ακολουθείται στο MAC επίπεδο η οποία βασίζεται στην ύπαρξη μιας κατώτατης  $T$  τιμής. Βάσει της Digital Fountain ένα επιπλέον πακέτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς δέκτες για την ανάκτηση των απολεσθέντων πακέτων. Ωστόσο

αυτό το πακέτο μπορεί να ληφθεί από μερικούς μόνο από το  $T$  πλήθος δεκτών [21].

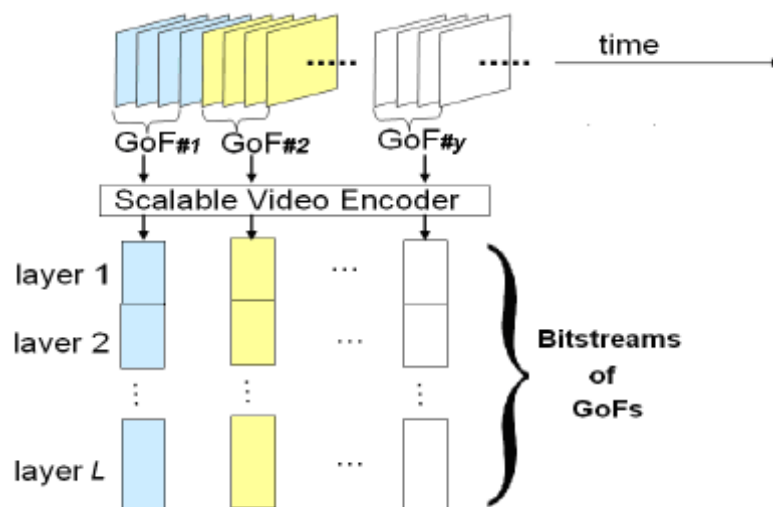
Η MDC τεχνική χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση ενός συνόλου ροών βίντεο δεδομένων σε  $N$  πακέτα, τα οποία μεταδίδονται κατόπιν στο δέκτη με τη χρήση της χωρικής ή χρονικής ποικιλομορφίας (spatial or temporal diversity). Γενικά όσα περισσότερα  $N$  πακέτα λαμβάνει ο δέκτης τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα ενός βίντεο. Η ιδέα αυτή επεκτάθηκε στην layered MDC τεχνική κατά την οποία descriptions του βασικού επιπέδου ποιότητας μεταδίδονται σε χρήστες χαμηλού εύρους ζώνης, ενώ τα descriptions τόσο του βασικού όσο και των προηγμένων επιπέδων μπορούν να διανεμηθούν σε χρήστες υψηλού εύρους ζώνης.

Η αρχική μορφή της MDC τεχνικής σχεδιάστηκε αρχικά για ενσύρματες υποδομές της οποίας τα κωδικοποιημένα MDC πακέτα των ροών βίντεο των διαφόρων επιπέδων ποιότητας είτε χάνονται εντελώς είτε λαμβάνονται επιτυχώς καθώς επίσης δε γίνεται αναφορά σε σχήματα διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης του φυσικού επιπέδου. Στην cross-layer προσέγγιση που προτείνουμε για τη multicast διανομή ενός βίντεο, εξετάζεται μια τροποποιημένη εκδοχή της layered MDC τεχνικής στο επίπεδο εφαρμογών, σε συνδυασμό με τη SPCM τεχνική και τη multiresolution διαμόρφωση/ αποδιαμόρφωση στο MAC και στο φυσικό επίπεδο. Η τροποποιημένη layered MDC τεχνική δίνει τη δυνατότητα μερικής λήψης ενός MDC πακέτου. Η μερική λήψη των πακέτων από ένα δέκτη ο οποίος δε διαθέτει «καλές» συνθήκες καναλιού είναι συνήθης στις ασύρματες επικοινωνίες όταν εφαρμόζεται η SPCM τεχνική ή η multiresolution διαμόρφωση, στις οποίες αποδιαμορφώνονται μόνο οι ροές επιπέδων χαμηλότερης ποιότητας ενώ οι ροές επιπέδων υψηλότερης ποιότητας χάνονται .

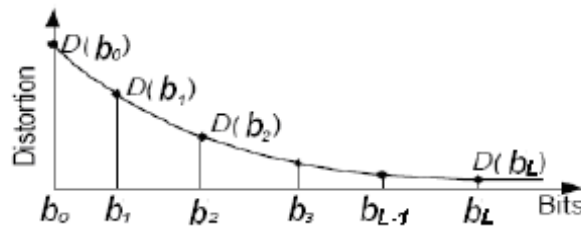
### 5.7.2 Εξελικτική κωδικοποίηση βίντεο

Η εξελικτική κωδικοποίηση βίντεο είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για να επιτρέψει την αποθήκευση σε μια ροή των πολλαπλών αναλύσεων ενός βίντεο. Η SVC τεχνική βασίζεται στην αξίωση ότι ο δέκτης μπορεί να προσαρμοστεί στο διαθέσιμο εύρος ζώνης ώστε να συνεχίσει τη λήψη του real-time βίντεο [22]. Συγκεκριμένα επιτρέπει την κωδικοποίηση μιας ροής βίντεο υψηλής ανάλυσης η οποία περιέχει ένα η περισσότερα υποσύνολα της αρχικής ροής. Ένα τέτοιο υποσύνολο αναπαριστά μια ροή μικρότερης χωρικής ή χρονικής ανάλυσης,

δηλαδή μία ροή χαμηλότερης ποιότητας (κάθε μία ξεχωριστά ή σε συνδυασμό) σε σύγκριση με την αρχική ροή από την οποία παράγονται [23]. Γενικά πολλές είναι οι SVC τεχνικές που έχουν προταθεί. Οι κωδικοποιημένες ροές για τις εφαρμογές μικρής κλίμακας (low-end applications) ενσωματώνονται ως υποσύνολα των ροών για τις εφαρμογές υψηλής κλίμακας (high-end applications). Η τεχνική αυτή διευκολύνει τη multicast διανομή ενός βίντεο λόγω της δυνατότητας μερικής αποκωδικοποίησης σε διάφορες αναλύσεις και επίπεδα ποιότητας ανάλογα με την ικανότητα των δεκτών. Το προτεινόμενο σχήμα εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες οποιασδήποτε προηγμένης κωδικοποίησης βίντεο η οποία παράγει κλιμακώσιμες ροές με πολλαπλά επίπεδα ποιότητας. Στο παράδειγμά μας χρησιμοποιείται ένας προηγμένος JVSM κωδικοποιητής βίντεο ο οποίος αποτελεί μία εξελικτική επέκταση του MPEG-4, part 10/H.264-AVC. Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.11 με τον JVSM ένα γκρουπ από frames (GoF) κωδικοποιείται σε μία κλιμακώσιμη ροή L επιπέδων ποιότητας, το οποίο υποστηρίζει τη χρονική και τη χωρική κλιμακωσιμότητα συγχρόνως. Η ροή χωρίζεται σε τμήματα σύμφωνα με τα όρια του κάθε επιπέδου ποιότητας. Τα όρια ενός l επιπέδου μίας GoF ροής είναι μεταξύ των  $b_{l-1}$  και  $b_l$  bits έτσι ώστε  $0 = b_0 \leq b_1 \leq \dots \leq b_L$ . Η αλλοίωση της ποιότητας του βίντεο ορίζεται ως  $D(b_l)$  και ισχύει η σχέση  $D(b_0) \geq D(b_1) \geq D(b_L)$  όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.12. Με βάση το προτεινόμενο σχήμα κάθε ένα από αυτά τα τμήματα κωδικοποιείται περαιτέρω από την τροποποιημένη layered MDC τεχνική.



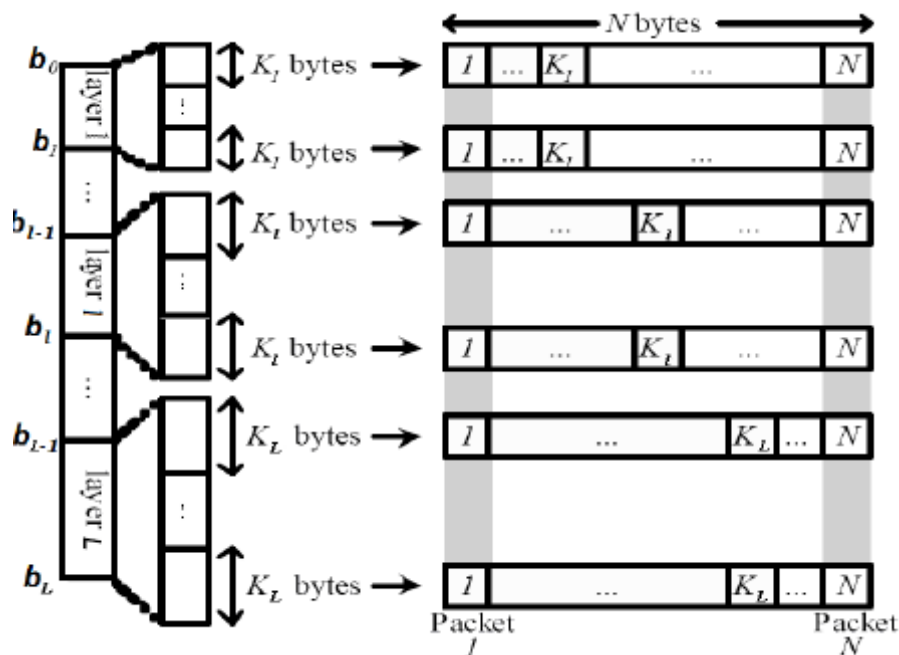
Σχήμα 5.10 Κλιμακώσιμες bit ροές με L επίπεδα ποιότητας [24].



Σχήμα 5.11 Συνάρτηση αλλοίωσης βίντεο ως προς το πλήθος των ληφθέντων ρών διαφορετικών επιπέδων ενός GoF [24].

### 5.7.3 Layered MDC

Πολλές είναι οι MDC τεχνικές οι οποίες προτείνονται για την αντιμετώπιση της απώλειας των πακέτων. Η MDC τεχνική που προτείνεται διαφοροποιείται από την layered MDC. Στη layered MDC τεχνική τα πολλαπλά descriptions παράγονται με τη χρήση της PET (Priority Encoding Transmission) τεχνικής. Η PET τεχνική αποτελεί ένα σχήμα πακετοποίησης το οποίο συνδυάζει την κωδικοποίηση βίντεο σε επίπεδα (layered video coding). Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.12 δεδομένου του γεγονότος ότι κάθε GoF κωδικοποιείται ανεξάρτητα σε μια κλιμακώσιμη ροή με πολλαπλά επίπεδα διαφορετικής σημαντικότητας, κάθε  $l$  επίπεδο της ροής διαχωρίζεται έπειτα σε μπλοκ ίσου μήκους, με  $K_l$  bytes το καθένα. Κάθε τέτοιο μπλοκ κωδικοποιείται και



Σχήμα 5.12 Παραγωγή των PUs από τα συμβατικά Layered MDC πακέτα [24].

επεκτείνεται σε ένα PU (protected unit) μήκους  $N$  bytes κάνοντας έπειτα χρήση του Reed-Solomon (RS) κώδικα. Ο RS είναι ένας κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων ο οποίος μπορεί να διορθώσει το μισό των επιπλέον συμβόλων που έχουν προστεθεί στο PU, πλήθος σφαλμάτων [25].

Γενικά ο διαχωρισμός της ροής σε  $L$  επίπεδα δε γίνεται με βάση της αύξηση της σημαντικότητας των επιπέδων. Ο αριθμός των bytes, δηλαδή η τιμή του  $K_i$  κάθε μπλοκ ενός επιπέδου εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι η σημασία του επιπέδου για την τελική αναδημιουργία του βίντεο, η προστασία που απαιτεί το επίπεδο για τη διανομή στο κανάλι, κ.λπ.. Όσο μικρότερη είναι η τιμή  $K_i$  των bytes του μπλοκ ενός επιπέδου, τόσο μεγαλύτερη προστασία προσφέρει το επίπεδο για τη συγκεκριμένη ροή δεδομένων, έναντι της απώλειας των πακέτων. Το PU πακετάρεται έτσι ώστε το  $i$ -th byte κάθε μπλοκ να ανατίθεται στο  $i$ -th MDC για μετάδοση πακέτο, όπου  $i = 1, \dots, N$ . Όλα τα MDC πακέτα είναι ίσης σημαντικότητας, καθώς μόνο ο αριθμός των πακέτων που λαμβάνονται καθορίζει την ποιότητα του βίντεο του GoF που αναδημιουργείται. Συνεπώς η layered MDC τεχνικής είναι ένα είδος γενικής MDC τεχνικής όπου το  $i$ -th MDC πακέτο αποτελεί το  $i$ -th description ενός GoF. Δηλαδή ένα MDC πακέτο περιέχει δεδομένα από διάφορα επίπεδα ποιότητας μιας GoF ροής.

Συνεπώς για ένα επίπεδο χαμηλότερης ποιότητας το μήκος των bytes του  $K_i$  είναι μικρότερο από το μήκος των bytes που χρησιμοποιείται για ένα επίπεδο υψηλότερης ποιότητας, καθώς η αναδημιουργία ενός βίντεο εξαρτάται από τα χαμηλότερα επίπεδα ποιότητας παρά από τα υψηλότερα. Συγκεκριμένα η layered MDC με τη χρήση της PET τεχνικής κατανέμει περισσότερα στοιχεία προστασίας στα μπλοκ χαμηλότερης ποιότητας από ότι στα μπλοκ υψηλότερης ποιότητας εξαιτίας της μεγαλύτερης σημαντικότητας μιας ροής δεδομένων χαμηλότερου επιπέδου ποιότητας. Ισχύει δηλαδή η σχέση  $N-K_1 \geq N-K_2 \geq \dots \geq N-K_i \geq \dots \geq N-K_L$ , δηλαδή για ένα PU χαμηλότερης ποιότητας υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός MDC πακέτων στοιχείων προστασίας.

Κάθε MDC πακέτο το οποίο περιέχει τμήματα των PUs ροών από διάφορα επίπεδα ποιότητας μπορεί είτε να χαθεί εντελώς είτε να ληφθεί ολοκληρωτικά. Εάν ένα επίπεδο ενός GoF χαμηλότερης ποιότητας, δεν ανακτηθεί ολοκληρωτικά από τον αριθμό των επιτυχώς λαμβανομένων MDC πακέτων τότε τα δεδομένα των υψηλότερων επιπέδων ποιότητας είναι ανώφελα.

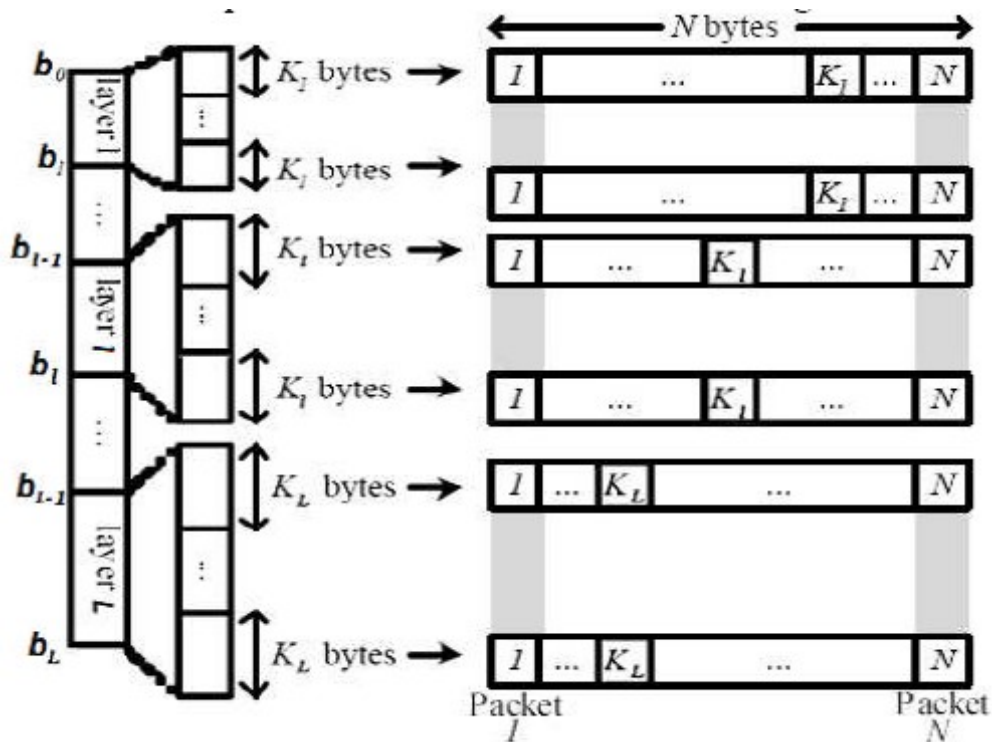
### 5.7.4 Τροποποιημένη Layered MDC τεχνική

Πριν τη multicast διανομή των ροών στο σταθμό βάσης, τα PUs τα οποία ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας τοποθετούνται στην ουρά διαφορετικών buffers και κατόπιν διαμορφώνονται από το αντίστοιχο σχήμα διαμόρφωσης πριν τεθούν όλα μαζί ως ένα cross-layer κωδικοποιημένο μπλοκ multicast μετάδοσης.

Στο προτεινόμενο σχήμα σε αντίθεση με αυτό της layered MDC τεχνικής, προσφέρονται περισσότερα δεδομένα προστασίας στα μπλοκ υψηλότερης ποιότητας από ότι στα μπλοκ χαμηλότερης ποιότητας έτσι ώστε να ισχύει η σχέση  $N-K_1 \leq N-K_2 \leq \dots \leq N-K_l \leq \dots \leq N-K_L$  (σχήμα 5.13).

Στόχος είναι η επιτυχής ανάκτηση των υψηλότερου επιπέδου ροών ενός βίντεο, μέσω ενός μικρότερου αριθμού, μερικώς λαμβανομένων MDC πακέτων, σε σύγκριση με αυτά που απαιτούνται για την ανάκτηση των αντίστοιχων χαμηλότερων επιπέδων ενός GoF.

Όταν ένα MDC πακέτο διανέμεται μέσα σε ένα μπλοκ με τη multicast τεχνικής και τη χρήση της SPCM τότε οι διάφοροι δέκτες μπορούν να αποδιαμορφώσουν και να λάβουν επιτυχώς διάφορα κομμάτια αυτού δηλαδή κομμάτια διαφορετικών



**Σχήμα 5.13** Παραγωγή των PUs από τα τροποποιημένα Layered MDC πακέτα με φθίνουσα του μήκους των bytes του  $K_i$  από τα χαμηλότερα επίπεδο ποιότητας προς τα υψηλότερα [24]

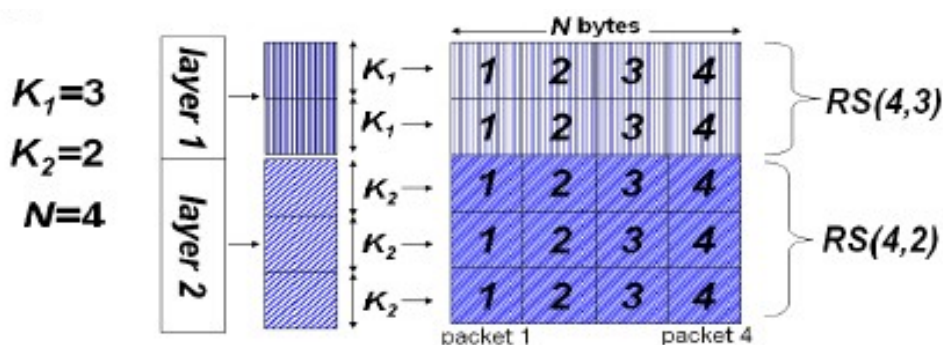


επιπέδων ποιότητας, ανάλογα με την τιμή του SNR του καναλιού κάθε χρήστη. Ωστόσο εάν τα PUs ενός υψηλότερου επιπέδου ποιότητας μέσα στο MDC πακέτο μπορούν να αποδιαμορφωθούν από έναν δέκτη, τα PUs που ανήκουν στα χαμηλότερα επίπεδα μέσα στο ίδιο MDC πακέτο έχουν επίσης ήδη αποδιαμορφωθεί επιτυχώς. Με αυτή την τεχνική οι χρήστες μιας multicast ομάδας έχουν περισσότερες πιθανότητες να διαθέτουν το απαραίτητο SNR για την αποδιαμόρφωση των χαμηλότερων επιπέδων PUs. Η φθίνουσα τιμή του μήκους των bytes του  $K_i$  από τα χαμηλότερα επίπεδο ποιότητας προς τα υψηλότερα επιτρέπει στην τροποποιημένη layered MDC τεχνική την ολοκληρωτική αναδημιουργία των ροών ενός υψηλού επιπέδου ποιότητας σχετικά ευκολότερα με τη λήψη ενός μικρότερου αριθμού μερικώς λαμβανομένων MDC πακέτων εξαιτίας του μικρότερου μήκους των bytes της  $K_i$  μεταβλητής.

### 5.7.5 Cross-Layer Superposition Coded Multicast

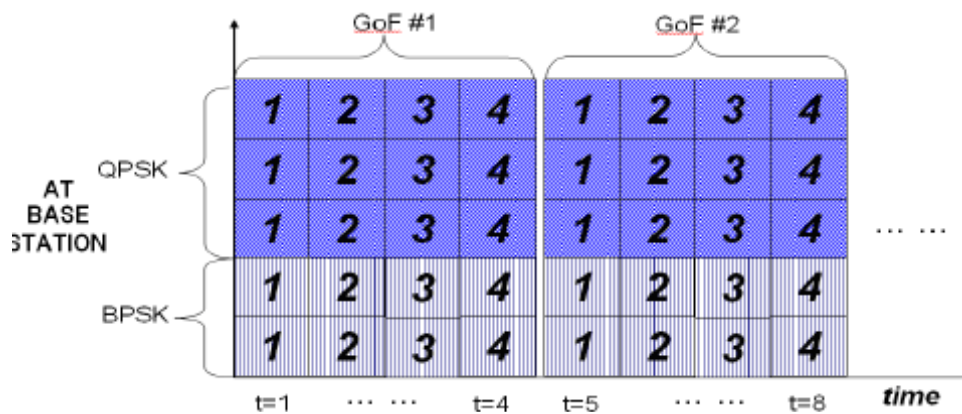
Ο σημαντικότερος περιορισμός των προηγούμενων προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν την μόνο τη SPCM τεχνική ή μόνο τη multiresolution διαμόρφωση είναι ότι είναι ιδιαίτερα απίθανο για ένα SS να λάβει/ανακτήσει τα δεδομένα ενός υψηλότερου επιπέδου υπό τις «κακές» συνθήκες ενός καναλιού. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την από κοινού αξιοποίηση της SPCM στο κανάλι και την SVC σε συνδυασμό με την τροποποιημένη layered MDC τεχνική.

Στο προτεινόμενο cross-layer (διεπίπεδο) κωδικοποιημένο multicast βίντεο μελετούμε την περίπτωση δύο επιπέδων ποιότητας ενός GoF. Τα PUs των δύο αυτών επιπέδων παράγονται από την τροποποιημένη layered MDC τεχνική με χρήση του RS κώδικα (σχήμα 5.14).

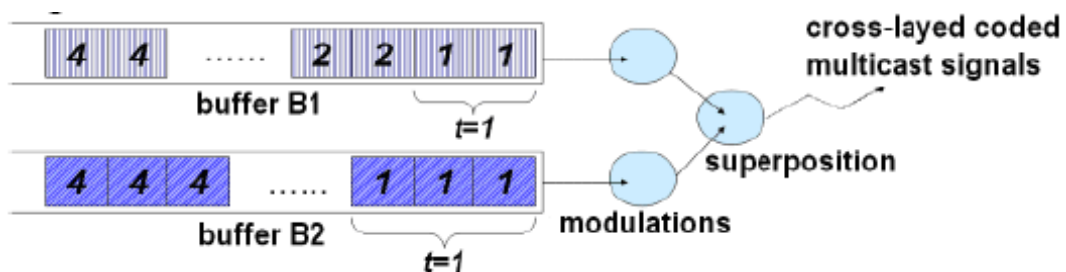


Σχήμα 5.14 PUs επιπέδου  $i$  που διαμορφώνονται από τον  $RS(N, K_i)$  [24].

Τα PUs του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου τοποθετούνται στην ουρά των B1 και B2 buffers αντίστοιχα στο σταθμό βάση σύμφωνα με τη σειρά των description τους (σχήμα 5.15). Ξεκινώντας με την πρώτη διαθέσιμη χρονοθυρίδα για τη multicast μετάδοση, τα PUs του πρώτου επιπέδου τα οποία ανήκουν στο πρώτο description του buffer B1, διαμορφώνονται με ένα χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης (όπως το BPSK), το οποίο απαιτεί ένα χαμηλότερο SNR για την αποδιαμόρφωση για ένα δεδομένο BER (bit error rate). Κατά την ίδια χρονοθυρίδα, τα PUs του δεύτερου επιπέδου τα οποία ανήκουν στο πρώτο description του buffer B2, διαμορφώνονται από ένα υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης (όπως το 16QAM), το οποίο απαιτεί ένα υψηλότερο SNR για την αποδιαμόρφωση για ένα δεδομένο BER.



Σχήμα 5.15 Μετάδοση όλων των PUs όλων των επιπέδων μιας ροής μέσω της SPCM από το BS[24]



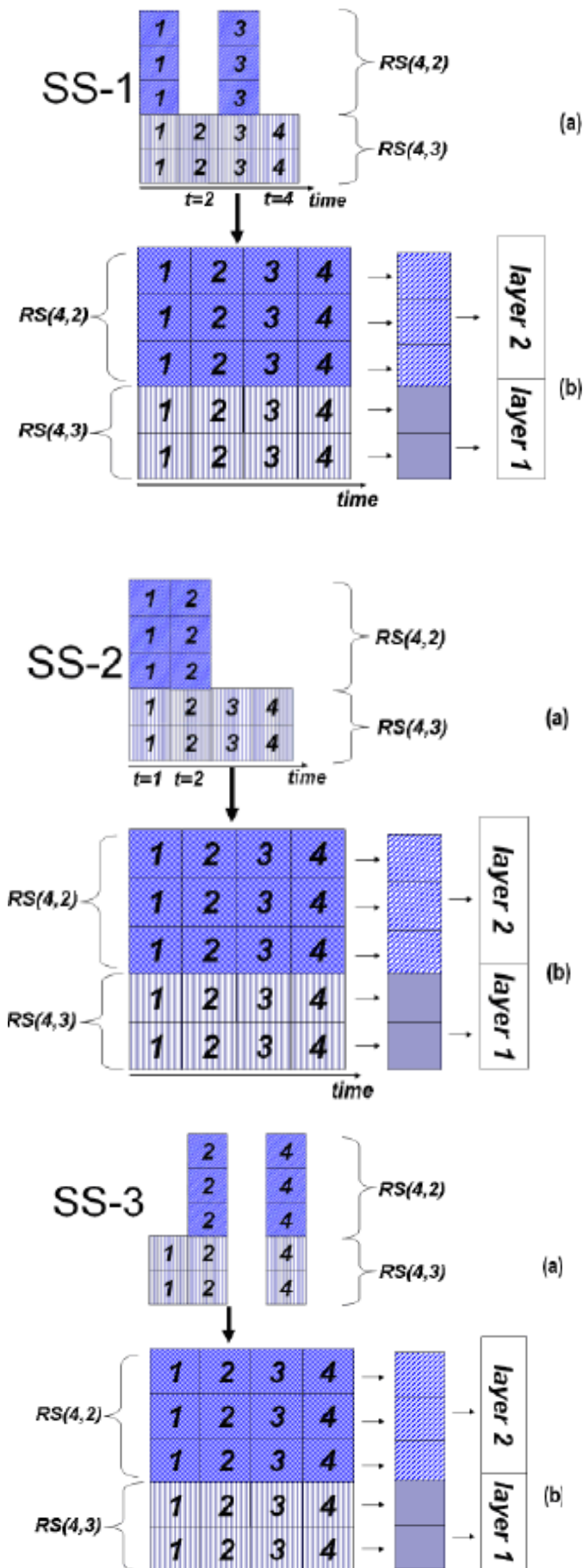
Σχήμα 5.16 Αποθήκευση των PUs του 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> επιπέδου στους B1 και B2 buffers για το σχηματισμό cross-layer SPCM σημάτων [02].

Τα διαμορφωμένα σήματα των B1 και B2 buffers σχηματίζουν κατόπιν το SPCM μπλοκ μετάδοσης με τη μορφή ενός MDC πακέτου για το πρώτο description, το οποίο διαβιβάζεται στο ασύρματο κανάλι μέχρι το τέλος της διάρκειας της πρώτης χρονοθυρίδας (σχήμα 5.16).

Κατά τη διάρκεια κάθε χρονοθυρίδας, ο ρυθμός μετάδοσης του σχήματος διαμόρφωσης που εφαρμόζεται στο buffer για ένα επίπεδο, πρέπει να είναι αρκετά γρήγορος για τη multicast διανομή όλων των PUs που ανήκουν στο συγκεκριμένο επίπεδο του MDC πακέτου, διαφορετικά πρέπει να προσαρμοστεί ο αριθμός και το μέγεθος των PUs καθώς και το μέγεθος της χρονοθυρίδας. Αυτή η συνθήκη είναι απαραίτητη για να επιτυγχάνει ο σταθμός βάσης μακροπρόθεσμη σταθερότητα.

Ο σταθμός βάσης επαναλαμβάνει την ίδια superposition διαδικασία για το επόμενο σύνολο PUs τα οποία ανήκουν στο δεύτερο description για όλους τους buffers, κατά την επόμενη διαθέσιμη χρονοθυρίδα και ούτω καθ' εξής. Εφ' όσον τα PUs όλων των description ενός GoF διανεμηθούν κατά το multicast τρόπο, η ίδια διαδικασία ακολουθείται με το επόμενο GoF μέχρι το τέλος της παρουσίασης του IPTV προγράμματος.

Σημειώνεται ότι ένας SS μιας multicast ομάδας μπορεί να αποδιαμορφώσει μόνο μερικά από τα PUs που λαμβάνει από ένα cross-layer SPCM πακέτο εξαιτίας του SNR του καναλιού του. Για παράδειγμα όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.17, ο SS1 λαμβάνει τα PUs του δεύτερου επιπέδου μόνο στην πρώτη και στην τρίτη χρονοθυρίδα. Ο SS-3 χάνει ολόκληρο το MDC πακέτο στην τρίτη χρονοθυρίδα εξαιτίας της μεγάλης εξασθένισης. Ωστόσο, οι SS-1, SS-2 και SS-3 μπορούν τελικά να ανακτήσουν τα χαμένα PUs και να ανακτήσουν εν τέλει ολοκληρωτικά τις ροές και των δύο επιπέδων επιτυγχάνοντας την πλήρη ποιότητα του βίντεο, αφού οι απώλειες είναι ανεκτές εξαιτίας των δεδομένων προστασίας που εφαρμόζονται σε κάθε επίπεδο.



Σχήμα 5.17 Ανάκτηση πλήρους ποιότητας ενός GoF υπό την ποικιλόμορφη εξασθένηση κάθε SS[24]

Η απόδοση της αποδιαμόρφωσης για ένα  $l$  επίπεδο ενός GoF για έναν δέκτη, αξιολογείται από άποψη τον αριθμό αποδεκτών/ανακτήσιμων ροών του  $l$  επιπέδου σε συνδυασμό με το μέσο BER για το συγκεκριμένο επίπεδο. Το SNR ενός SS καθορίζεται από την ισχύ που κατανέμεται από το σταθμό βάσης στο διαμορφωμένο σήμα του  $l$  επιπέδου ποιότητας, την απόσταση του SS από το σταθμό βάσης, καθώς και κάποιους άλλους παράγοντες. Για την αποδιαμόρφωση ενός  $l$  επιπέδου ο SS αποδιαμορφώνει ένα σήμα μέσω της αφαίρεσης όλων των αποδιαμορφωμένων σημάτων μεταξύ του πρώτου επιπέδου και του  $l - 1$  επιπέδου από το SPCM ληφθέν σήμα. Κατόπιν της επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης από το σταθμό βάσης, επιτυχής αποδιαμόρφωση ενός επιπέδου  $l$  από το SS για ένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης, μπορεί να συμβεί μόνο εάν το SNR του συγκεκριμένου SS, πληρεί κάποια κατώτατα όρια.

Αυτά τα κατώτα όρια του SNR ορίζονται από το WiMAX πρότυπο [26] και μπορούν να επεκταθούν από κάποιο νέο σχήμα διαμόρφωσης των μελλοντικών προτύπων του WiMAX. Αυτός ο περιορισμός που τίθεται είναι καίριας σημασίας για την επιτυχή αποδιαμόρφωση του επιπέδου  $l$ , διαφορετικά το SPCM σήμα θα αποτυγχάνει να αποκωδικοποιηθεί μερικώς ή ολοκληρωτικά. Το αναμενόμενο BER, για μια ροή ενός επιπέδου  $l$  που λαμβάνεται, επηρεάζεται επίσης από το SNR του SS.

#### 5.7.6 Επιλογή βέλτιστης κατανομής ισχύος

Η βελτίωση της συνολικής απόδοσης της multicast διανομής ενός GoF, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της βελτίωσης της απόδοσης του χρήστη με τις χειρότερες συνθήκες καναλιού. Για την επίτευξη αυτής, γίνεται χρήση μιας ευρετικής (heuristic) προσέγγισης για τη βέλτιστη επιλογή της κατανομής ισχύος σε συνδυασμό με το ρυθμό του σχήματος διαμόρφωσης ( $R_{M, l}$ ) για ένα  $l$  επίπεδο ποιότητας η οποία είναι εφαρμόσιμη σε μια real-time μετάδοση.

Η επιλογή της τιμής της  $K$  επηρεάζει έντονα στην αντιληπτή ποιότητα του βίντεο. Με βάση τον αριθμό των ροών ενός  $l$  επιπέδου (i.e.,  $b_{l-1}-b_l$ ), ο αριθμός των PUs ( $J_l$ ) για το συγκεκριμένο επίπεδο ο οποίος θα διαβιβαστεί για σε μια  $t$  χρονοθυρίδα, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση  $J_l = b_l - b_{l-1} / 8K_l$ . Γενικά για το  $t$  πρέπει να

ισχύει η σχέση  $t \geq J_i / R_{M,i}$  για  $1 \leq i \leq L$ . Για τη βέλτιστη απόδοση της μετάδοσης για τη χρονοθυρίδα  $t$  θα πρέπει να ισχύει  $t = J_i / R_{M,i}$  [24].

Στην περίπτωση μελέτης δύο επιπέδων ποιότητας που όπου η τιμή της  $K$  είναι προκαθορισμένη για κάθε επίπεδο και τις συνθήκες καναλιού κάθε SS να εξαρτώνται από την εξασθένηση και τη βραχυπρόθεσμη εξασθένηση, το BER καθορίζεται από την ισχύ και το σχήμα διαμόρφωσης που ορίζεται για κάθε επίπεδο ποιότητας. Από τη στιγμή που το SPCM σήμα διαμοιράζεται μεταξύ όλων των SSs η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού κατανομής ισχύος και ρυθμού του σχήματος διαμόρφωσης ( $p_i, R_{M,i}$ ) για το SS με τις χειρότερες συνθήκες καναλιού, βελτιώνει την ποιότητα του βίντεο για ένα GoF συνολικά. Συνεπώς στόχος είναι η μεγιστοποίηση των συνολικών ροών που λαμβάνει ο συγκεκριμένος SS. Η τιμή του SNR, η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης, το BER κάθε επιπέδου καθώς και ο αριθμός των ροών που λαμβάνει ο χρήστης με τις χειρότερες συνθήκες καναλιού αξιολογούνται με όλους τους πιθανούς τρόπους κατανομής ισχύος που ορίζεται ως  $p_2 / p_1 + p_2$ , για τη βέλτιστη multicast διανομή με τη χρήση του cross-layer σχήματος που περιγράφηκε παραπάνω [24].

### **5.8 Συνεργατική multicast διανομή IPTV υπηρεσιών μέσω WiMAX δικτύων**

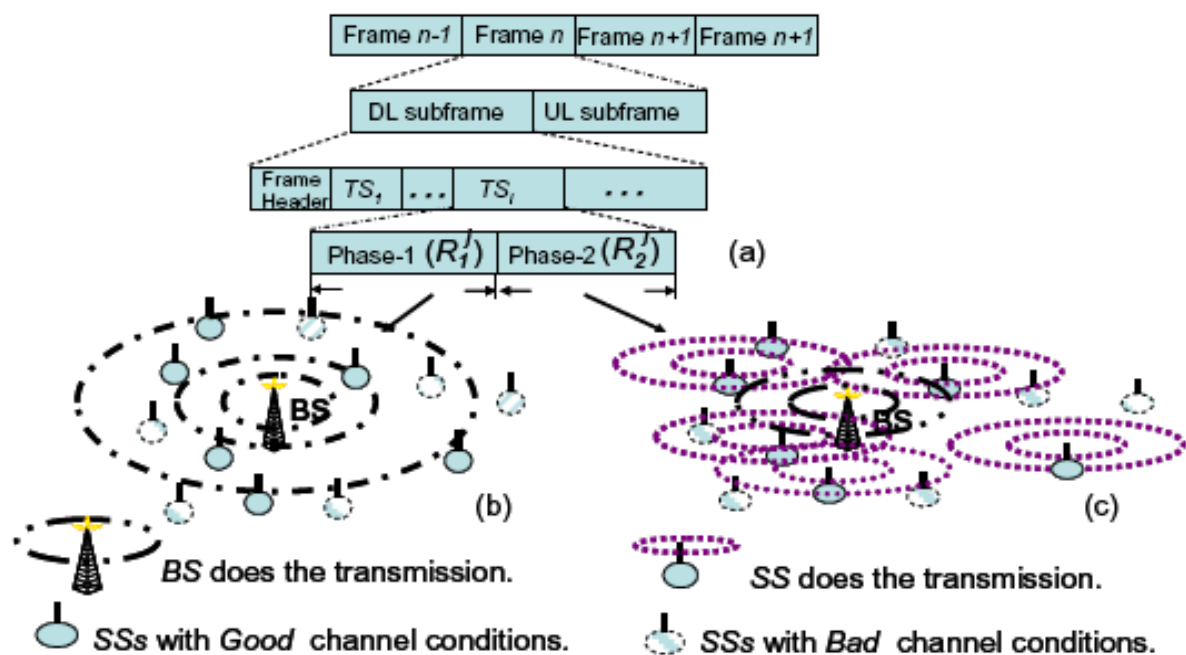
Στην πολυεκπομπή οι χρήστες που λαμβάνουν το ίδιο αντίγραφο δεδομένων οργανώνονται σε ομάδες πολυεκπομπής. Ένα απλό σχήμα πολυεκπομπής θα μπορούσε να χρησιμοποιεί ένα προεπιλεγμένο ρυθμό μετάδοσης για κάθε multicast ομάδα εξυπηρετώντας τις κατόπιν με τον round robin αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού, όπως συμβαίνει στην υλοποίηση των CDMA 2000 1xEV-DO δικτύων τα οποία υιοθετούν μια τέτοια προσέγγιση σταθερού ρυθμού μετάδοσης στα 204.8 kbps [27]. Αυτό το σχήμα είναι ανεπαρκές διότι αγνοεί τις διαφορετικές συνθήκες των καναλιών που ενδέχεται να επικρατούν μεταξύ των μελών μιας ομάδας πολυεκπομπής. Μια άλλη προσέγγιση είναι η επιλογή ενός συγκεκριμένου ρυθμού μετάδοσης για κάθε ομάδα πολυεκπομπής έτσι ώστε όλα τα μέλη της ομάδας να μπορούν να υποστηρίξουν το ρυθμό αυτό. Δεδομένου του γεγονότος ότι μπορεί να επικρατούν διαφορετικές συνθήκες καναλιών μεταξύ των μελών μιας ομάδας πολυεκπομπής, τα μέλη της ομάδας στα οποία επικρατούν «καλές» συνθήκες δεν μπορούν να υποστηρίξουν το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που τους επιτρέπουν οι συνθήκες του καναλιού τους αλλά το ρυθμό μετάδοσης

του χρήστη με τις χειρότερες συνθήκες καναλιού. Αυτή η προσέγγιση είναι ανεπαρκής και ιδιαίτερα όταν τα μέλη μιας ομάδας με «κακή» κατάσταση συνθηκών των καναλιού τους αποτελούν ένα μικρό ποσοστό του συνολικού πλήθους των μελών της ομάδας πολυεκπομπής.

Προγενέστερες μελέτες δεν προσανατολίζονται στην εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας των καναλιών των μελών μιας ομάδας πολυεκπομπής αλλά κυρίως στο πως θα αποφύγουν την αρνητική επίδραση αυτών. Ωστόσο η συνεργατική (cooperative) επικοινωνία αποτελεί μια υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της αποδοτικότητας ενός συστήματος διερευνώντας τη broadcast φύση των ασύρματων καναλιών και τη συνεργασία μεταξύ των πολλαπλών χρηστών. Η συνεργατική επικοινωνία έχει μελετηθεί εκτενώς στο παρελθόν για unicast μεταδόσεις [28, 29, 30] όχι όμως και για τις μεταδόσεις πολυεκπομπής. Η unicast συνεργατική μετάδοση επικεντρώνεται στην αποδοτικότητα του φυσικού επιπέδου μελετώντας τη μετάδοση εσφαλμένων bit, τη βέλτιστη κατανομή ισχύος, κλπ. Στη συγκεκριμένη παράγραφο προτείνεται η χρήση ενός συνεργατικού σχήματος πολυεκπομπής το οποίο εκμεταλλεύεται το κέρδος από τη χωρική ποικιλομορφία (spatial diversity) μεταξύ των πολλαπλών χρηστών, χρησιμοποιώντας συνεργατική μετάδοση δύο φάσεων. Στο σχήμα αυτό όλα τα μέλη της ομάδας πολυεκπομπής ζητούν τα ίδια δεδομένα, με οποιοδήποτε χρήστη ο οποίος διαθέτει «καλές» συνθήκες καναλιού να προωθεί τα δεδομένα που λαμβάνει στους υπόλοιπους χρήστες της ομάδας. Συνεπώς το πλήθος των μελών της ομάδας που προωθεί τα δεδομένα στα υπόλοιπα μέλη της ομάδας είναι μεταβλητό. Το προτεινόμενο σχήμα βελτιώνει σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία της μετάδοσης στην κάτω ζεύξη για εκείνους τους σταθμούς συνδρομητών των οποίων οι συνθήκες των καναλιών τους δεν είναι «καλές». Έτσι υπάρχει βελτίωση της ρυθμοαπόδοσης τόσο σε επίπεδο ομάδας όσο και για κάθε επιμέρους μέλος της ομάδας. Ωστόσο η συνεργατική μετάδοση δεν είναι τόσο αξιόπιστη όσο η unicast εξαιτίας της απουσίας των acknowledgement μηνυμάτων.

Στο MAC επίπεδο το πεδίο του χρόνου διαιρείται σε MAC frames ίσης διάρκειας. Κάθε MAC frame αποτελείται από ένα subframe κάτω ζεύξης (DL subframe) το οποίο ακολουθείται από ένα subframe άνω ζεύξης (UL subframe) και κάθε DL subframe αποτελείται από το header του frame και πολλές ριπές κάτω ζεύξης. Για κάθε frame ορίζεται μία multicast ομάδα (MGroup). Για παράδειγμα για το frame n

ορίζεται η MGroup  $i$  ομάδα και ο σταθμός βάσης ορίζει τη ριπή  $i$  κάτω ζεύξης (TS $_i$ ) σε αυτή. Στο προτεινόμενο σχήμα η χρονική διάρκεια της TS $_i$  ριπής υποδιαιρείται σε δύο φάσεις (σχήμα 5.18(a)). Κατά την πρώτη φάση ο σταθμός βάσης πραγματοποιεί την πολυεκπομπή με ένα υψηλό ρυθμό μετάδοσης  $R_1^i$  στα μέλη της Mgroup  $i$ , με στόχο να εγγυηθεί ότι ένα ορισμένο ποσοστό των σταθμών συνδρομητών θα μπορεί να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς τα δεδομένα (σχήμα 5.18(b)). Μετά την πρώτη φάση διάρκειας  $T_1$ , οι σταθμοί συνδρομητών με «καλές» συνθήκες καναλιού μπορούν επιτυχώς να λάβουν τα διαβιβασθέντα δεδομένα, ενώ οι υπόλοιποι σταθμοί συνδρομητών με «κακές» συνθήκες καναλιού μπορούν να αποκωδικοποιήσουν ένα μέρος αυτών των δεδομένων. Κατά τη δεύτερη φάση διάρκειας  $T_2$ , όλοι οι σταθμοί συνδρομητών που διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιού μεταδίδουν ταυτόχρονα τα δεδομένα που έλαβαν στους υπόλοιπους σταθμούς συνδρομητών με ρυθμό  $R_2^i$  ο οποίος πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση  $R_1^i * T_1 = R_2^i * T_2$  έτσι ώστε όλα τα μέλη της Mgroup  $i$  να λάβουν τα ίδια δεδομένα (σχήμα 5.18(c)) [31]. Σημειώνεται ότι οι  $R_1^i$  και  $R_2^i$  ρυθμοί της μετάδοσης δύο φάσεων είναι πολύ μεγαλύτεροι και υπερέχουν του κοινού ρυθμού μετάδοσης για όλα τα μέλη της ομάδας που χρησιμοποιείται από την προσέγγιση της μίας φάσης. Η επιλογή της ομάδας πολυεκπομπής για κάθε frame καθώς και των  $R_1^i$  και  $R_2^i$  ρυθμών μετάδοσης εξετάζονται στην παράγραφο που ακολουθεί.





Σχήμα 5.18 Προτεινόμενο σχήμα multicast διανομής [31]

### 5.8.1 Επιλογή multicast ομάδας

Τα μέλη μιας ομάδας πολυεκπομπής είναι κατανεμημένα σε διάφορες τοποθεσίες, με κάθε μέλος να διαθέτει διαφορετικές μακροπρόθεσμες συνθήκες καναλιού (long-term channel conditions) οι οποίες εξαρτώνται από το γεωγραφικό θέση τους και την απόστασή του από το σταθμό βάσης. Επιπλέον λόγω της γρήγορης εξασθένησης τα μέλη της ομάδας μπορεί να έχουν στιγμιαία διαφορετικές συνθήκες καναλιού (instantaneous channel conditions) σε κάθε frame, ακόμα κι αν έχουν μακροπρόθεσμα τις ίδιες συνθήκες.

Κατά την πολυεκπομπή με τη χρήση του συνεργατικού σχήματος για την επιλογή της ομάδας πολυεκπομπής που θα εξυπηρετηθεί πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι συνθήκες των καναλιών σε επίπεδο ομάδας και όχι σε επίπεδο χρήστη. Εάν η ομάδα πολυεκπομπής επιλεγεί προς εξυπηρέτηση βάσει των καλύτερων συνθηκών καναλιού μεταξύ των μελών της αγνοώντας τις συνθήκες των καναλιών των υπόλοιπων μελών, η ρυθμοαπόδοση σε επίπεδο ομάδας μπορεί να μην είναι υψηλή εάν οι συνθήκες των καναλιών των περισσότερων εκ των άλλων μελών δεν είναι «καλές». Επιπλέον εάν η ομάδα πολυεκπομπής επιλεγεί βάσει των συνολικών συνθηκών που επικρατούν στα κανάλια όλων των μελών της τότε οι ομάδες πολυεκπομπής οι οποίες βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης και έχουν καλές συνθήκες καναλιών, είναι πιθανότερο να επικρατήσουν της κατανάλωσης εύρους ζώνης (fairness πρόβλημα). Με βάση αυτό το πρόβλημα η επιλογή της Mgroup  $i$  ομάδας, γίνεται βάσει μιας σχετικής ομαλοποιημένης κατάστασης του καναλιού (normalized relative channel condition) η οποία συμβολίζεται ως  $X_i$  και προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$i^* = \underset{i}{\operatorname{arg\,max}} X_i$$

$$X_i = \frac{\sum_{j \in G_i} \gamma_i^j / \bar{\gamma}_i^j}{|G_i|}$$

Το  $|G_i|$  αναφέρεται στο συνολικό αριθμό των μελών της Mgroup  $i$  και οι  $\gamma_i^j$  και  $\bar{\gamma}_i^j$  μεταβλητές το μέσο και το στιγμιαίο SNR του καναλιού μεταξύ του  $SS_{i,j}$  και του σταθμού βάσης αντιστοίχως. Βάσει των παραπάνω ο σταθμός βάσης επιλέγει για κάθε DL subframe την Mgroup  $i^*$  με τη μέγιστη  $X_i$  τιμή [31].

### 5.8.2 Συνεργατική μετάδοση

Κατόπιν της επιλογής της ομάδας πολυεκπομπής γίνεται η διανομή των δεδομένων στα μέλη της. Εάν ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων καθορίζεται βασιζόμενος στα κανάλια στα οποία επικρατούν «καλές» συνθήκες, τα μέλη της ομάδας τα οποία δε διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιών δε μπορούν να αποκωδικοποιήσουν επιτυχώς τα λαμβανόμενα δεδομένα. Αντιθέτως εάν ο ρυθμός μετάδοσης επιλέγεται βάσει των καναλιών στα οποία δεν επικρατούν «καλές» συνθήκες, οι πόροι των μελών της ομάδας με «καλές» συνθήκες καναλιού δεν θα χρησιμοποιούνται επαρκώς. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης ο σταθμός βάσης διανέμει τα δεδομένα σε όλα τα μέλη της Mgroup  $i$  με έναν υψηλό ρυθμό μετάδοσης ο οποίος καθορίζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στα κανάλια ορισμένων μελών αυτής. Ο ρυθμός που επιλέγεται εγγυάται την αξιόπιστη μετάδοση για τα μέλη της MGroup  $i$  που διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιών. Όμως ο ρυθμός αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για τα μέλη της ομάδας με «κακές» συνθήκες τα οποία δε μπορούν να αποκωδικοποιήσουν επιτυχώς όλα τα δεδομένα που λαμβάνουν κατά την πρώτη φάση και έτσι πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη δεύτερη φάση της συνεργατικής μετάδοσης για την επίτευξη μιας αξιόπιστης διανομής. Έστω  $S^a$  το σύνολο των μελών της ομάδας πολυεκπομπής τα οποία μπορούν να λάβουν επιτυχώς τα δεδομένα κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης και  $S^b$  τα υπόλοιπα μέλη αυτής. Κατά τη δεύτερη φάση όλα τα μέλη του  $S^a$  συνόλου μέσω της συνεργατικής μετάδοσης διαβιβάζουν τα ίδια δεδομένα που έλαβαν κατά την πρώτη φάση στα μέλη του  $S^b$  συνόλου όπως ακριβώς συμβαίνει σε ένα εικονικό MIMO σύστημα κεραιών. Αν και οι συνθήκες των καναλιών μεταξύ του σταθμού βάσης και των μελών του  $S^b$  συνόλου δεν είναι καλές κατά τη διάρκεια ενός frame δεν είναι «καλές» είναι πολύ πιθανό κάποια μέλη του  $S^a$  να βρίσκονται κοντά σε μέλη του  $S^b$  συνόλου και να έχουν «καλές» συνθήκες. Έτσι εκμεταλλεούμενοι το κέρδος από τη χωρική ποικιλομορφία στη δεύτερη φάση ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να βελτιωθεί κατά την πολυεκπομπή. Σημειώνεται ότι κατά τη δεύτερη φάση η διανομή κάτω ζεύξης σε οποιοδήποτε μέλος του  $S^b$  συνόλου αποτελεί ένα εικονικό MISO σύστημα διότι πολλά μέλη του  $S^a$  συνόλου διανέμουν δεδομένα σε ένα δέκτη. Η ισχύς του σήματος για ένα μέλος του  $S^b$  συνόλου είναι ίση με το άθροισμα της ισχύος των σημάτων των συνεργατικών αποστολέων (cooperative transmitters) του  $S^a$ . Συνεπώς ένα μέλος της ομάδας  $S^b$  είναι σε θέση να λάβει

επιτυχώς τα δεδομένα στη δεύτερη φάση ακόμη και με ένα υψηλό ρυθμό μετάδοσης. Το αν η λήψη των δεδομένων στη δεύτερη φάση θα είναι επιτυχής ή όχι εξαρτάται από το SNR του  $SS_{i,j}$  σε αυτή τη φάση. Κατά τη συνεργατική μετάδοση το ληφθέν SNR του  $SS_{i,j}$  εξαρτάται από το πλήθος των μελών που μπορούν να λάβουν επιτυχώς τα δεδομένα στην πρώτη φάση, δηλαδή από το πλήθος των αποστολέων της συνεργατικής μετάδοσης ( $G^g_i$ ) και τη ληφθείσα ισχύ του καθένα εξ' αυτών.

Η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης και στις δύο φάσεις ( $R^i_1$  και  $R^i_2$ ) είναι καίριας σημασίας για την απόδοση του συστήματος. Για τη διευκόλυνση της υλοποίησης του προτεινόμενου συστήματος οι τιμές των  $R^i_1$  και  $R^i_2$  μεταβλητών επιλέγονται βάσει των μακροπρόθεσμων συνθηκών των καναλιών όλων των μελών της MGroup  $i$  προκειμένου να διευκολύνουν το σταθμό βάσης έτσι ώστε να μη χρειάζεται να επανακαθορίζει συχνά τους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και της αναλογίας κάλυψης (coverage ratio)  $C$ . Η  $C$  αναλογία κάλυψης ορίζεται ως το ποσοστό των μελών της ομάδας που μπορεί να υποστηρίξει το  $R^i_1$  ρυθμό μετάδοσης. Για παράδειγμα εάν η αναλογία κάλυψης  $C$  είναι 0.5 αυτό σημαίνει ότι ο σταθμός βάσης μεταδίδει με ρυθμό μετάδοσης  $R^i_1$  έτσι ώστε κατά μέσο όρο τα μισά από τα μέλη της multicast ομάδας να μπορούν να λάβουν τα δεδομένα επιτυχώς και ο  $R^i_2$  ρυθμός μετάδοσης να είναι τέτοιος ώστε τα υπόλοιπα μέλη να μπορούν να λάβουν επιτυχώς τα δεδομένα κατά τη δεύτερη φάση.

### 5.8.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του σχήματος της συνεργατικής μετάδοσης συγκρίνουμε τη ρυθμοαπόδοση του προτεινόμενου σχήματος με αυτή της συμβατικής μετάδοσης σύμφωνα με την οποία ο σταθμός βάσης επιλέγει το ρυθμό μετάδοσης με ένα «συντηρητικό» (conservative) τρόπο έτσι ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν αυτό το ρυθμό όλα τα μέλη της multicast ομάδας. Η προσομοίωση γίνεται χρήση του IEEE 802.16 WirelessMAN-OFDM δικτύου το οποίο αποτελείται από ένα σταθμό βάσης και πενήντα σταθμούς συνδρομητών. Οι σταθμοί συνδρομητών κατανέμονται τυχαία μέσα στην περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης σε μια ακτίνα 8 χιλιομέτρων. Τα μέλη κάθε multicast ομάδας επιλέγονται τυχαία μεταξύ των πενήντα σταθμών συνδρομητών ενώ η

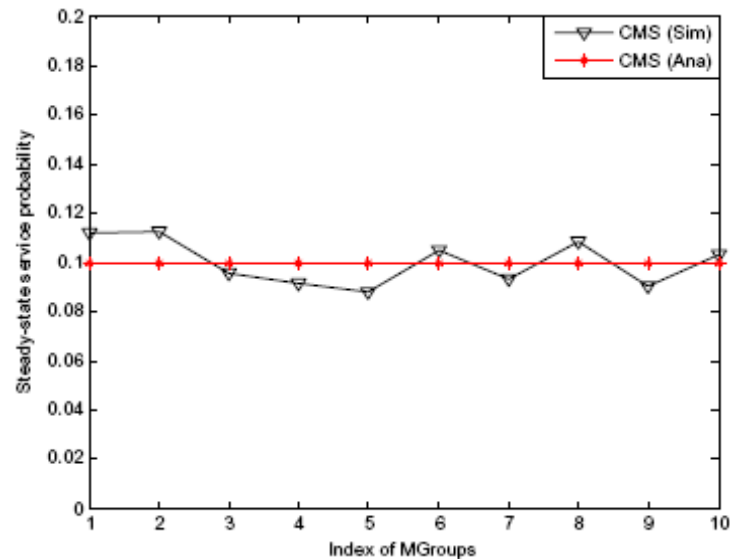
προσομοίωση επαναλαμβάνεται πενήντα φορές για τον υπολογισμό μιας μέσης τιμής. Στον πίνακα 5.1 απεικονίζονται οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η steady-state service πιθανότητα κάθε MGroup για το προτεινόμενο σχήμα. Η steady-state service πιθανότητα ορίζεται ως η πιθανότητα αποστολής των δεδομένων σε μια multicast ομάδα. Η ομάδα που επιλέγεται είναι αυτή με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού κατά μέσο όρο σε ένα frame. Παρατηρείται ότι κάθε ομάδα πολυεκπομπής έχει σχεδόν την ίδια steady-state service πιθανότητα που σημαίνει ότι το προτεινόμενο σχήμα επιλύει το fairness πρόβλημα.

Η ρυθμοαπόδοση κάθε μέλους μιας ομάδας πολυεκπομπής απεικονίζεται στο σχήμα 5.20 και παρατηρείται ότι η χρήση του συνεργατικού σχήματος υπερέρχει της χρήσης του παραδοσιακού σχήματος πολυεκπομπής. Κατά τη χρήση του συνεργατικού σχήματος παρατηρείται κάποια διακύμανση, η οποία οφείλεται στις συνθήκες των καναλιών και τη γεωγραφική θέση των μελών της ομάδας. Κάποιοι απομονωμένοι και απομακρυσμένοι SSs επιτυγχάνουν σχετικά μικρή βελτίωση της ρυθμοαπόδοσης. Ωστόσο κατά την υιοθέτηση του παραδοσιακού σχήματος πολυεκπομπής και δεδομένου του γεγονότος ότι το σχήμα αυτό επιλέγει το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων βάσει των χειρότερων συνθηκών καναλιού των μελών της ομάδας, όλα

**Πίνακας 5.1** Παράμετροι προσομοίωσης [31]

|                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| Transmission power of BS's  | 41.8 dBm      |
| Transmission power of SS's  | 30 dBm        |
| DL/UL sub-frame duration    | 0.5 ms/0.5 ms |
| OFDM symbol duration        | 23.8 $\mu$ s  |
| Bandwidth                   | 10 MHz        |
| Noise figure                | 7 dB          |
| Pass loss exponent          | 4.375         |
| Close-in Reference distance | 100 m         |
| Frequency band              | 3.5GHz        |
| Number of MGroups           | 10            |
| Coverage ratio $C'$         | 50%           |

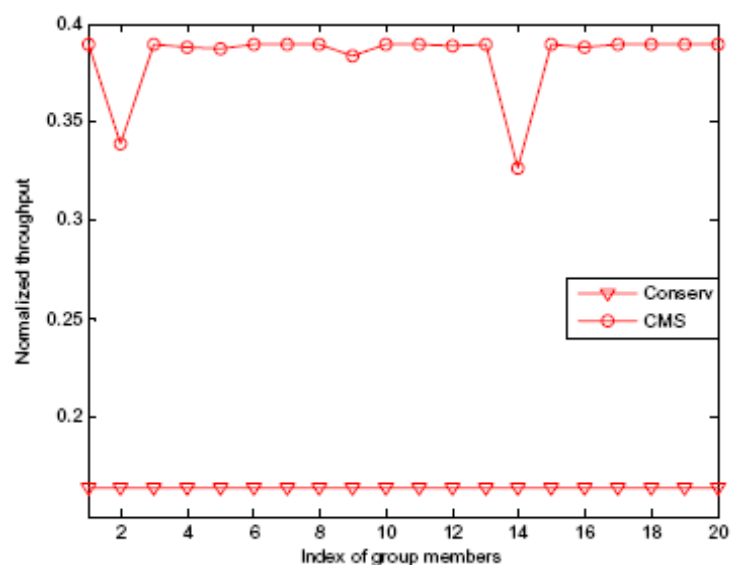


Σχήμα 5.19 Steady-state service πιθανότητα για κάθε multicast ομάδα [31]

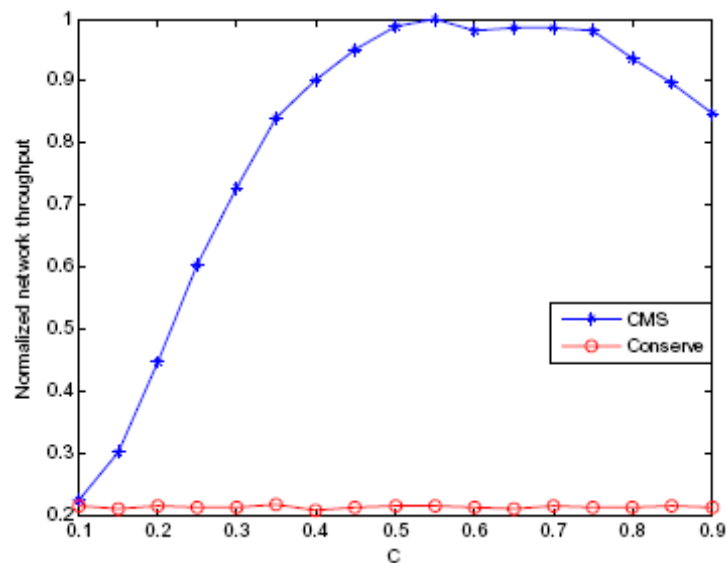
τα μέλη αυτής επιτυγχάνουν την ίδια ρυθμοαπόδοση η οποία είναι όμως χαμηλή ακόμη για τα μέλη που διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιού.

Η επίδραση της C αναλογίας κάλυψης στη ρυθμοαπόδοση του δικτύου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.21. Παρατηρείται ότι η μέγιστη ρυθμοαπόδοση επιτυγχάνεται όταν η τιμή της C μεταβλητής αναλογίας κάλυψης είναι ίση με 0.55. Μια μέση τιμή της αναλογίας κάλυψης είναι προτιμότερη από μια σχετικά μεγάλη ή μικρή τιμή.

Η χρήση του σχήματος της συνεργατικής μετάδοσης μπορεί να επεκταθεί γενικά και σε άλλα ασύρματα δίκτυα [31].



Σχήμα 5.20 Ομαλοποιημένη ρυθμοαπόδοση κάθε μέλους της multicast ομάδας [31]

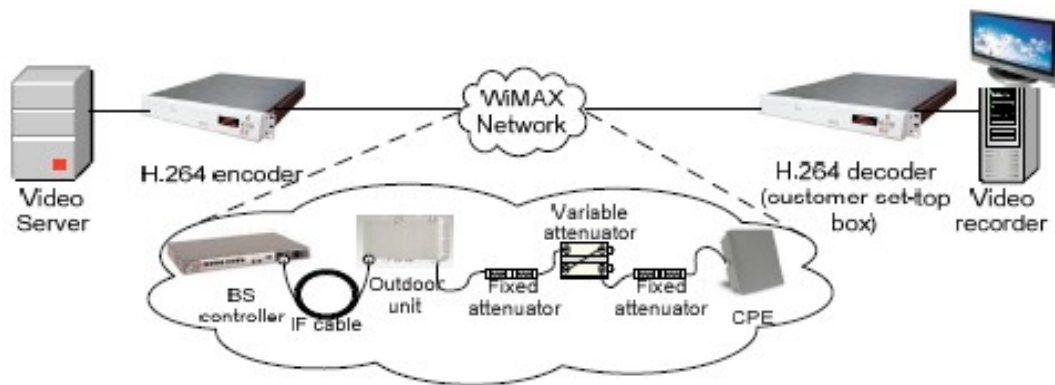


Σχήμα 5.21 Ρυθμοαπόδοση δικτύου για διάφορες τιμές της C αναλογίας κάλυψης [31]

### 5.9 Αξιολόγηση QoS παραμέτρων για τη μέτρηση της ποιότητας διανομής IPTV βίντεο μέσω δικτύου WiMAX

Κάποιες προγενέστερες μελέτες περιορίζονται κυρίως στην αξιολόγηση της μέτρησης χαρακτηριστικών όπως αυτά της ρυθμοαπόδοσης και της ισχύος του σήματος πάνω σε αληθινές WiMAX συνδέσεις ενώ κάποιες άλλες επικεντρώνονται στην ανάλυση της δομής του πρωτοκόλλου στην περίπτωση διανομής IPTV βίντεο [1, 6, 32]. Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα όρια για την παροχή SD και HD υπηρεσιών video μέσω της WiMAX τεχνολογίας κάτω από διαφορετικές συνθήκες καναλιού, κατεύθυνση κίνησης ρυθμό κωδικοποίησης και ανάλυση του βίντεο. Επίσης μελετώνται οι QoS παράμετροι, δηλαδή αυτοί της απώλειας πακέτων, της καθυστέρησης και της μεταβολής της καθυστέρησης κατά τη διανομή του SD και HD περιεχομένου.

Για την εκτίμηση της ποιότητας του διανεμηθέν βίντεο μέσω του WiMAX κάτω από διαφορετικές συνθήκες, θεωρούμε ένα WiMAX δίκτυο το οποίο αποτελείται από ένα σταθμό βάσης και τον ανάλογο εξοπλισμό στις εγκαταστάσεις των πελατών (CPE) συνδεδεμένων μεταξύ τους μέσω εξασθενητών (attenuators) για την προσομοίωση της εναέριας σύνδεσης αυτών (σχήμα 5.22). Οι δοκιμές έγιναν ένα συνδρομητή (μία CPE) προκειμένου να αξιολογηθεί η ποιότητα εμπειρίας αυτού.



Σχήμα 5.22 Σχεδιάγραμμα δικτύου δοκιμής [33]

Στον πίνακα 5.2 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά του WiMAX δικτύου με το οποίο έγιναν οι δοκιμές. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διαφορετικών ρυθμών FEC κωδικοποίησης (πίνακας 5.3). Επειδή οι εφαρμογές βίντεο απαιτούν υψηλότερο εύρος ζώνης συγκριτικά με άλλες εφαρμογές πολυμέσων όπως αυτές της φωνής, για κάθε σχήμα διαμόρφωσης επιλέχθηκε ο FEC ρυθμός κωδικοποίησης ο οποίος προσφέρει τη μέγιστη ρυθμοαπόδοση. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ο  $\frac{3}{4}$  ρυθμός για τα 64QAM, 16QAM και QPSK σχήματα διαμόρφωσης και ο  $\frac{1}{2}$  που είναι και ο μοναδικός διαθέσιμος ρυθμός για το BPSK.

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 5.2, η TDD τεχνική που χρησιμοποιείται από το WiMAX επιτρέπει την προσαρμογή της αναλογίας του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων μεταξύ της κάτω και της άνω ζεύξης σε 85/15 και 25/75 στις δύο πτώσεις μελέτης. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη για τα διάφορα σχήματα διαμόρφωσης καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ένα QAM σχήμα διαμόρφωσης προσφέρει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης των IPTV δεδομένων συγκριτικά με ένα PSK σχήμα (πίνακας

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά WiMAX δικτύου δοκιμής [33]

|                                     |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Standard compliance                 | IEEE 802.16d                 |
| Duplex mode                         | TDD, Full Duplex             |
| Channel size                        | 7 MHz                        |
| FFT size / Frame size               | 256 / 10 ms                  |
| Supported modulations               | 64QAM, 16QAM, QPSK, and BPSK |
| Transmission powers of BS/CPE       | 36 dBm / 20 dBm              |
| Total fixed attenuation signal loss | 82.6 dB                      |

**Πίνακας 5.3** Ρυθμοαπόδοσης WiMAX σύνδεσης [33]

| Modulation | Throughput (Mbps)   |     |                     |      |
|------------|---------------------|-----|---------------------|------|
|            | DL/UL ratio = 85/15 |     | DL/UL ratio = 25/75 |      |
|            | DL                  | UL  | DL                  | UL   |
| 64QAM 3/4  | 19.0                | 3.2 | 5.0                 | 17.0 |
| 16QAM 3/4  | 12.7                | 2.1 | 3.5                 | 11.5 |
| QPSK 3/4   | 6.4                 | 1.0 | 1.6                 | 5.7  |
| BPSK 1/2   | 2.0                 | 0.3 | 0.4                 | 1.9  |

5.3).

Σύμφωνα με το σχήμα 5.22 στις δοκιμές χρησιμοποιείται ένας MPEG-4 AVC/H.264 κωδικοποιητής όπου το βίντεο μπορεί να είναι μια SD (ανάλυσης 720 x 480 pixels) ή μια HD (ανάλυσης 1920 x 1080 pixels) ροή με ρυθμό μετάδοσης frame και στις 2 ροές 29.97 fps [33]. Θεωρούμε επίσης ότι αυτές οι δύο ροές διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ίση διάρκεια βίντεο.
- Ίσο μήκος frames ανά GOP
- Ίδια δομή των I, P και B frames
- Ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης του SD και του HD περιεχομένου 1 και 5 Mbps αντίστοιχα.

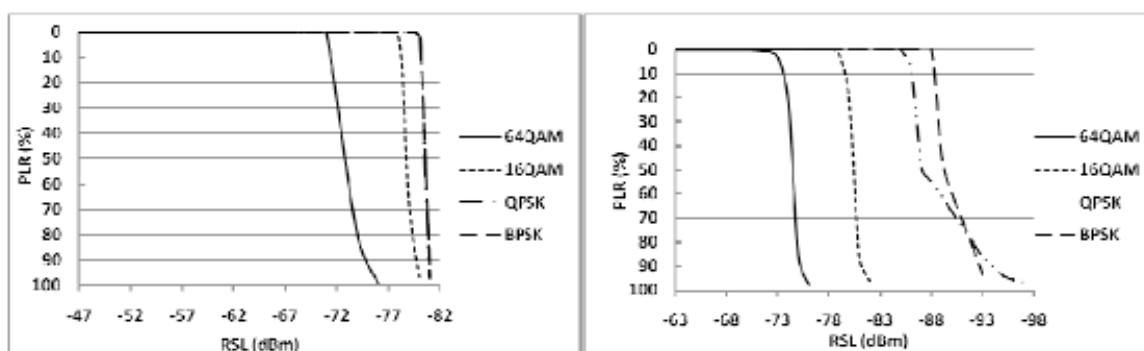
Για τη μέτρηση της ποιότητας των ροών αυτών η δοκιμή πραγματοποιήθηκε πολλές φορές κάτω από διαφορετικές συνθήκες εξασθένησης. Κάθε περίπτωση δοκιμής επαναλαμβάνεται αρκετές φορές. Η μέτρηση της μέσης ποιότητας όλων των αποκωδικοποιημένων ροών έγινε με το δείκτη μέτρησης PSNR. Ο PSNR εκφράζει το λόγο της μέγιστης πιθανής ισχύος του σήματος προς την ισχύ του αλλοιωμένου από τη μετάδοση σήματος [34]. Επίσης στις δοκιμές αυτές αξιολογήθηκε και η ποιότητα των κωδικοποιημένων ροών χωρίς τη μετάδοση τους στο δίκτυο (πίνακας 5.4). Οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα κανάλι χαρακτηρίζονται από την ισχύ του σήματος και μετριοούνται από τον RSL (Received Signal Level) δείκτη σε dBm (dB-milliwatt per meter). Ο RSL προκύπτει από την ισχύ της μετάδοσης, το κέρδος από τη χρήση κεραιών σε συνδυασμό με την εξασθένηση (π.χ. απώλεια πακέτων, παρεμβολές) .



**Πίνακας 5.4** Περιπτώσεις ελέγχου ως προς την κωδικοποίηση του βίντεο και το σχήμα διαμόρφωσης [33]

| Definition | H.264 settings |       |                 | Encoding quality | Corresponding modulation |
|------------|----------------|-------|-----------------|------------------|--------------------------|
|            | Profile        | Level | Bit rate (Mbps) | PSNR (dB)        |                          |
| SD         | Main           | 3     | 1               | 33               | BPSK 1/2                 |
|            |                |       | 4               | 36               | QPSK 3/4                 |
| HD         | High           | 4     | 5               | 33.62            | QPSK 3/4                 |
|            |                |       | 8               | 35.18            | 16QAM 3/4                |
|            |                |       | 15              | 37.3             | 64QAM 3/4                |

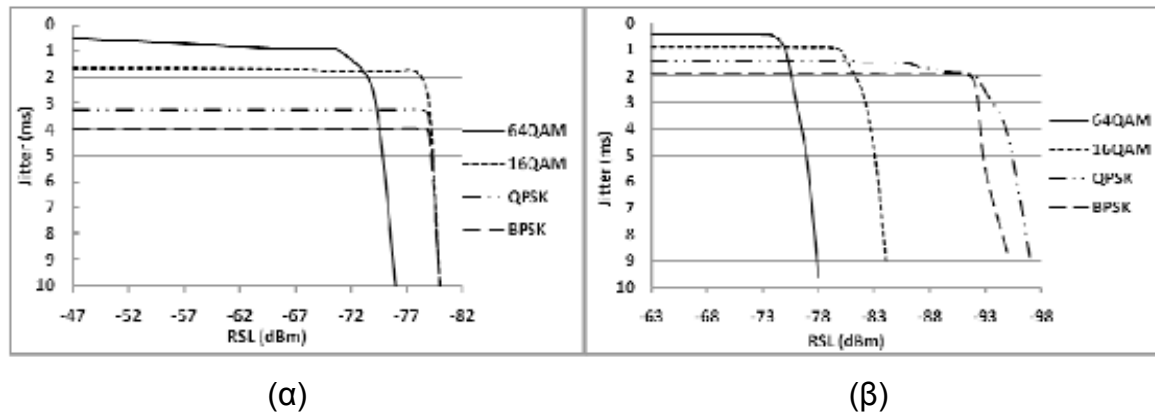
Όπως παρατηρείται στο σχήμα 5.23 η απώλεια των πακέτων είναι σχεδόν μηδαμινή μέχρι η ισχύς του σήματος να ξεπεράσει το κατώτατο επιτρεπτό όριο (threshold) όπου το σήμα χάνεται και η απώλεια των πακέτων αυξάνεται ραγδαία. Το κατώτατο αυτό όριο εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Τα κατώτατα όρια λειτουργίας για τα 64QAM και 16QAM σχήματα διαμόρφωσης είναι -71 και -78 dBm αντίστοιχα, τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη. Στην άνω ζεύξη στην περίπτωση των QPSK και BPSK σχημάτων διαμόρφωσης τα κατώτα όρια διαμορφώνονται στα -85 και -89 dBm αντιστοίχως, ενώ στην κάτω ζεύξη στα -81 dBm εξαιτίας της απώλειας του σήματος στην άνω ζεύξη λόγω της ασύμμετρης μετάδοσης ισχύος.



(α)

(β)

**Σχήμα 5.23** Απώλεια πακέτων κάτω (α) και άνω ζεύξης (β) ως προς τις διάφορες συνθήκες καναλιού [33]



Σχήμα 5.24 Μετρήσεις jitter κάτω (α) και άνω ζεύξης (β) ως προς διάφορες συνθήκες καναλιού [33]

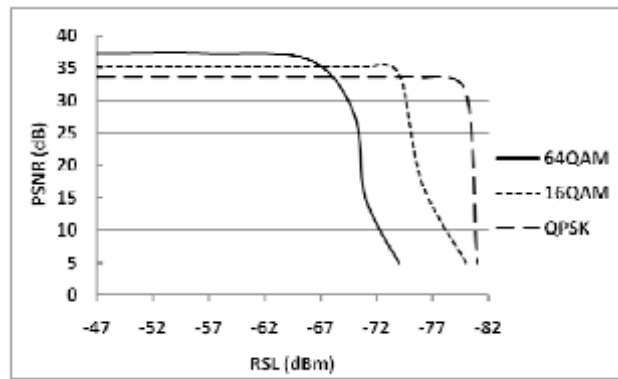
Σε όλες τις δοκιμές κάτω ζεύξης εκτός αυτές των οποίων η σύνδεση διακόπηκε απότομα εξαιτίας της απώλειας του σήματος της άνω ζεύξης, η απώλεια των πακέτων κάτω ζεύξης είναι της τάξης του  $10^{-4}$  και  $10^{-3}$ , 2 και 1 dB αντίστοιχα πάνω από το κατώτατο όριο λειτουργίας. Ωστόσο στην άνω ζεύξη η απώλεια των πακέτων είναι της τάξης του  $10^{-4}$  4 dB πάνω από το κατώτατο όριο λειτουργίας.

Ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης και συνεπώς το ρυθμό μετάδοσης των bits, οι μετρήσεις ως προς τη μεταβολή της καθυστέρησης για την κάτω ζεύξη κυμαίνονται από 0.5 έως 4 ms και από 0.5 έως 2 ms στην άνω ζεύξη (σχήμα 5.24). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της μεταβολής της καθυστέρησης δείχνουν ότι οι συνθήκες είναι ιδανικές για εφαρμογές βίντεο που είναι delay sensitive.

Οι μετρήσεις ως προς την καθυστέρηση σε μία WiMAX σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του CPE παρατηρήθηκε να είναι 35 ms με μια απόκλιση της τάξης των +/-5 ms. Γενικά η καθυστέρηση και η μεταβολή της καθυστέρησης δεν αποτελούν πρόβλημα για τη διανομή των IPTV υπηρεσιών μέσω του WiMAX εξαιτίας του ότι τα set-top boxes διαθέτουν buffers.

### 5.9.1 Ποιότητα βίντεο σε περιπτώσεις δοκιμών κάτω ζεύξης

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για ένα HD κανάλι παρατηρήθηκε ότι η υψηλότερη ποιότητα βίντεο επιτυγχάνεται με τη χρήση του 64QAM σχήματος διαμόρφωσης εξαιτίας του υψηλότερου ρυθμού κωδικοποίησης των 15 Mbps. Εντούτοις τα 37 dB του PSNR μειώνονται σε 27 dB όταν το RSL γίνεται -70 dBm (1dB πάνω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο), (σχήμα 5.25). Στην περίπτωση



**Σχήμα 5.25** Ποιότητα HD καναλιού σε περιπτώσεις δοκιμών υπό διαφορετικές συνθήκες [33]

δοκιμής με χρήση του 16QAM σχήματος διαμόρφωσης και ρυθμό κωδικοποίησης 8 Mbps, η ποιότητα είναι εμφανώς χαμηλότερη με PSNR 35 dB μέχρι η τιμή του RSL να φθάσει 3 dB πάνω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο. Οι δοκιμές για ένα HD κανάλι με ρυθμό κωδικοποίησης περιεχομένου 5 Mbps δείχνουν ότι η ποιότητα αυτού είναι χαμηλότερη ωστόσο αποδεκτή, με PSNR τιμή 33 dB έως ότου χαθεί η σύνδεση με τιμή RSL -81 dBm. Εντούτοις τα 5 Mbps ενδέχεται να μην είναι αρκετά για την κωδικοποίηση κάποιων σύνθετων HD σκηνών. Συνεπώς σε ένα βίντεο όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του PSNR τόσο μεγαλύτερο είναι το RSL και άρα η ποιότητα της εικόνας.

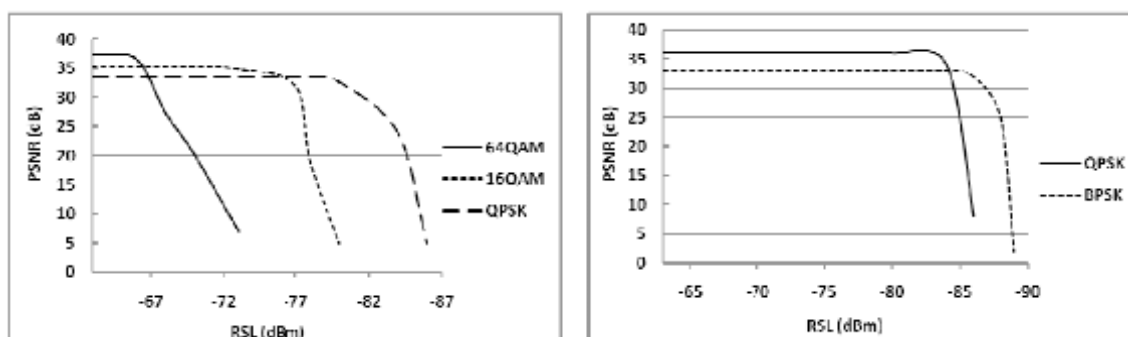
Οι δοκιμές σε ένα SD κανάλι δίνουν μια σταθερή ποιότητα βίντεο μέχρι η σύνδεση να χαθεί εξαιτίας της ασυμμετρίας της ισχύος μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης. Στα 4 Mbps του QPSK σχήματος διαμόρφωσης η ποιότητα είναι αρκετά καλή με τιμή PSNR 36 dB. Το BPSK σχήμα το οποίο μπορεί να υποστηρίξει ρυθμό κωδικοποίησης μόνο 1 Mbps προσφέρει μια αποδεκτή ποιότητα του βίντεο με τιμή PSNR 33.1 dB.

Συνεπώς σε περίπτωση επιλογής των QPSK και BPSK σχημάτων διαμόρφωσης στην κάτω ζεύξη η ποιότητα παραμένει σταθερή έως ότου χαθεί η σύνδεση ενώ στην περίπτωση επιλογής των 64QAM και 16QAM σχημάτων η ποιότητα αρχίζει να μειώνεται πριν το RSL πάρει την κατώτατη τιμή του. Έτσι για τη διατήρηση μιας καλής ποιότητας προτείνεται η λειτουργία των QAM σχημάτων διαμόρφωσης με τιμή RSL 2-3 dB πάνω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο.

### 5.9.2 Ποιότητα βίντεο σε περιπτώσεις δοκιμών άνω ζεύξης

Η άνω ζεύξη δεν επηρεάζεται από την ασύμμετρη ισχύ της μετάδοσης. Η υψηλότερη HD ποιότητα όπως δείχνει το σχήμα 5.26(α), παρατηρείται για το 64QAM σχήμα διαμόρφωσης με τιμή PSNR 37 dB, η οποία διαρκεί για ένα μικρό εύρος RSL τιμών. Αν και η σύνδεση σε ένα 64QAM κανάλι άνω ζεύξης διατηρείται όταν το RSL είναι περίπου -71 dBm, στην περίπτωση των 15 Mbps η ποιότητα του βίντεο ξεκινά να φθίνει στα -67 dBm. Το ίδιο παρατηρείται και στις περιπτώσεις των 8 και 5 Mbps αντιστοίχως εκτός του ότι η ποιότητα του βίντεο φθίνει απότομα. Η μέγιστη εφικτή ποιότητα του βίντεο για κάθε περίπτωση δοκιμής παρατηρείται όταν η τιμή του RSL είναι 3 dB μεγαλύτερη από το κατώτατο επιτρεπτό όριο κάθε σχήματος διαμόρφωσης. Ακόμη κι αν ένα σήμα άνω ζεύξης συνεχίζει να διαβιβάζεται κοντά στο κατώτατο επιτρεπτό όριο το βίντεο δεν είναι παρακολουθήσιμο.

Στο σχήμα 5.26(β) απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μέτρησεων για τις περιπτώσεις δοκιμών του SD βίντεο. Για τις δοκιμές των 4 Mbps του QPSK σχήματος διαμόρφωσης η ποιότητα του SD βίντεο είναι αρκετά καλή με τιμή PSNR 36 dB έως ότου η τιμή του RSL να φθάσει στα -84 dBm, η οποία είναι μόλις 1 dB μεγαλύτερη από το κατώτατο επιτρεπτό όριο. Ωστόσο στην περίπτωση δοκιμής HD βίντεο με ρυθμό κωδικοποίησης 5 Mbps, το οποίο χρησιμοποιεί επίσης το QPSK σχήμα διαμόρφωσης, η τιμή του RSL απαιτείται να είναι τουλάχιστον κατά 3 dB μεγαλύτερη για να διατηρεί την ίδια ποιότητα. Συνεπώς το SD βίντεο παρουσιάζει μεγαλύτερη ανεκτικότητα στους υψηλούς ρυθμούς απώλειας πακέτων. Η περίπτωση δοκιμής SD βίντεο ρυθμού κωδικοποίησης 1 Mbps,



Σχήμα 5.26 HDTV και SDTV ποιότητα για περιπτώσεις δοκιμών υπό διαφορετικές συνθήκες καναλιού [33]

δείχνει ότι η σταθερή αντιληπτή ποιότητα με τιμή PSNR 33 dB, αρχίζει να φθίνει όταν το RSL είναι 2 dBm μεγαλύτερο από το κατώτατο όριο (-89 dBm). Γενικά όταν η τιμή του RSL είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα κατώτατα όρια λειτουργίας η ποιότητα του βίντεο είναι η ίδια τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη. Συνίσταται λοιπόν για την άνω ζεύξη HD βίντεο το RSL να είναι 3-4 dB μεγαλύτερο από το κατώτατο όριο λειτουργίας και 1-2 dB στην άνω ζεύξη του SD βίντεο.

Συνοψίζοντας σε ένα περιβάλλον οπτικής επαφής το RSL είναι μεγαλύτερο από -70 dBm, ενώ σε ένα περιβάλλον μη οπτικής επαφής είναι τις περισσότερες φορές είναι μικρότερο από -70 dBm. Συνεπώς είναι γνωστή εκ των προτέρων η υπηρεσία που μπορεί να υποστηριχθεί και η αντιληπτή ποιότητα της υπηρεσίας αυτής.

Η προσαρμοστική διαμόρφωση πρέπει να συνδυάζεται με τους H.264 κωδικοποιητές οι οποίοι αλλάζουν δυναμικά το ρυθμό κωδικοποίησης των bit και τον προσαρμόζουν στο ρυθμό αλλαγής του καναλιού, διατηρώντας την ίδια ανάλυση. Στην περίπτωση που οι κωδικοποιητές είναι κάποιο λογισμικό, ενδείκνυται η χρήση της SVC μεθόδου κωδικοποίησης του βίντεο.

### **5.10 Προτεινόμενες βελτιώσεις - Προβλέψεις**

Το WiMAX σχεδιάστηκε για τη διανομή υπηρεσιών κινητής τηλεόρασης σε συσκευές μικρής οθόνης και ως μια εναλλακτική λύση ασύρματης προσβασης έναντι αυτής της DSL τεχνολογίας για υπηρεσίες σταθερής τηλεόρασης. Ωστόσο το WiMAX δεν αποτελεί βιώσιμη λύση για τις σταθερές IPTV υπηρεσίες. Αυτό θεωρείται ότι ισχύει όχι διότι το WiMAX αποτυγχάνει στην ικανοποίηση των QoS απαιτήσεων των IPTV υπηρεσιών, αλλά λόγω της χωρητικότητας και ειδικά από τη στιγμή που υπάρχει πίεση για την παροχή περισσότερου εύρους ζώνης εκ μέρους των κατασκευαστών των καλωδιακών και DSL υποδομών για τις αναδυόμενες HD υπηρεσίες. Με τη χωρητικότητα να εξαρτάται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης, πιστεύεται ότι το WiMAX αποτελεί προτιμότερη λύση για τη διανομή IPTV υπηρεσιών εν κινήσει. Ενώ το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τη διανομή SD καναλιών είναι τουλάχιστον 2 Mbps σε συσκευές κανονικής οθόνης, στην περίπτωση της mobile TV το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι 500 Kbps για QVGA (Quarter VGA) μέγεθος οθόνης. Σε αυτή την περίπτωση διανομής IPTV είναι εφικτή η περαιτέρω συμπίεση του εύρους ζώνης μέσω της στατιστικής

πολυπλεξίας (statical multiplexing) η οποία εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα διάφορα κανάλια έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης ανάλογα με τις απαιτήσεις αυτής. Αυτό επιτρέπει στα κανάλια το δανεισμό επιπλέον χωρητικότητας από άλλα κανάλια επιτρέποντας τη διατήρηση της ποιότητας με ένα συνολικά χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Συγκεκριμένα ο μέσος ρυθμός μετάδοσης για ένα κανάλι κατά τη χρήση QVGA συσκευών μπορεί να μειωθεί από 500 σε 200 Mbps.

Τα ζητήματα ποιότητας υπηρεσίας έχουν επιλυθεί κατά ένα μεγάλο μέρος μέσω του συνδυασμού των MIMO και OFDM τεχνικών. Η MIMO τεχνική μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών από τον πομπό και το δέκτη, δημιουργεί επιπλέον εύρος μέσα σε ένα δεδομένο φάσμα ζώνης συχνοτήτων χωρίς την απαίτηση για αύξηση της ισχύος. Επιπλέον τα ίδια δεδομένα μπορούν να αποσταλούν μέσω διαφορετικών διαδρομών και συνεπώς εάν σε μία συγκεκριμένη διαδρομή δημιουργούνται παρεμβολές, ενδεχομένως σε κάποια άλλη να μη δημιουργούνται. Ωστόσο το γεγονός ότι τα σήματα ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές μπορεί να κάνει τα ίδια να αποτελούν αιτία παρεμβολών, λόγω του ότι η διανομή τους μέσω διαφορετικών μονοπατιών απαιτεί διαφορετικούς χρόνους μέχρι να ολοκληρωθεί η μεταφορά τους. Στο σημείο αυτό η OFDM τεχνική, μετριάζει αυτό το φαινόμενο μέσω της διαβίβασης των ίδιων πληροφοριών σε διαφορετικές συχνότητες με την ελπίδα ότι τουλάχιστον μία από αυτές θα διανεμηθεί χωρίς παρεμβολές. Ο στόχος αυτών των τεχνικών είναι να παρασχεθεί επιπλέον ανθεκτικότητα και χωρητικότητα κατά τη διαβίβαση μέσω διαφορετικών συχνοτήτων και μονοπατιών. Εντούτοις υπάρχουν δύο ζητήματα ποιότητας της υπηρεσίας τα οποία δεν έχουν επιλυθεί οριστικά ακόμη και τα οποία σχετίζονται με τη μετάδοση βίντεο από συσκευές που κινούνται σε υψηλές ταχύτητες κατά τη μετακίνηση με αυτοκίνητο ή τρένο. Το ένα από αυτά εντοπίζεται κατά τη μετακίνηση των συσκευών από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλο (γειτονικά cells) όπου μπορεί να υπάρξει μια προσωρινή απώλεια ή διακοπή της εικόνας κατά το συντονισμό του δέκτη στη διαφορετική συχνότητα που χρησιμοποιεί ο νέος σταθμός βάσης που εισέρχεται. Αν και αυτό το πρόβλημα για τις εφαρμογές φωνής φαίνεται να έχει επιλυθεί, ωστόσο είναι ορατό κατά τη διανομή βίντεο με ταχύτητα κίνησης των φορητών συσκευών μεγαλύτερη των 88 Km/h [3]. Το όριο αυτό είναι μικρότερο από τη μέση ταχύτητα των αυτοκινήτων στις περισσότερες χώρες και φυσικά αρκετά μικρότερο από την ταχύτητα των τρένων. Το δεύτερο πρόβλημα εμφανίζεται όταν μία κινητή

συσκευή για κάποιο λόγο χάνει προσωρινά το σήμα της όπως στην περίπτωση της εισόδου της σε κάποια σήραγγα. Αν και δεν υπάρχει κάποια συμφωνηθείσα τυποποιημένη λύση για το κάθε ένα από αυτά τα πρόβληματα, υπάρχουν μερικοί μηχανισμοί που με την προσεκτική εφαρμογή τους μπορούν να μετριάσουν και αυτά τα προβλήματα. Μέσω του SFN (Single Frequency Network) μηχανισμού του WiMAX, ένα βίντεο μπορεί να διανεμηθεί στο χρήστη ταυτόχρονα μέσω πολλαπλών γειτονικών σταθμών βάσης, οι οποίοι θα χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι συχνοτήτων. Η προσέγγιση αυτή είναι εφικτή με τη χρήση ψηφιακών τεχνικών διαμόρφωσης όπως η OFDM για την αποφυγή της παραδιοφωνίας (Co-Channel Interference - CCI) που προκαλούν οι σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα [35]. Έτσι ο δέκτης αναδημιουργεί το κανάλι από τις ροές που του διαβιβάζονται μέσω των διαφόρων σταθμών βάσης και απαιτεί ακριβή συγχρονισμό μεταξύ των ροών αυτών. Για την επίλυση του προβλήματος που δημιουργείται από την είσοδο του χρήστη σε μία σήραγγα έχει προταθεί η χρήση της iFEC (incremental Forward Error Correction) τεχνικής η οποία αρχικά προοριζόταν για τη μετάδοση δορυφορικής τηλεόρασης. Με τη συνήθη FEC τεχνική επιπλέον bits προστίθενται στο ωφέλιμο φορτίο για να επιτρέψουν στη συσκευή λήψης να ανακτήσει πλήρως τα frames των δεδομένων σε περίπτωση διακοπής της μετάδοσης. Εάν η διακοπή ή η απώλεια των bits ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, η FEC πρέπει να αποστείλει ολόκληρο το frame ξανά. Καθώς τα frames είναι αρκετά μεγάλα, η επαναμετάδοση τους μπορεί να επιφέρει σημαντική καθυστέρηση και συνεπώς τη διακοπή της ροής του βίντεο. Για τον παραπάνω λόγο προτείνεται η iFEC τεχνική, βάσει της οποίας αποφεύγεται η ανάγκη της επαναμετάδοσης ολόκληρων των frames στην περίπτωση σφάλματος των bits αναλύοντας κάθε frame σε μπλοκ δεδομένων. Τα μπλοκ τα οποία δε διακόπτονται αποθηκεύονται στο buffer του δέκτη και επανασυνδυάζονται με τα μπλοκ που επαναμεταδίδονται λόγω της διακοπής. Έτσι μειώνεται η καθυστέρηση που προκαλείται λόγω των επαναμεταδόσεων, επιτρέποντας σε έναν κινούμενο δέκτη να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό τουλάχιστον για τις σήραγγες μικρού μήκους.

Τέλος κάποιοι σημαντικοί προμηθευτές διανομής IPTV υπηρεσιών όπως η Motorola θεωρούν τη διανομή των IPTV υπηρεσιών μέσω του WiMAX μακροπρόθεσμα βιώσιμη, υποστηρίζοντας ότι ο περιορισμός εύρους ζώνης είναι μόνο προσωρινός [3].

### 5.11 Επίλογος

Για τη μετάδοση πολυεκπομπής ενός IPTV over WiMAX συστήματος προτείνεται η εκμετάλλευση της ποικιλόμορφης εξασθένισης των καναλιών με την εφαρμογή της Superposition Coded Multicasting τεχνικής (SPCM), η οποία διακρίνει τη μετάδοση των δεδομένων σε δύο επίπεδα ποιότητας κάθε ένα από τα οποία χρησιμοποιεί διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης. Η βέλτιστη επιλογή σχημάτων διαμόρφωσης βοηθά στη βέλτιστη κατανομή του ρυθμού μετάδοσης

Αν και η προηγούμενη προσέγγιση είναι αποτελεσματική στην περίπτωση της ποικιλομορφίας των χρηστών, αποτυγχάνουν να διατηρήσουν/προστατέψουν της ποιότητα των ροών εικόνας. Για τη διατήρηση της ποιότητας της εικόνας σε συνθήκες διακύμανσης του καναλιού υιοθετείται η layered Multiple Description Coding (MDC) τεχνική η οποία προσφέρει τη δυνατότητα μερικής λήψης των πακέτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με τη SPCM τεχνική στο κανάλι και την εξελικτική κωδικοποίηση βίντεο. Συνεπώς δεν είναι πλέον απίθανό για ένα σταθμό συνδρομητή να λάβει δεδομένα ενός υψηλότερου επιπέδου ποιότητας υπό τις «κακές» συνθήκες στο κανάλι του, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό μόνο με τη χρήση της SPCM τεχνικής.

Ένα απλό σχήμα multicast διανομής όπως είναι αυτό που εφαρμόζεται στην περίπτωση των CDMA 2000 1XEV-DO δικτύων υιοθετεί μια σταθερή προσέγγιση ρυθμού μετάδοσης δεδομένων αγνοώντας τις διαφορετικές συνθήκες καναλιών που ενδέχεται να επικρατούν μεταξύ των μελών μιας multicast ομάδας. Προτείνεται λοιπόν ένα συνεργατικό (cooperative) multicast σχήμα, το οποίο εκμεταλλεύεται το κέρδος από τη χωρική ποικιλομορφία μεταξύ των πολλαπλών χρηστών με τη χρήση της συνεργατικής μετάδοσης δύο φάσεων. Συγκεκριμένα οι χρήστες οι οποίοι διαθέτουν «καλές» συνθήκες καναλιού προωθούν τα δεδομένα που λαμβάνουν στους υπόλοιπους χρήστες της ομάδας. Το σχήμα αυτό βελτιώνει τη ρυθμοαπόδοση τόσο στο επίπεδο της multicast ομάδας όσο και για κάθε επιμέρους μέλος της ομάδας, διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία της μετάδοσης για τους σταθμούς συνδρομητών των οποίων οι συνθήκες των καναλιών δεν είναι «καλές».



## 5.12 Βιβλιογραφία

- [1] F. E. Retnasothie, M. K. Ozdemir, T. Yucek “Wireless IPTV over WiMAX: Challenges and Applications”, Department of Electrical Engineering, Tampa, FL
- [2] J. She, F. Hou, P.-H. Ho and L.-L. Xie, “IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges, and Solutions”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no 8, pp.87-93, Aug. 2007.
- [3] [http://www.cable-satellite.com/pdf/features/jan-feb\\_2008/22\\_wireless.pdf](http://www.cable-satellite.com/pdf/features/jan-feb_2008/22_wireless.pdf)
- [4] <http://etutorials.org/Networking/wimax+technology+broadband+wireless+access/Part+Three+WiMAX+Multiple+Access+MAC+Layer+and+Qos+Management/Chapter+7+Convergence+Sublayer+CS/7.5+Payload+Header+Suppression+PHS/>
- [5] <http://mobilewireless.wordpress.com/2009/09/09/payload-header-suppression-for-wimax/>
- [6] I. V. Uilecan, C. Zhou, G. E. Atkin, “*Framework for Delivering IPTV Services over WiMAX Wireless Networks*,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Electro/Information Tech.*, 2007.
- [7] [http://cavendish.homedns.org/nfoec\\_wimax\\_transport.pdf](http://cavendish.homedns.org/nfoec_wimax_transport.pdf)
- [8] T. M. Cover, “Broadcast channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-18, pp. 2–14, Jan. 1972.
- [9] P. P. Bergmans and T. M. Cover, “Cooperative Broadcasting,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-20, pp. 317–324, May 1974.
- [10] S. Bopping, J. M. Shea, “Superposition coding in the downlink of CDMA cellular systems”, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 3-6 April 2006, Volume: 4, pp: 1978-1983
- [11] J. Kim, J. Cho, and H. Shin "Resource allocation for scalable video broadcast in wireless cellular Networks," in *Proc. IEEE WiMob.*, vol.2, pp.174-180, Aug. 2005.
- [12] T. S. Rappaport, *Wireless communications: Principles and practice*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ , Oct. 1995.
- [13] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [14] J. She, F. Hou, and P.-H. Ho, “An Application-Driven MAC-layer Buffer Management with Active Dropping for Real-time Video Streaming in 802.16 Networks”, *Proc. of IEEE 21st International Conference on Advanced Networking and Applications*, pp.451-458, Niagara Falls, Canada, 2007.
- [15] J. Gross, J. Klaue, H. Karl and A. Wolisz, “Cross-layer Optimization of OFDM Transmission Systems for MPEG-4 Video Streaming,” *Comp. Commun.*, vol. 27, no. 11, pp. 1044–55, Jul. 1, 2004.
- [16] Y. Shan and A. Zakhori, “Cross Layer Techniques for Adaptive Video Streaming over Wireless Networks,” *IEEE Int’l. Conf. Multimedia and Expo*, Lausanne, Switzerland, Aug. 26–29, 2002.
- [17] P. Buccioli, G. Davini, E. Masala, E. Filippi and J.C. De Martin, “Cross-layer Perceptual ARQ for H.264 Video Streaming over 802.11 Wireless Networks,” *Proc. Of IEEE GLOBECOM*, vol. 5, pp. 3027-3031, Nov.-Dec. 2004.
- [18] M. van der Schaar, S. Krishnamachari, S. Choi and X. Xu, “Adaptive Cross-Layer Protection Strategies for Robust Scalable Video Transmission over 802.11 WLANs,” *IEEE JSAC*, vol. 21, no. 10, pp. 1752–63, Dec. 2003.

- [19] J. Song and K. J. Ray Liu, "An Integrated Source and Channel Rate Allocation Scheme for Robust Video Coding and Transmission over Wireless Channels," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2004, no. 2, pp. 304-316, 2004.
- [20] J. Byers *et al.*, "A digital fountain approach to asynchronous reliable multicast," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 8, pp. 1528-1540, Oct. 2002.
- [21] W. Ge, J. Zhang and S. Shen, "A Cross-Layer Design Approach to Multicast in Wireless Networks", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 1063-1071, 2007.
- [22] [http://wiki.multimedia.cx/index.php?title=Scalable\\_Video\\_Coding](http://wiki.multimedia.cx/index.php?title=Scalable_Video_Coding) (Τελευτ. Πρόσβ. 06/04/2010)
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scalable\\_Video\\_Coding](http://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Video_Coding) (Τελευταία πρόσβαση 06/04/2010)
- [24] J. She, X. Yu, P.-H. Ho and E.-H. Yang, "A Cross-Layer Design Framework for Robust IPTV Services over IEEE 802.16 Networks ", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, pp. 235-245, Feb. 2009.
- [25] [http://en.wikipedia.org/wiki/Reed-Solomon\\_error\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Reed-Solomon_error_correction) (Τελευτ. πρόσβαση 30/03/2010)
- [26] IEEE Standard 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," 2004.
- [27] P. Agashe, R. Rezaifar, and P. Bender, "CDMA2000 High Rate Broadcast Packet Data Air Interface Design", *IEEE Communications Magazine*, pp. 83-89, Feb. 2004.
- [28] A. Coso, S. Savazzi, U. Spagnolini, and C. Ibars, "Virtual MIMO Channels in Cooperative Multi-hop Wireless Sensor Networks", *Proc. Information Sciences and Systems*, pp. 75-80, Mar. 2006.
- [29] M. Dianati, X. Shen, and K. Naik, "Cooperative Fair Scheduling for the Downlink of CDMA Cellular Networks", *IEEE Trans. on Vehicular Techno.*, vol. 56, no. 4, pp. 1749-1760, July 2007.
- [30] V. Mahinthan, L. Cai, J.W. Mark, and X. Shen, "Maximizing Cooperative Diversity Energy Gain for Wireless Networks", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.6, no. 7, pp. 2530-2539, July 2007.
- [31] F. Hou, L. X. Cai, J. She, P.-H. Ho, X. Shen, and Junshan Zhang, "Cooperative Multicast Scheduling Scheme for IPTV Service over IEEE 802.16 Networks", 2008.
- [32] Tsitserov, D., Markarian, G., Manuylov, I.: Real-Time Video Distribution over WiMAX Networks. In: Proc. Annual Postgraduate Symposium, Liverpool, UK (2008)
- [33] O. Issa, W. - L., H. Liu "WiMAX TV: Possibilities and Challenges", 2009
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/Peak\\_signal-to-noise\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Peak_signal-to-noise_ratio) (Τελευταία πρόσβαση 12/04/2010)
- [35] [http://www.wireie.com/pdfs/wimax\\_broadcast\\_industry\\_ver\\_2.5.pdf](http://www.wireie.com/pdfs/wimax_broadcast_industry_ver_2.5.pdf) (Τελ. πρόσβ. 25/03/2010)



