

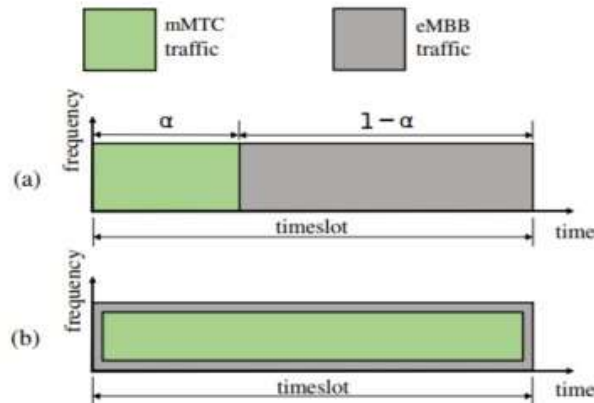


ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προσομοίωση και μελέτη ταυτόχρονης λήψης δεδομένων  
ευρυζωνικών υπηρεσιών και Διαδικτύου των Πραγμάτων  
με τεχνική μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης  
(NOMA)»



Του φοιτητή  
ΖΙΑΠΩΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ  
Αρ. Μητρώου: 52006Μ

Επιβλέπων  
ΙΩΣΗΦΙΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2023

Τίτλος Δ.Ε. «Προσομοίωση και μελέτη ταυτόχρονης λήψης δεδομένων ευρυζωνικών υπηρεσιών και Διαδικτύου των Πραγμάτων με τεχνική μη ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA)».

Κωδικός Δ.Ε. 21389

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: ΖΙΑΠΩΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ  
Όνοματεπώνυμο εισηγητή: ΙΩΣΗΦΙΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ  
Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 20/10/2021  
Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30/09/2023

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή ΖΙΑΠΩΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«...στην σύζυγό μου Εύη, που με άντεξε!!»*

## Πρόλογος

Οι τηλεπικοινωνίες, ανέκαθεν αποτελούσαν τον συνδετικό ιστό μεταξύ των ανθρώπων που δεν είναι στο ίδιο μέρος και υπάρχει απόσταση μεταξύ τους.

Από τις φρυκτωρίες του αρχαίου παρελθόντος, μέχρι το σήμερα, τίποτα δεν είναι ίδιο σε αυτό το επίπεδο, εκτός από το όνομα. Αυτό οφείλεται στον διαρκή και ασταμάτητο αγώνα του ανθρώπου να προκαλεί τον εαυτό του και να εξελίσσεται.

Ζούμε πλέον, στην εποχή του 4G και περνάμε στην, πολλά υποσχόμενη, εποχή του 6G. Η συγκεκριμένη εργασία, που παρατίθεται σε αυτό το έγγραφο, αποτελεί μια ειλικρινή και σοβαρή προσπάθεια ανάδειξης και καταγραφής, της βελτίωσης των κανόνων χρήσης του 5G. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μικρό βήμα στην διαρκή εξέλιξη που αναφέρεται πιο πάνω, γιατί πραγματεύεται τα αποτελέσματα μιας πολλά υποσχόμενης τεχνικής, της NOMA, με την οποία η εκμετάλλευση των ραδιοπόρων (radio resources) από τους χρήστες, βελτιώνεται πάρα πολύ.

Σε προσωπικό επίπεδο, θεωρώ ότι κέρδισα πάρα πολλά, γιατί μου δόθηκε η ευκαιρία να κατανοήσω σε βάθος την λειτουργία και τους κανόνες κινητής τηλεφωνίας. Μελέτησα τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται και είδα εκ των έσω, πως ένα device (όχι απαραίτητα κινητό τηλέφωνο, αλλά οτιδήποτε είναι σε θέση και μπορεί να δικτυωθεί), συμμετέχει σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, σε επίπεδο φορέα (L1).

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας, πιστεύω ξεκαθάρισα πολλά ερωτήματα και διευκρίνισα πολλά σημεία, στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

## Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία ασχολείται με μια από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις των συστημάτων κινητής επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G): την υποστήριξη πολύ μεγάλου αριθμού συσκευών (ένα εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο) Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things), που στο πλαίσιο του 5G εντάσσονται στην κατηγορία υπηρεσιών μαζικής επικοινωνίας τύπου μηχανής (massive Machine Type Communications, mMTC), σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή.

Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνήσει αν αυτός ο εξαιρετικά μεγάλος αριθμός συσκευών μπορεί να υποστηριχτεί χωρίς επιπρόσθετη χρήση ραδιοπόρων (radio resources) αλλά με την από κοινού χρήση των ραδιοπόρων που χρησιμοποιούν ήδη για την επικοινωνία τους χρήστες ενισχυμένης ευρυζωνικής κινητής επικοινωνίας (enhanced Mobile BroadBand, eMBB). Η από κοινού χρήση ραδιοπόρων πραγματοποιείται με την χρήση της τεχνικής μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), όπου οι χρήστες mMTC επιχειρούν να μεταδώσουν τα μικρά μηνύματά τους χωρίς προηγούμενη ανάθεση πόρων από το Σταθμό Βάσης, επί των ίδιων πόρων χρόνου και συχνότητας (αλλά με κατάλληλο επίπεδο ισχύος εκπομπής) με τα δεδομένα υψηλής ταχύτητας των χρηστών eMBB. Η τεχνική αυτή, εφόσον αποδειχτεί αποτελεσματική, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο αριθμό εξοικονόμησης πόρων, τόσο στο επίπεδο της μετάδοσης δεδομένων, όσο και στο επίπεδο της μετάδοσης μηνυμάτων ελέγχου.

Η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση προσομοίωσης, που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab για το σκοπό αυτό, ακολουθώντας τις διαδικασίες, συνθήκες και παραδοχές της διεθνούς βιβλιογραφίας και των σχετικών προδιαγραφών κατά το δυνατό περισσότερο. Σκοπός δεν ήταν η ακριβής και λεπτομερής αναπαράσταση των διαδικασιών επικοινωνίας, αλλά η προσεγγιστική μελέτη που θα αναδείξει δυνατότητες, προβλήματα και ζητήματα για περαιτέρω μελέτη.

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν τις προσδοκίες της εργασίας και έδειξαν πως είναι εφικτή η χρήση της τεχνικής NOMA για την οικονομία ραδιοπόρων στο πιο πάνω πλαίσιο. Ο απαιτούμενος αριθμός συσκευών mMTC μπορεί να υποστηριχτεί με ικανοποιητικές πιθανότητες επιτυχίας των πακέτων τους (που δεν ανήκουν στην κατηγορία κρίσιμων πληροφοριών) και χωρίς πολύ σημαντική επίδραση στους υφιστάμενους χρήστες eMBB ενώ μελετήθηκαν σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

# «Simulation and case study of Wide-Band and IoT services simultaneous data reception, using Non-Orthogonal Multiple Access»

ANTONIOS ZIAPONIS

## **Abstract**

This thesis deals with one of the most significant requirements of the fifth generation (5G) mobile communications: the support of very large numbers (one million per square kilometer) of Internet of Things (IoT) devices, which in the context of 5G belong to the massive Machine Type Communications (mMTC) use case.

The purpose of the work is to investigate if this very large number can be supported without the additional use of radio resources but with the joint use of the radio resources that enhanced Mobile BroadBand (eMBB) users already use for communication. The common use of radio resources is applied by using the Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique, where mMTC users transmit their short messages without prior allocation of resources from the Base Station, on the same time and frequency resources (but with an appropriate transmit power level) with the high-speed data of eMBB users. This technique, if proven effective, can reach a large number of resource savings, both at the level of data transmission and at the level of control message transmission.

The above study was carried out using a simulation, developed in a Matlab environment for this purpose, following the procedures, conditions, and assumptions of the international literature and the relevant specifications as much as possible. The purpose was not the exact and detailed representation of the communication processes, but the proximate study that will highlight possibilities, problems, and issues for further study.

The results confirmed the expectations of the work and showed that it is possible to use the NOMA technique for saving radio resources in the context abovementioned. The required number of mMTC devices can be supported with satisfactory success probabilities of their packets (not belonging to the critical information category) and without too significant impact on existing eMBB users while important parameters affecting system performance were studied.

## Ευχαριστίες

Η εκπόνησης αυτής της εργασίας ήταν αρκετά απαιτητική. Ευχαριστώ τα μέγιστα, την οικογένειά μου, που συμπαραστάθηκε αρωγός καθ' όλη την διάρκεια της. Την γυναίκα μου για την κατανόησή της και την ψυχολογική στήριξή της, καθώς και τα παιδιά μου που με τον τρόπο και την συμπεριφορά τους έκαναν την προσπάθεια πιο ανάλαφρη. Με την βοήθειά τους και την υπομονή τους, μετέτρεψαν την προσπάθεια αυτή σε ομαδική επιτυχία.

Ιδιαίτερη μνεία δικαιωματικά, στον εισηγητή – καθηγητή μου, κ. Ιωσηφίδη Αθανάσιο, ο οποίος με τις γνώσεις του και την εμπειρία του, συνέβαλε τα μέγιστα καθ' όλη την διάρκεια και στάδια της προσπάθειας. Δεν είναι υπερβολή να τονίσω ότι χωρίς την αμέριστη συμπαράστασή του, η πραγματοποίηση της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή, εντός χρονικού πλαισίου.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract .....	vi
Ευχαριστίες .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος εικόνων .....	x
Συντομογραφίες.....	xiii
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1ο: ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 5 <sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ και NOMA .....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Περιγραφή του 5G.....	3
1.3 Βήματα μεταφοράς δεδομένων .....	7
1.4 NOMA.....	8
1.5 SIC.....	9
1.6 Random Access .....	10
CBRA (4-steps, 2-steps).....	10
Κεφάλαιο 2ο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	13
2.1 Γενική περιγραφή συστήματος.....	13
2.2 Θεωρητική ανάπτυξη .....	14
2.3 Προκαταρτικοί υπολογισμοί .....	16
2.4 Μοντέλο Συστήματος.....	17
2.4.1 Σταθμοί Βάσης .....	17
2.4.2 Χαρακτηριστικά των χρηστών .....	18
2.4.3 Random Access .....	18
2.4.4 Power Control.....	19
2.4.5 AMC – Adaptive Modulation and Coding.....	19
2.4.6 Poisson Distribution .....	21
2.4.7 Traffic Model .....	21
2.4.8 NOMA.....	25
2.4.9 Hot Points.....	26
2.5 Μοντέλο καναλιού .....	26
2.6 Υπολογισμός του περιθωρίου παρεμβολής και του πλήθους των reTX των mMTCs.....	28



Κεφάλαιο 3ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Simulation Flow Chart .....	31
3.3 Επεξήγηση του προγράμματος προσομοίωσης.....	34
3.3.1 Απόδοση αρχικών τιμών .....	34
3.3.2 Παραμετροποίηση χρηστών .....	35
3.3.3 Υπολογισμός του SNR <sub>cqi</sub> για τους eMBB και τους mMTC χρήστες.....	36
3.3.4 Δημιουργία και τοποθέτηση των χρηστών.....	37
3.3.5 Κατάταξη χρηστών στους Σταθμούς Βάσης .....	38
3.3.6 Δημιουργία των Traffic Types .....	39
3.3.7 Ορισμός των ποσοστών (Profile κίνησης) και απόδοση στους χρήστες mMTC .....	39
3.3.8 Απόδοση των εκπομπών στα Time Slots .....	41
3.3.9 Αλλαγές θέσεων στους eMBB και υπολογισμός απωλειών.....	41
3.3.10 Υπολογισμός αποδεκτής παρεμβολής ( $P_{interf}$ ).....	43
3.3.11 Υπολογισμός OMA .....	44
3.3.12 Υπολογισμός NOMA .....	44
Κεφάλαιο 4ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	49
Κεφάλαιο 5ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α –Ρουτίνα υπολογισμού BLER eMBB.....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Ρουτίνα αντιστοίχισης SNR vs BLER .....	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Ρουτίνα υπολογισμού BLER mMTC.....	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Ρουτίνα υπολογισμού του PL.....	68

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα	1.1	Παραδείγματα 5G υπηρεσιών
Εικόνα	1.2	5G scenarios according to key capabilities
Εικόνα	1.3	The three 5G spectrum bands
Εικόνα	1.4	Διαχωρισμός φάσματος ανά τεχνολογία
Εικόνα	1.5	Πρόγνωση κάλυψης
Εικόνα	1.6	NSA vs SA 5G configuration
Εικόνα	1.7	Benefits of 5G-SA
Εικόνα	1.8	UL Data transfer steps
Εικόνα	1.9	5G OFDM Frame structure
Εικόνα	1.10	5G subframe
Εικόνα	1.11	Radio Resources overlapping (NOMA)
Εικόνα	1.12	SIC implementation
Εικόνα	1.13	OMA and NOMA schemes
Εικόνα	1.14	RRC modes
Εικόνα	1.15	RA procedure in 5G NR
Εικόνα	1.16	RA, msgA structure
Εικόνα	2.1	Cellular Network
Εικόνα	2.2	SNR vs BLER curve
Εικόνα	2.3	Effective SNR mapping
Εικόνα	2.4	Standardization Organizations
Εικόνα	2.5	Test Environments
Εικόνα	2.6	Test Application scenarios
Εικόνα	2.7	M2M traffic model
Εικόνα	2.8	Traffic Model Transmissions
Εικόνα	2.9	The milestones of MA technologies
Εικόνα	2.10	OMA vs NOMA data resources usage
Εικόνα	2.11	Definitions of distances in Path Loss calculation
Εικόνα	2.12	Estimation of Path Loss for Urban Macro environment
Εικόνα	3.1	Σχηματική παράσταση προσομοίωσης

Εικόνα	3.2	Τοποθέτηση των χρηστών στον καμβά παρατήρησης
Κώδικας	3.1	Αρχικοποίηση του προγράμματος
Κώδικας	3.2	Παράμετροι eMBB and mMTC χρηστών
Κώδικας	3.3	MCS & CQI data
Κώδικας	3.4	Υπολογισμός των BLER ορίων για τους mMTC χρήστες
Κώδικας	3.5	Τοποθέτηση των χρηστών στον καμβά παρατήρησης
Κώδικας	3.6	Κατάταξη χρηστών στους ΣΒ
Κώδικας	3.7	Traffic types
Κώδικας	3.8	Ορισμός του profile κίνησης
Κώδικας	3.9	Απόδοση των χρηστών στους τύπους κίνησης
Κώδικας	3.10	Time Table filling
Κώδικας	3.11	eMBB users position change
Κώδικας	3.12	Υπολογισμοί eMBB Rayleigh and MCS και Power Control
Κώδικας	3.13	Υπολογισμός αποδεκτής παρεμβολής
Κώδικας	3.14	eMBB OMA BLER
Κώδικας	3.15	Υπολογισμός mMTC Rayleigh and επανεκπομπών
Κώδικας	3.16	NOMA single mMTC
Κώδικας	3.17	mMTC in common BS
Γράφημα	4.1	Κατανομή απωλειών σε LOS και NLOS eMBB users
Γράφημα	4.2	Κατανομή απωλειών στους mMTC users
Γράφημα	4.3	Packets per Traffic Profile
Γράφημα	4.4	Κατανομή των επανεκπομπών ανά slot
Γράφημα	4.5	Κατανομή επανεκπομπών ανά MCS (profile 20/20/20/20/20)
Γράφημα	4.6	Κατανομή επανεκπομπών ανά MCS (profile 2.5/10/35/50/2.5)
Γράφημα	4.7	Κατανομή της TX ισχύος των mMTC χρηστών
Γράφημα	4.8	Κατανομή MCS στους eMBB users
Γράφημα	4.9	Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανά δείγμα (profile 10/20/20/40/10)
Γράφημα	4.10	Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανά MO (profile 10/20/20/40/10)
Γράφημα	4.11	Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανα δείγμα (profile 2.5/5/40/50/2.5)
Γράφημα	4.12	Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανα MO (profile 2.5/5/40/50/2.5)
Γράφημα	4.13	Μέσος ρυθμός μετάδοσης των eMBB χρηστών ανά δείγμα

Γράφημα	4.14	Μέσος ρυθμός μετάδοσης των eMBB χρηστών ανά MO
Γράφημα	4.15	Μέση πιθανότητα επιτυχίας των mMTC users
Γράφημα	4.16	Αιτίες αποτυχίας των mMTC εκπομπών
Γράφημα	4.17	Πλήθος μεταφερόμενων bits από τους mMTC χρηστών
Γράφημα	4.18	Ενεργειακή απόδοση
Πίνακας	4.1	Κατανομή των profile κίνησης
Πίνακας	4.2	Απόδοση bits ανά MCS

## Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
3GPP	3G Partnership Project
5G PPP	5G Public Private Partnership
5G-GUTI	5G Globally Unique Temporary Identifier
AAS	Active Antenna System
AF	Amplify & forward
AKA	Authentication and Key Agreement
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMF	Access and Mobility Function
AP	Antenna Port
APN	Access Point Name
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
ARLP	Average Received Link Power
ARP	Allocation and Retention Priority
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ATSSS	Access Traffic Steering Switching Splitting
AUSF	Authentication Server Function
BCCH	Broadcast Control Channel
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BSR	Buffer Status Report
CBRA	Contention Based Random Access

CCE	Control Channel Element
CDF	Cumulative Distribution Function
CDM	Code Division Multiplex
CE	Coverage Enhancement
CFRA	Contention Free Random Access
CM	Connection Management
C-NOMA	Cooperative NOMA
CoMP	Coordinated MultiPoint
CORESET	COntrol REsource SET
CPRI	Common Public Radio Interface
CQI	Channel Quality Indicator
CRB	Common Resource Block
CRI	CSI Resource Index
CRI	Contention Resolution Identity
C-RNTI	Connected Radio Network Temporary Identifier
CRS	Cell Reference Signal
DCI	DL Control Information
DFT-S-OFDM	Discrete Fourier Transform Spread OFDM
DLSCH	DL Shared Channel
DM-RS	Demodulation Reference Signal
DN	Decode & forward
DNN	Data Network Name
DPI	Deep Packet Inspection

DPS	Dynamic Point Selection
DRB	Data Radio Bearer
DRX	Discontinuous Reception Mode
DSCP	Differentiated Services Code Point
DSP	Digital Signal Processor
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
EBF	Elevation Beam Forming
EDT	Early Data Transmission
EDT	Early Data Transmission
EESM	Exponential Effective SNR Mapping
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance
ETWS	Earthquake and Tsunami Warning System
FDM	Frequency Division Multiplex
GBR	Guaranteed Bit Rate
GI	Guard Interval
GSCN	Global Synchronization Channel Number
GTP-U	GPRS Tunnel Protocol - User plane
HAL	H/W Abstraction Layer
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HI	HARQ Indicator

HSS	Home Subscriber Server
IaaS	Infrastructure as a Service
IE	Information Elements
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IRC	Interference Rejection Combination
ISM	Industrial Scientific Medical
ITU	International Telecommunication Union
JT	Joint Transmission
LBS	Location Based Service
LDPC	Low Density Parity Check
MAC	Medium Access Control
MAC	Medium Access Control
MBSFN	Multi Broadcast Single Frequency Network
MCC	Mobile Network Country
MCG	Master Cell Group
MCL	Max Coupling Loss
MCS	Modulation and Coding Scheme
MEC	Multi access Edge Computing
MIB	Master Information Block
MIESM	Mutual Information Effective SNR Mapping
MIPS	Million Instructions Per Second
MME	Mobile and Management Entity



mMTC	massive Machine Type Communication
MNC	Mobile Network Code
MPDCCH	MTC Physical DL Control Channel
MRC	Max Ratio Combining
MSE	Mean Square Error
MUD	Multi User Detection
MUSIC	Multi -Signal Classification
MUST	Multuser Superposition Transmission
NAI	Network Access Identifier
NAS	Non Access Stratum
NAT	Network Address Translation
NCGI	NR Cell Global Identifier
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
NGMN	Next Generation Mobile Networks Alliance
NIMTC	Network Improvement for MTC
NM-ALOHA	NOMA Multichannel ALOHA
NRF	Network Repository Function
NSI	Network Slice Instance
NSSAI	Network Slice Selection Assistance Information
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
ORB	Orthogonal Resource Block
OT	Orthogonal Transmission

OTDOA	Observed Time Difference of Arrival
OTFS	Orthogonal TimeFreqSpace modulation
PaaS	Platform as a Service
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCF	Policy and Charging Function
PCH	Paging Channel
PCI	Physical layer Cell Identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDF	Probability Density Function
PDSCH	Physical DL Shared Channel
PDU	Packet Data Unit
PDU	Protocol Data Unit
PGFU	Potential GF user
PHICH	Physical HARQ Indication Channel
PHR	Power Headroom Report
PIC	Parallel Interference Cancellation
PMI	Performance Matrix Indicator
PO	PUSCH Occasion
PRACH	Physical Random Channel
PRB	Physical Resource Block
PRS	Positioning Reference Signal

PRU	PUSCH Resource Unit
PSA	PDU Session Anchor
PSD	Power Spectral Density
PSS	Primary Synchronization Signal
PT-RS	Phase Tracking Reference Signal
PUCCH	Physical UL Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUSCH	Physical UL Shared Channel
QCI	QoS Class Identifier
QFI	QoS Flow Id
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAPID	Random Access Preamble Identifier
RAR	Radio Access Response
RAT	Radio Access Technology
RDN	Radio Distribution Network
REG	Resource Element Group
RGB	Resource Block Group
RI	Rank Indicator
RIM	Remote Interference Management
RIV	Resource Indicator Value
RLC	Radio Link Control
RM-	Registration Management
RMSI	Remaining Minimum System Information

RNA	RAN Notification Area
RNTI	Radio Network Temporary Identifier
RO	RACH Occasion
ROHC	Robust Header Compression
RQI	Reflective QoS Indication
RRH	Remote Radio Head
RRM	Radio Resource Management
RSI	Root Sequence Index
RSMA	Rate Splitting Multi Access
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SaaS	Software as a Service
SAGIN	Space-Air-Ground Integrated Network
SAW	Stop And Wait
SCG	Secondary Cell Group
SCS	SubCarrier Spacing
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SD	Slice Differentiator
SDAP	Service Data Adaptation (or Application?) Protocol
SDF	Service Data Flow
SDMA	Spatial Division Multiple Access
SDN	Software Defined Networking

SDO	Standards Development Organization
SDR	Successful Decoding Rate
SDU	Service Data Unit
SF	Sub Frame
SFI	Slot Format Indicator
S-GW	Serving Gate Way
SIB	System Information Block
SIC	Successive Interference Cancellation
SIMTC	System Improvement for MTC
SINR	Signal to Interface + Noise Ratio
SLIV	Start and Length Indicator Value
SMF	Session Management function
SPI	Serial Peripheral Interface
SPS	Semi-Persistence Scheduling
SR	Scheduling Request
SRB	Signaling Radio Bearer
SRS	Sound Reference Signal
SSB	Synchronization Signal (and Broadcast) Block
SSC	Session and Service Continuity
SSS	Secondary Synchronization Signal
SST	Slice/Service type
SUCI	Subscription Concealed Identifier
SUL	Supplementary Up Link

SUPI	Subscription Private Identifier
TA	Timing Advance
TAI	Tracking Area Identity
TDM	Time Division Multiplex
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
TNL	Transport Network Layer
TRS	Tracking Reference Signal
UCI	UL Control Information
UDM	Unified Data Management
UDN	Ultra Dense Network
UDP	User Datagram Protocol
UDR	Unified Data Repository
UICC	Universal Integrated Circuit Card
ULA	Uniform Linear Antenna
UPF	User Plane Function
uRLLC	ultra-Reliable Low Latency Communication
USIM	Universal Subscriber Identity Module
VNF	Virtualized Network Functions

## Εισαγωγή

Σε όλες τις ασύρματες ζεύξεις, ελλείπει υλικού μέσου (layer 1), ο αέρας αποτελεί το φυσικό εκείνο μέσο, μέσω του οποίου πραγματοποιούνται αυτές. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό, τα συστήματα ραδιοζεύξεων αναθέτουν ραδιοπόρους (radio resources) στους χρήστες που θέλουν να επικοινωνήσουν. Στην πράξη, χωρίζουν τον συγκεκριμένο χρόνο και το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε κλασματικά μέρη, τα οποία τα αποδίδουν στους συμμετέχοντες στην ραδιοζεύξη, ώστε να ισχύει διακριτότητα μεταξύ τους (OMA – Orthogonal Multiple Access, ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση) και να μην υπάρχουν φαινόμενα επαλληλίας και παρεμβολής, τα οποία να καταστήσουν την επικοινωνία, μη εφικτή. Ενώ οι περισσότεροι άνθρωποι ήδη χρησιμοποιούν το δίκτυο τεχνολογίας 5G και σχεδόν όλοι έχουν τουλάχιστον ακούσει για αυτό, στην πράξη αυτό που βιώνουν με την χρήση – κατά συντριπτική πλειοψηφία- των κινητών συσκευών τους, δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική διάσταση και τις δυνατότητες της νέας αυτής τεχνολογίας. Ο λόγος είναι γιατί δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα, εκείνες οι εφαρμογές και ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιεί όλα αυτά τα καινούργια χαρακτηριστικά που έχει η νέα τεχνολογία. Επίσης, σε επίπεδο υποδομών και κάλυψης, χρειάζεται ακόμα χρόνος. Καθώς αυξάνεται το αποτύπωμα του 5G και διευρύνεται η χρήση του, εγείρεται και η ανάγκη πιο αποδοτικής και αποτελεσματικής εκμετάλλευσης των διαθέσιμων ραδιοπόρων.

Αυτό από μόνο του αποτελεί περιοριστικό παράγοντα ως προς το πόσοι και πόσο θα μπορούν να εξυπηρετούνται. Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά του 5G, τα οποία είναι πολλάκις πιο απαιτητικά από τα χαρακτηριστικά του 4G, αναζητούνται άλλοι πιο αποτελεσματικοί τρόποι εκμετάλλευσης των ραδιοπόρων. Μια από τις απαιτήσεις, είναι η υποστήριξη μετάδοσης δεδομένων από ένα εκατομμύριο συσκευές IoT, ανά km<sup>2</sup>. Στην εργασία αυτή, μελετήθηκε η δυνατότητα εξυπηρέτησης αυτής της ανάγκης, ώστε να είναι εφικτός αυτός ο στόχος, με τρόπο που θα εκμεταλλεύεται τα υπάρχοντα μέσα. Διερευνήθηκε η τεχνική της NOMA – Non Orthogonal Multiple Access (Μη ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση) ή οποία αποτελεί και την πιο ελπιδοφόρα τεχνική παράλληλης εκμετάλλευσης ραδιοπόρων από περισσότερους του ενός, χρήστες. Μορφοποιήθηκε το υπό εξέταση σύστημα, βάσει του επιλεχθέντος αστικού μοντέλου κίνησης. Εξετάστηκε το πλαίσιο που μπορεί να εφαρμοστεί και αν υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής με τρόπο αποτελεσματικό και αποδοτικό. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τύποι των χρηστών που συμμετέχουν στην παρατήρηση και μέσω της προσομοίωσης, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων και των δύο τύπων χρηστών, σε πολύ ικανοποιητικό ποσοστό. Επίσης υπολογίστηκε η ενεργειακή απόδοση για να την μεταφορά των δεδομένων.

Τα αποτελέσματα της εργασίας, οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα που δείχνουν κάτω από ποιες παραδοχές είναι εφικτή η NOMA, ώστε να αξίζει η εφαρμογή της. Αναδείχτηκε ο ρόλος της διαμόρφωσης κωδικοποίησης (MCS), ποια είναι η επίδραση των mMTC εκπομπών στους eMBB χρήστες και πως αυτή γίνεται αποδεκτή, πως επηρεάζεται η ποιότητα της επικοινωνίας (μεταβολές του BLER και του SNR) που έχει άμεση σχέση με την πιθανότητα επιτυχίας των πακέτων.

- Στην αρχή, στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική αλλά σύντομη ανάπτυξη γύρω από έννοιες όπως το 5G, SIC, Random Access.
- Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος. Η θεωρία πάνω στην οποία βασίστηκε, τα πρότυπα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για να καλύψουν τα διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας και περιγραφή του τελικού πλαισίου που εξετάστηκε.
- Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, εξηγείται ο μηχανισμός προσομοίωσης. Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε σε MatLab περιβάλλον και τα σημεία ενδιαφέροντος με παραπομπές και ερμηνείες. Παρουσιάζεται και εξηγείται το πρόγραμμα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε για

## Κεφάλαιο 1

αυτόν τον σκοπό. Παρατίθεται το διάγραμμα ροής που βοηθά τον αναγνώστη να ξεχωρίσει τα επιμέρους τμήματα και τί αυτά επιτελούν.

- Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εκμαιεύονται από την εκτέλεση της προσομοίωσης. Συμπληρωματικά, κατατίθενται και προτάσεις βελτίωσης ώστε η προσέγγιση της εργασίας να γίνει πιο ολοκληρωμένη.

Η διερεύνηση εξέτασε την αποστολή δεδομένων, μόνο κατά το UL (Up Link). Θεωρείται ως δεδομένο ότι όλες οι απαραίτητες διεργασίες κατά το DL (Down Link) έχουν προηγηθεί επιτυχώς, πριν από την στιγμή παρατήρησης.



## Κεφάλαιο 1ο: ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ NOMA

### 1.1 Εισαγωγή

Αν σήμερα, το 4G αποτελεί την λύση σε προβλήματα που αντιμετωπίζαμε ως χρήστες παλιότερων δικτύων κινητής (2G, 3G), το 5G είναι ένα καινούργιο σύμπαν.

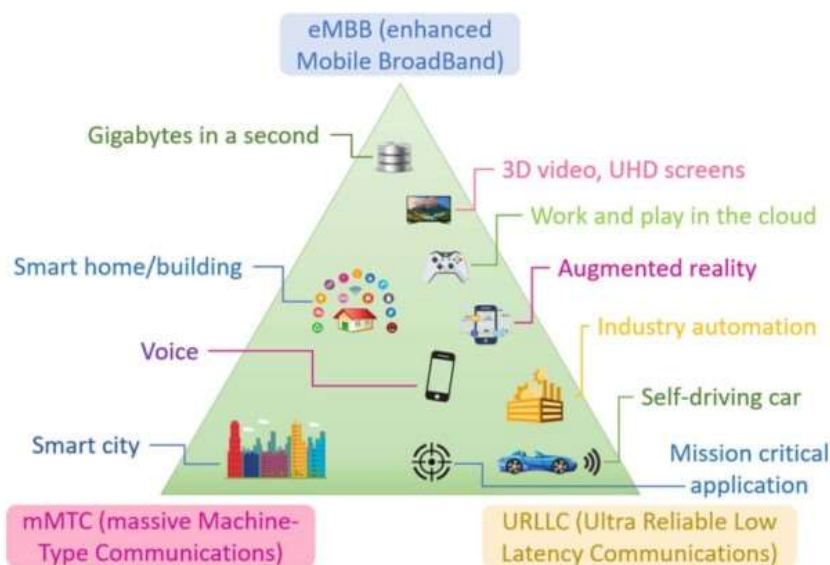
Όπως ξεκινάει και η έκδοση TS 22.261 της 3GPP, τα συστήματα 2-3-4G αποτελούσαν «One size, fits all: ένα μέγεθος, ταιριάζει παντού» εφαρμογές. Το 5G αναμένεται να είναι ικανό να παρέχει βέλτιστη υποστήριξη σε μια πληθώρα διαφορετικών υπηρεσιών, διαφορετικών φορτίων και διαφορετικών κοινοτήτων τελικών χρηστών. [1]

Ουσιαστικά, το 5G αποτελεί το σύστημα εκείνο, που θα μπορεί να καλύπτει σε βέλτιστο βαθμό, εφαρμογές με διαφορετικές ανάγκες και προτεραιότητες. Πχ, μια εφαρμογή ελέγχου V2X (Vehicle-To-Anything), προφανώς έχει ανάγκη μια πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης λόγω κρισιμότητας, σε σύγκριση με μια εφαρμογή live translation σε ένα group τουριστών, η οποία όμως έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε data throughput.

Ως σύστημα τηλεπικοινωνιών, ακολουθεί και αυτό κάποιες συγκεκριμένες λειτουργίες, όσον αφορά π.χ. την δικτύωση των συσκευών, την μέτρηση των απωλειών, τον ορισμό της ποιότητας του καναλιού κ.α. Στο τρέχον κεφάλαιο, παρατίθεται μια συνοπτική παρουσίαση του 5G, του random access procedure, της successive interference cancellation κ.α.

### 1.2 Περιγραφή του 5G

Το 5G αποτελεί μια τεράστια και συλλογική προσπάθεια να σχεδιαστεί, οριστεί κατασκευαστεί και εφαρμοστεί η επόμενη γενιά κυβελώδους δικτύου. Το 5G προορίζεται να καλύψει απαιτητικές υπηρεσίες όπως ενισχυμένη κινητή ζεύξη ευρέως φάσματος – *enhanced Mobile Broad Band communication (eMBB)*, εξαιρετικής πιστότητας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία – *Ultra Reliable Low Latency communication (URLLC)*, ογκώδης επικοινωνία μεταξύ μηχανών – *massive Machine Type Communications (mMTC)*. [2]



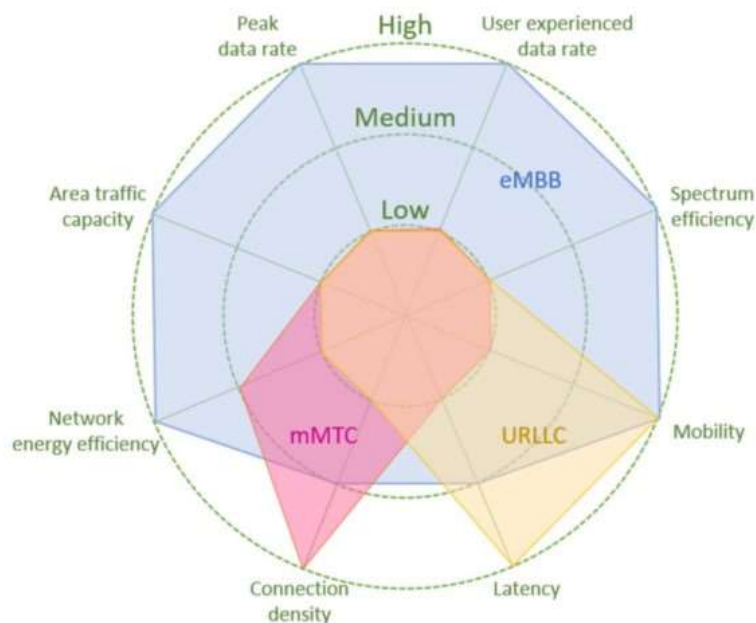
Εικόνα 1.1 - Παραδείγματα υπηρεσιών 5G [2]

Παρατηρώντας το παραπάνω σχήμα, βλέπουμε ότι δεν υπάρχει υπηρεσία που να απολαμβάνει το μέγιστο της δυνατότητας και στις τρεις κατηγορίες, ταυτόχρονα.

Οι υποδομές του 5G, αναμένεται να παίξουν βασικό ρόλο στην επέκταση τομέων όπως η 4<sup>η</sup> βιομηχανική περίοδος, η αυτοκινητοβιομηχανία, μεταφορές, σύστημα υγείας, παραγωγή ενέργειας, μέσα ενημέρωσης και ψυχαγωγίας, αλλά και να φέρουν καινούργια επιχειρηματικά μοντέλα και καινοτομίες.[2]

Κατά το 2022, η απαιτήσεις κίνησης δεδομένων έφτασαν το 7πλάσιο των απαιτήσεων του, όχι τόσο μακρινού, 2017. Επιπρόσθετα σε αυτήν την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης, νεοφυείς εφαρμογές, που «διψάνε» για διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων (π.χ. Ολοκληρωμένα δίκτυα μεταξύ γης – αέρος – διαστήματος, επαυξημένη πραγματικότητα κ.α.) και είναι απαιτητικές σε αυστηρά όρια QoS (Quality Of Service), δημιουργούν περαιτέρω προκλήσεις για τα ασύρματα δίκτυα της επόμενης γενιάς. [3]

Σε μετρήσιμα στοιχεία, τα νούμερα που παρουσιάζονται, προκαλούν έκπληξη. Πιο συγκεκριμένα: Ένας eMBB χρήστης, θα πρέπει να μπορεί να έχει διαθέσιμο Data rate DL 100Mbps / UL 50Mbps. Η αποδεκτή καθυστέρηση μεταφοράς της πληροφορίας (ωφέλιμο Payload – User Plane) δεν θα πρέπει να είναι περισσότερο από 4ms. Η πυκνότητα εγκατάστασης mMTC devices θα είναι  $1 \times 10^6$  /km<sup>2</sup>, με αντίστοιχο περιθώριο λάθους,  $1 \times 10^{-5}$  για αποστολή 32 Bytes σε 1ms [1], ενώ για URLLC service, το αποδεκτό BLER είναι πολύ χαμηλό ( $10^{-6}$ ) και user plane latency 1ms.[7]

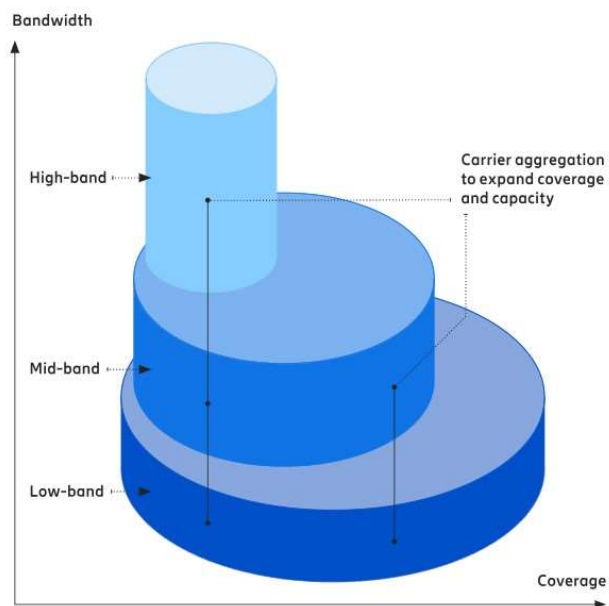


Εικόνα 1.2 - 5G scenarios according to key capabilities [2]

Κάθε υπηρεσία εκμεταλλεύεται ένα κλάσμα από κάθε κατηγορία, όχι απαραίτητα ίσα μεταξύ τους. Π.χ. η eMBB παρέχει υψηλό data rate για υπηρεσίες όπως 8k streaming αλλά υστερεί σε σύγκριση με τις άλλες κατηγορίες, όσον αφορά την πυκνότητα των users ή το latency (ταχύτητα απόκρισης της σύνδεσης), η mMTC επιτρέπει έναν μεγάλο αριθμό από συσκευές να διασυνδεθούν όπως το IoT, αλλά δεν μπορεί να πλησιάσει το data rate του eMBB, ενώ η URLLC αξιοποιείται από νέες εφαρμογές όπως εργοστασιακοί αυτοματισμοί (factory automation), τηλε-χειρουργική, αυτόνομη οδήγηση. Απολαμβάνει το μέγιστο του latency αλλά -όπως και το mMTC- δεν πλησιάζει το eMBB data rate[7]. Διακρίνουμε λοιπόν, ακόμα και στο 5G, ένα ανώτατο όριο υποστήριξης υπηρεσιών, σε επίπεδο δυνατοτήτων.

Για την λειτουργία του το 5G, καταλαμβάνει τρία διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, η καθεμιά με τα δικά της χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα [20].

- Την χαμηλή ζώνη, που καλύπτει το φάσμα κάτω από τα 2,6 GHz. Χρησιμοποιείται για ευρεία κάλυψη χώρου και εισχώρηση σε κτήρια. Έχει όμως περιορισμένη χωρητικότητα. Χρησιμοποιείται από όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες (2G, 4G, 5G).
- Την μεσαία ζώνη, που καλύπτει το φάσμα 3,5GHz – 6GHz. Προσφέρει περισσότερη χωρητικότητα σε σύγκριση με την χαμηλή ζώνη. Χρησιμοποιείται μόνο από το 4G και 5G.
- Την υψηλή ζώνη (mmWave), που αποτελεί την ζώνη πάνω από τα 24GHz. Προσφέρει μεγάλη χωρητικότητα, μεγάλο peak rate αλλά όχι μεγάλη κάλυψη. Χρησιμοποιείται μόνο από το 5G.



Εικόνα 1.3 - The three 5G spectrum Bands [20]

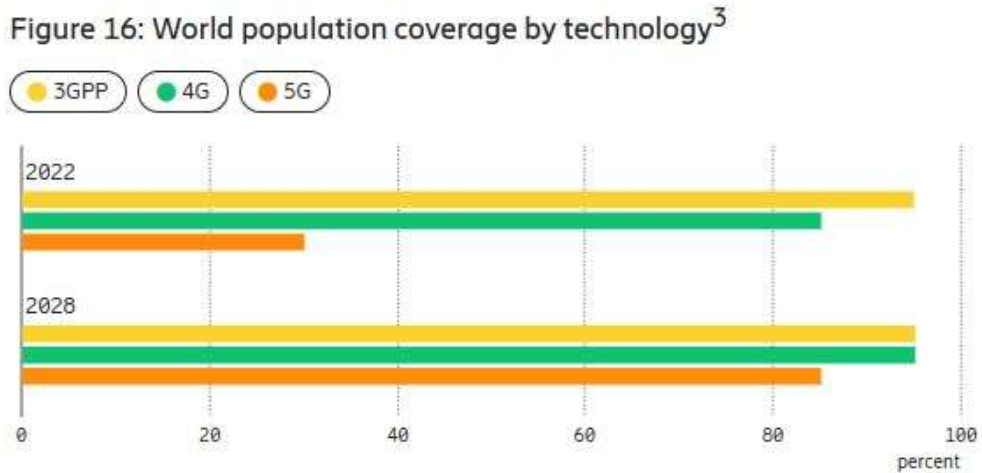
Το φάσμα που διατίθεται προς εκμετάλλευση από τους παρόχους κινητής, για την μεσαία ζώνη είναι 100MHz, ενώ για την ζώνη των mmWaves ( πάνω από 24GHz), είναι 1GHz. [21]



Εικόνα 1.4 - Διαχωρισμός φάσματος ανά τεχνολογία [21]

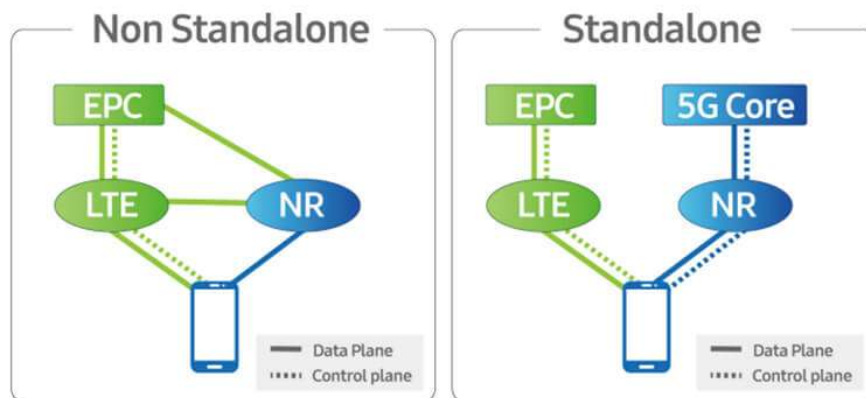
Η ιδανικότερη ζώνη συχνοτήτων για το 5G, είναι η μεσαία. Και αυτό γιατί μπορεί να μεταφέρει πλήθος δεδομένων και να καλύπτει ικανοποιητικές αποστάσεις. Αυτό όμως, δεν αναιρεί την σημασία και των άλλων ζωνών. Οι πάροχοι κινητής επικοινωνίας, πρέπει να διαθέτουν ένα μείγμα συχνοτήτων χαμηλής, μεσαίας και υψηλής περιοχής ώστε οι χρήστες να καλύπτουν τις ανάγκες των 5G εφαρμογών και οι συσκευές να είναι συνδεδεμένες στην καταλληλότερη ζώνη.

Όπως είναι αναμενόμενο, η εξάπλωση του 5G σε κάθε πτυχή της καθημερινότητάς μας, είναι ραγδαία αυξητική. Μέχρι το 2028, το 85% του παγκόσμιου πληθυσμού θα έχει την κάλυψη του 5G.[20]



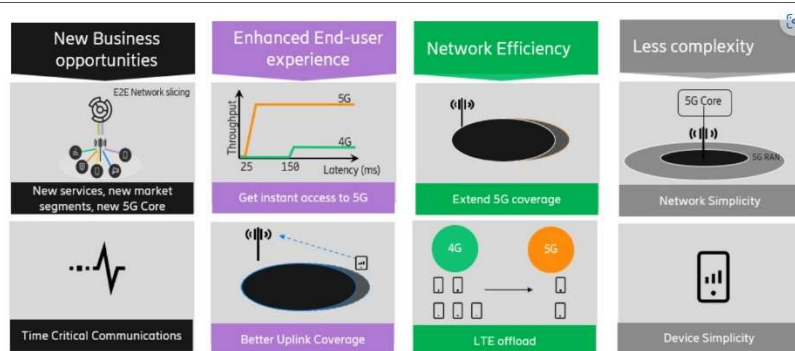
Εικόνα 1.5 - Πρόγνωση κάλυψης [20]

Παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι 4G και 5G συνυπάρχουν παράλληλα και ενώ αυξάνεται η κάλυψη του 5G με τα χρόνια, η κάλυψη του 4G παραμένει κορεσμένη και μάλιστα αυξάνεται και αυτή. Προφανώς, όχι με τον ίδιο ρυθμό, λόγω προγενέστερης κάλυψης 4G (το 4G υπάρχει και εξαπλώνεται, ήδη εδώ και χρόνια). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο εγκατεστημένος 4G εξοπλισμός, χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της κάλυψης του 5G. Σήμερα, υπάρχουν δύο είδη εγκατάστασης του 5G. NSA – Non-Stand Alone και το SA-Stand Alone. Το πρώτο είδος αποτελεί και την αρχική προσέγγιση ανάπτυξης του 5G και ομαλής μετάβασης από το 4G στο 5G. Ο υπάρχων εγκατεστημένος εξοπλισμός στο RAN, εμπλουτίστηκε/εται ώστε να παρέχει υπηρεσίες 5G (κυρίως eMBB services). Βεβαίως, το δεύτερο είδος είναι αυτό που αναπτύσσεται και αναμένεται να επικρατήσει, ώστε να μπορούν οι συνδρομητές να απολαμβάνουν καθαρή 5G εμπειρία.



Εικόνα 1.6 - NSA vs SA 5G configuration [21]

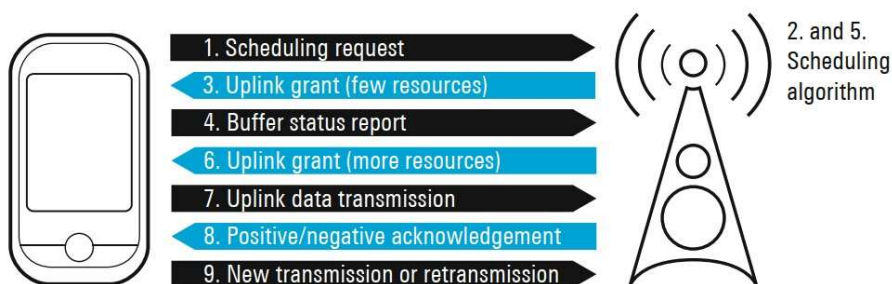
Η αρχιτεκτονική του 5G είναι πολύ διαφορετική, σε σύγκριση με τον προκάτοχό του, το 4G. Έννοιες όπως, numerology, network slicing, S/W defined Core Functions κ.α., που αποτελούν και τα κομμάτια της αρχιτεκτονικής του 5G, μπορούν να αποκτήσουν το πλήρες νόημά τους, σε περιβάλλον SA. Τότε, θα μπορούμε να έχουμε αυτά που υπόσχεται το 5G.



Εικόνα 1.7 - Benefits of 5G - SA [22]

### 1.3 Βήματα μεταφοράς δεδομένων

Όταν μια συσκευή έχει δεδομένα για αποστολή, το πρώτο βήμα είναι να χρησιμοποιήσει μια συγκεκριμένη και μεμονωμένη σύνδεση σηματοδοσίας για να ζητήσει από τον ΣΒ, ραδιοπόρους. Στην συνέχεια, ο ΣΒ μετά από υπολογισμούς, αποδίδει στην συσκευή ένα περιορισμένο μέγεθος ραδιοπόρων, ώστε η συσκευή να μπορέσει να στείλει στον ΣΒ το BSR , Buffer Status Report. Δηλαδή, το μέγεθος των προς αποστολή δεδομένων και τον τύπο τους. Με το BSR, επιτρέπεται στον ΣΒ να καθορίσει το σωστό μέγεθος των ραδιοπόρων που χρειάζεται η συσκευή. Για παράδειγμα, εάν η συσκευή αναφέρει στον ΣΒ, ένα μεγάλο μέγεθος δεδομένων προς αποστολή, ο ΣΒ μπορεί να αποδώσει στην συσκευή περισσότερα radio resources, ώστε η μεταφορά να γίνει γρήγορα και η μέση καθυστέρηση να μειωθεί [18].

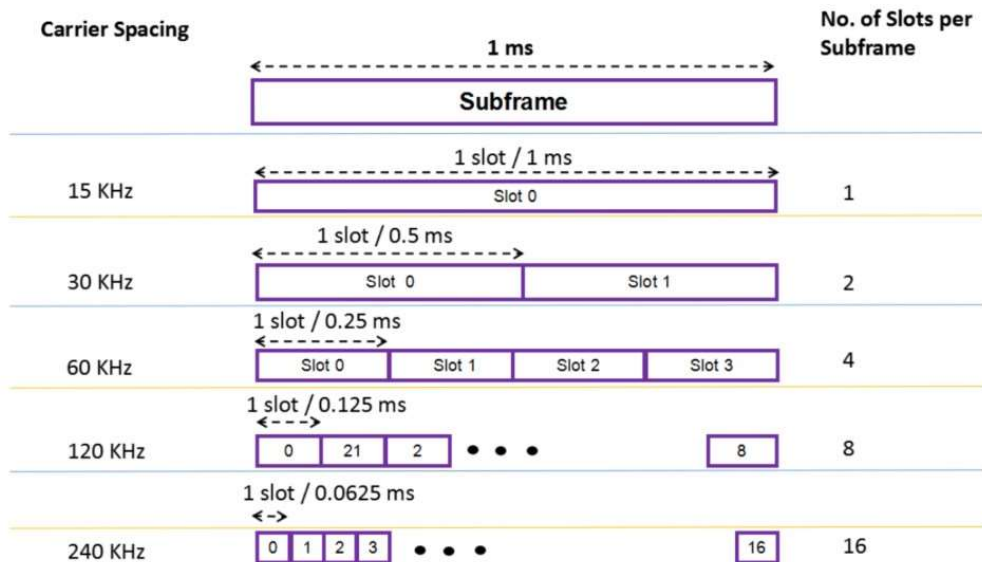


Εικόνα 1.8 - UL data transfer steps [18]

Ένα χαρακτηριστικό του 5G σε σύγκριση με το 4G, είναι η δυνατότητα διαχωρισμού του 1msec sub frame σε μικρότερα χρονικά κομμάτια, τα slots. Αναλόγως το numerology ( $\mu$ ) που επιλέγεται προς χρήση, κάθε sub frame, μπορεί να περιέχει 1,2,4,8,16 slots, με συνολικά OFDM symbols: 14, 28, 56,112,224 σε κάθε subframe. Η διάρκεια κάθε slot είναι από 1ms ( $\mu=0$ ), μέχρι 0.0625  $\mu$ s ( $\mu=5$ ).

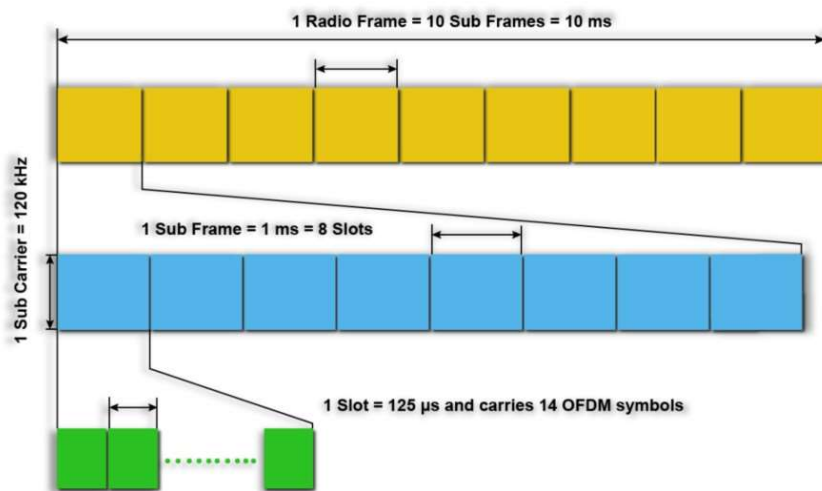
Ανάλογα με το  $\mu$ , το sub carrier spacing μεταβάλλεται αντίστοιχα. Έτσι, με μικρό  $\mu$ , το SCS είναι 15kHz, με  $\mu=1$  το SCS αυξάνεται στα 30kHz, ενώ μπορεί να φτάσει τα 240kHz με  $\mu=5$ , γιατί ισχύει ο τύπος  $\Delta F = 2^\mu \times 15$  [kHz].





Εικόνα 1.9 - 5G OFDM frame structure [12]

Για να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό, το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το OFDM structure για  $\mu=3$  [12].



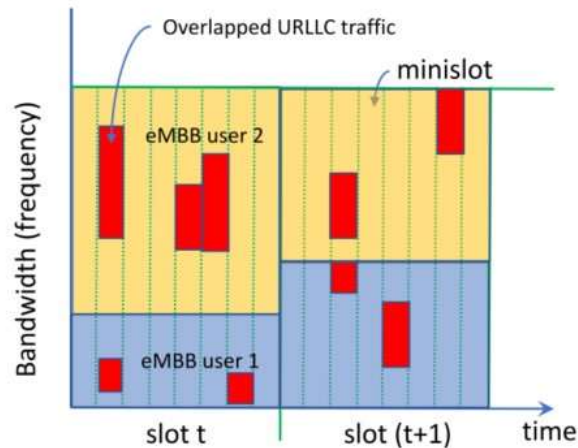
Εικόνα 1.10 - 5G sub frame ( $\mu=3$ ) [12].

## 1.4 NOMA

Το ανώτατο όριο υποστήριξης υπηρεσιών από το σύστημα επικοινωνίας, σχετίζεται και με την ευρεία αλλά πεπερασμένη -ακόμα και στο 5G- διάθεση ραδιοπόρων (radio resources), λόγω της χρήσης OMA (orthogonal Multiple Access) [8]. Η απάντηση – διέξοδος σε αυτό τον περιορισμό, μπορεί να είναι η NOMA τεχνική. Ο πλέον και πολλά υποσχόμενος τρόπος να ξεπεραστεί αυτό, είναι η χρήση NOMA (Non Orthogonal Multiple Access). [3] [10]

Η χρήση NOMA επιτρέπει την εξυπηρέτηση των απαιτήσεων -ακόμα και του 6G -,ιδιαίτερα την πραγματοποίηση ογκώδους αριθμού συνδέσεων-. [3]

Σύμφωνα με αυτή, ένας χρήστης μιας κατηγορίας υπηρεσιών (πχ eMBB user), χρησιμοποιεί τους ραδιοπόρους που του αναθέτει το Base Station, για να πραγματοποιήσει την μεταφορά των δεδομένων του. Ακριβώς αυτούς τους ραδιοπόρους, τους εκμεταλλεύεται και κάποιος άλλος χρήστης, που ανήκει σε άλλη κατηγορία χρηστών (πχ URLLC ή mMTC), για να μεταφέρει και αυτός τα δεδομένα του. [6]

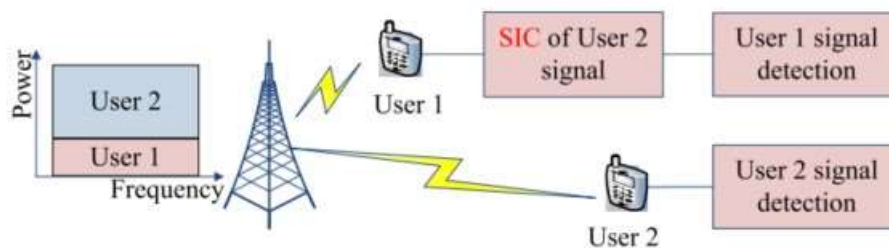


Εικόνα 1.11 - Radio Resources overlapping (NOMA) [5]

Με δεδομένο ότι το ενδιαφέρον της εργασίας, εστιάζεται στο UL (Up Link – ζεύξη ανωφέρειας), η εφαρμογή του SIC, εκτελείται από τον Base Station (Σταθμό Βάσης), ο οποίος λαμβάνει δύο διαφορετικά σήματα, στους ίδιους πόρους. Στην συνέχεια, τα ξεχωρίζει σύμφωνα με την ισχύ τους και πραγματοποιεί το decoding. Αν είναι πετυχημένο, ενημερώνει αναλόγως και ο χρήστης προχωράει σε επανεκπομπή ή όχι.

## 1.5 SIC

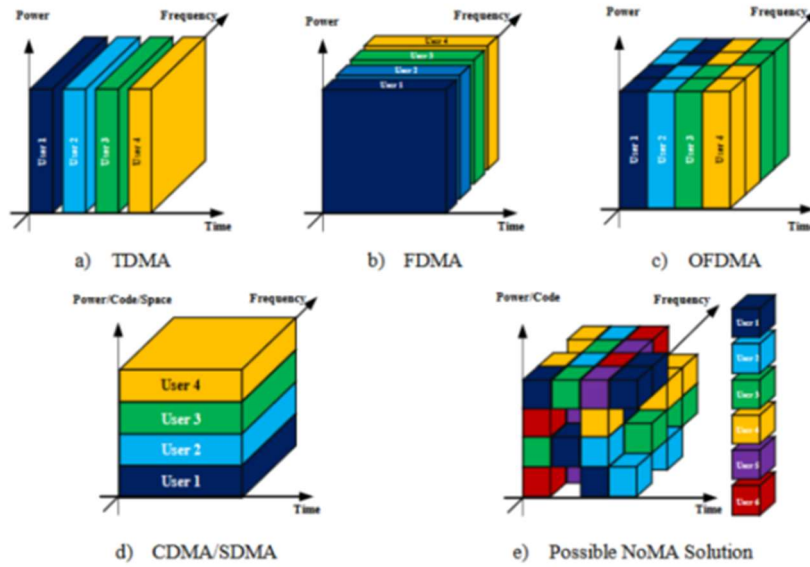
Προφανώς, υπάρχουν περιορισμοί σε αυτή την περίπτωση. Η επαλληλία των χρηστών δεν είναι απεριόριστη και για να πραγματοποιηθεί NOMA, θα πρέπει το σύστημα να είναι σε θέση να εφαρμόσει υποστηρικτικές τεχνικές (SIC – Successive Interference Cancellation).[4][6]



Εικόνα 1.12 - SIC implementation [4]

Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, τα δεδομένα δύο διαφορετικών χρηστών μεταδίδονται ξεχωριστά και παραλαμβάνονται ως ένα κοινό σήμα. Αυτό που τα κάνει να ξεχωρίσουν, είναι η διαφορετική στάθμη εκπομπής των δύο διαφορετικών χρηστών. Στην περίπτωση του DL (Down Link – ζεύξη κατωφέρειας), τα δεδομένα των δύο χρηστών, μεταδίδονται μαζί. Ο 1<sup>ος</sup> χρήστης που θα παραλάβει το κοινό σήμα, είναι σε θέση να ξεχωρίσει το ωφέλιμο γι' αυτόν (σύμφωνα με την ισχύ του). Στη συνέχεια, προχωράει στον διαχωρισμό αυτού, οπότε αυτό που μένει είναι το ωφέλιμο σήμα του άλλου χρήστη (πιο μακρινού, ασθενέστερου). Ο 2<sup>ος</sup> χρήστης, παραλαμβάνει πλέον το σήμα χωρίς να εμπλέκεται το σήμα του 1<sup>ου</sup> χρήστη.

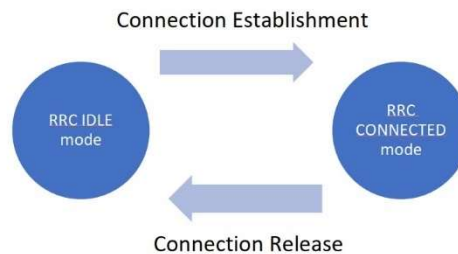
Ο συνδυασμός χρήσης NOMA-SIC, εκμηδενίζει επιτυχώς την Inter-user Interference, κάτι το οποίο βελτιώνει πολύ το throughput σε χρήστες που βρίσκονται στα όρια κάλυψης του serving cell. Συμπληρωματικά, υπάρχει αξιοσημείωτη βελτίωση του spectral efficiency.[10]



Εικόνα 1.13 - OMA and NOMA schemes [10]

## 1.6 Random Access

Γενικώς, μια συσκευή μπορεί να πραγματοποιεί μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων RRC (RRC-idle / RRC-connected), ανάλογα με την ανάγκη να στείλει/λάβει δεδομένα. Όταν η συσκευή δεν είναι ενεργή, είναι σε κατάσταση RRC-IDLE. Για να γίνει ενεργή και να συμμετέχει σε μεταφορά δεδομένων, πρέπει να μεταβεί σε κατάσταση RRC-CONNECTED. [16]



Εικόνα 1.14 - RRC modes [16]

Για να στηθεί μια σύνδεση με τον ΣΒ, η συσκευή κάνει χρήση της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης-Random Access Procedure (RA), η οποία είναι η διαδικασία της μετάβασης από IDLE σε CONNECTED. Για να ξεκινήσει η διαδικασία αυτή, η συσκευή επιλέγει τυχαία ένα από τα 64 προοίμια (preambles) και το εκπέμπει προς τον ΣΒ. Όλες οι εκπομπές των προοιμίων λαμβάνουν χώρα σε συγκεκριμένο κανάλι του UL, το PRACH-Physical Random Access Channel. Πολλές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι αυτό, ταυτόχρονα. [16]

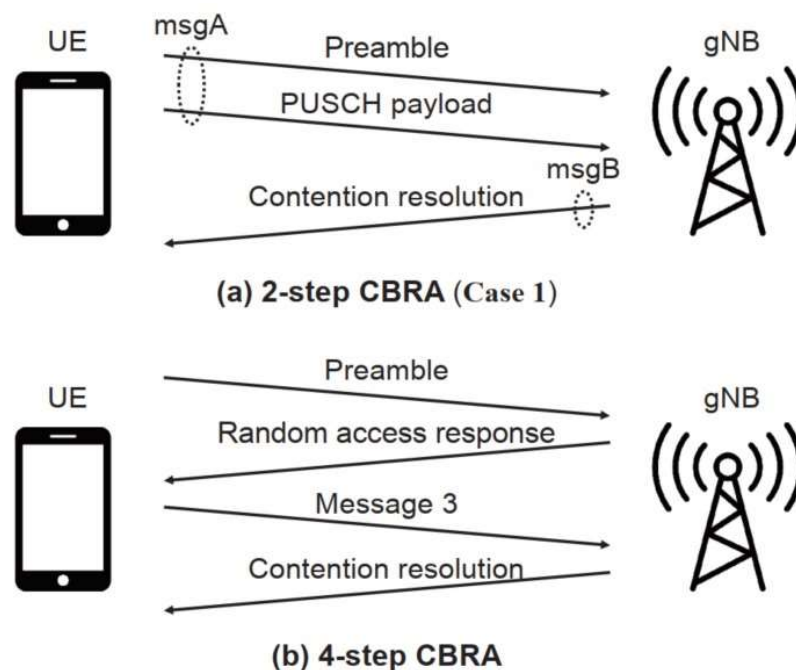
### CBRA (4-steps, 2-steps)

Το συμβατικό OMA σχήμα είναι grant-based scheme. (σχήμα απόδοσης άδειας χρήσης των πόρων από τον ΣΒ στην χρήστη). Κάθε χρήστης πρέπει να αποκτήσει πρόσβαση σε συγκεκριμένους ραδιοπόρους για κάθε προσπάθεια εκπομπής. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ «ακριβή» με όρους latency και signaling overhead, ειδικά όταν μιλάμε για πολύ μεγάλο αριθμό χρηστών.[10]



Η RA, είναι η διαδικασία που εκτελείται, προκειμένου να επιτραπεί σε ένα device (συσκευή) να στείλει δεδομένα. Το βασικό μοντέλο εκτέλεσης της RA, είναι με τέσσερα βήματα. Η 3GPP όμως, στην έκδοση 16 με διευκρινήσεις για το 5G, εισήγαγε την έκδοση της RA με δύο βήματα [9]. Αυτή χρησιμοποιείται κυρίως από mMTC ή URLLC devices, που έχουν μικρές απαιτήσεις στην μετάδοση πληροφορίας. Με την 2-step RA, πετυχαίνουμε μείωση του RRC connection Setup και του latency [9]. Αυτό είναι εφικτό, επειδή στο περιεχόμενο του msgA της RA procedure, εκτός από το preamble, αποστέλλεται και PUSCH payload information. Γι' αυτό η δομή του msgA-RA, θα πρέπει να ορίζεται εκ νέου κάθε φορά, ώστε να περιέχει τον συσχετισμό μεταξύ προοιμίου στο PRACH resource και Freq/time resource στο PUSCH.

Το msgB, αποτελεί την απόκριση του λήπτη (BS), αναλόγως αν έγινε σωστά η αποκωδικοποίηση ή όχι. Αν έγινε σωστά, τότε ο ΣΒ ενημερώνει το UE για την ορθότητα της επίλυσης με RAR το οποίο έχει και την τιμή του Timing Advance.

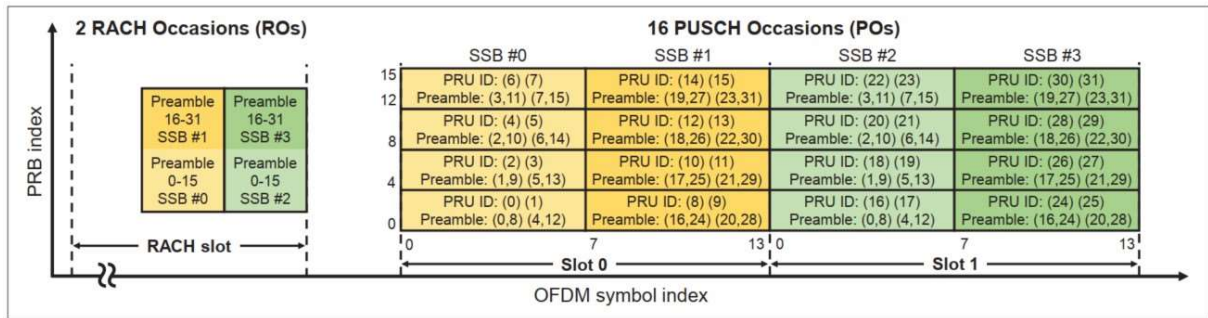


Εικόνα 1.15 - RA procedure in 5G NR [9]

Υπάρχει περίπτωση, το gNB να λάβει το ίδιο προοίμιο από διαφορετικούς χρήστες. Εδώ, ο ΣΒ δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει το TA για κάθε χρήστη. Έτσι, ενημερώνει τους χρήστες να επαναλάβουν την διαδικασία αποστολής προοιμίου, μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (RA window).

Σε περίπτωση που ο ΣΒ αποτύχει να λάβει σωστά το προοίμιο, δεν γίνεται αποστολή RAR προς το UE. Το UE επαναλαμβάνει την διαδικασία μετά από το πέρας του RA window time. Αυτή η επανάληψη πραγματοποιείται για καθορισμένο M αριθμό επαναλήψεων. Αν μετά από τις επαναλήψεις, δεν υπάρχει επιτυχία, τότε η διαδικασία μεταπίπτει σε 4-step RA.

Ta sets των προοιμίων του msgA μεταδίδονται με ROs (RA Occasions). Κάθε SSB χρησιμοποιεί 16 προοίμια. Αυτά ομαδοποιούνται σε 4 PRUs.



Εικόνα 1.16 - RA, msgA structure [9]

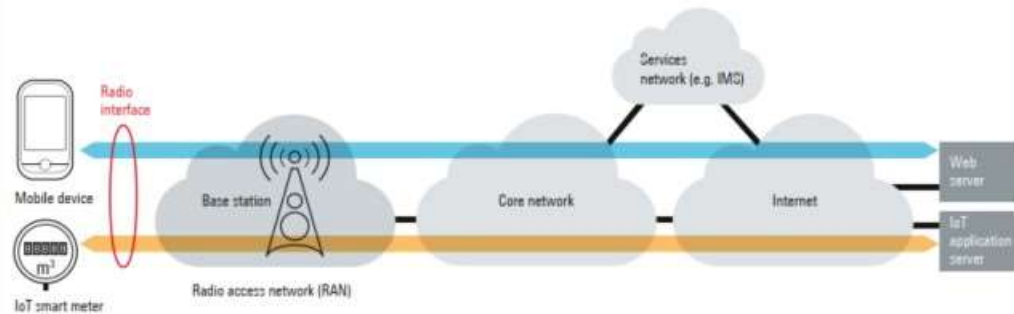
Πιο συγκεκριμένα, όταν ο χρήστης, χρειάζεται να αποστείλει δεδομένα, πρώτα γνωστοποιεί την πρόθεσή του στον ΣΒ με χρήση του msgA κατά το UL, το οποίο περιέχει το επιλεγμένο προοίμιο. Τα προοίμια είναι συγκεκριμένοι ραδιοπόροι μικρού μεγέθους, πεπερασμένου πλήθους, που αποστέλλονται (γίνονται Broadcast) από τον ΣΒ προς τους χρήστες. Κάθε χρήστης, επιλέγει έναν και τον χρησιμοποιεί για να «στήσει» την σύνδεση με τον ΣΒ. Αν το προοίμιο ληφθεί σωστά, ο ΣΒ απαντάει με απόκριση που περιέχει χρήσιμα δεδομένα για τον χρήστη (ισχύ εκπομπής, timing advance value) τα οποία χρησιμοποιεί ο χρήστης μαζί με το BSR κατά το msg3, στο UL. Ο ΣΒ, πλέον είναι σε θέση να αναθέσει τους απαιτούμενους ραδιοπόρους προς χρήση από τον συγκεκριμένο χρήστη.

## Κεφάλαιο 2ο: ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 2.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Η εργασία πραγματεύεται το μοντέλο συστήματος, το οποίο υποστηρίζει την συνύπαρξη, στο ίδιο ραδιοδίκτυο, δύο διαφορετικών υπηρεσιών της 5<sup>ης</sup> γενιάς των ασύρματων επικοινωνιών. Οι υπηρεσίες είναι:

- (α) η eMBB – enhanced Mobile Broadband, ενισχυμένη επικοινωνία ευρέως φάσματος και
- (β) η mMTC – massive Machine Type Communication, μαζική επικοινωνία μηχανών [6].



Εικόνα 2.1 - Cellular Network [18]

Τα BSs, χωρίζονται σε 4 SBS και 1 MBS (Small Base Station, Macro Base Station). Αποτελούν τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των δύο κόσμων του δικτύου. Το RAN – Radio Access Network και το Core Network.

Η επικοινωνία μεταξύ Base Station και eMBB users, πραγματοποιείται μετά από την επιτυχή ολοκλήρωση της 4-step Random Access διαδικασίας.

Η επικοινωνία μεταξύ Base Station και mMTC users, πραγματοποιείται μετά από την επιτυχή ολοκλήρωση της 2-step Random Access διαδικασίας.

Για τις στάθμες εκπομπής των eMBB, πραγματοποιείται power control procedure, έτσι ώστε όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, να μειώνεται η ισχύς εκπομπής τους και όταν χρειάζεται, να ενισχύεται στο μέτρο του επιτρεπτού, ώστε να υπάρχουν πιθανότητες επιτυχούς αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι απώλειες είναι λίγες και η λήψη του eMBB user από τον ΣΒ, όχι μόνο φτάνει αλλά ξεπερνά κατά πολύ το μέγιστο SNR που αντιστοιχεί στο μέγιστο MCS, τότε ελαττώνεται η ισχύς εκπομπής του, σε επίπεδα τέτοια που να εξυπηρετείται το max SNR και να μην δημιουργεί τόση παρεμβολή στους υπόλοιπους χρήστες. Αντίστοιχα, όταν οι απώλειες είναι τόσες πολλές που δεν καλύπτεται ούτε το min απαιτούμενο SNR που αντιστοιχεί στο min MCS, τότε ενισχύεται η ισχύς εκπομπής ώστε να «πιάνει» τουλάχιστον το MCS 1 και να μην απορρίπτεται το πακέτο του.

Αναλόγως των συνθηκών του καναλιού του eMBB, οι mMTC users προσαρμόζουν τις εκπομπές των πακέτων τους, ώστε αν χρειάζεται, να πραγματοποιήσουν επανεκπομπές για επιτυχή μετάδοση της πληροφορίας τους. Δηλαδή, αναλόγως το επίπεδο παρεμβολής που μπορεί να «ανεχτεί» η λήψη του eMBB, ο/οι mMTCs που είναι συμμετέχοντες σε NOMA, στο συγκεκριμένο TS, προσαρμόζουν την ισχύ εκπομπής τους (την μειώνουν), τόσο ώστε να μην ξεπερνά η στάθμη της παρεμβολής, το επίπεδο ανεκτικότητας. Βέβαια, αυτό μειώνει την προσλαμβανόμενη ενέργεια του σήματος από τον ΣΒ, οπότε υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός επανεκπομπών – δύναμη με βάση το 2-, ώστε να συμπληρώνεται η απαιτούμενη ενέργεια για να θεωρηθεί το πακέτο του mMTC ως ληφθέν. Αντιστοίχως, αν οι απώλειες του mMTC, είναι λίγες και άρα η ισχύς εκπομπής του, δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη, τότε μειώνεται

στο απαιτούμενο επίπεδο (λιγότερο από το επίπεδο αποδεκτής παρεμβολής), ώστε να μετρηθεί το πακέτο ως ληφθέν.

Για τους συμμετέχοντες mMTC, δημιουργήθηκαν πέντε (5) διαφορετικοί τύποι κίνησης, σύμφωνα με το μοντέλο [2], κατά τα οποία ο κάθε mMTC εκπέμπει με διαφορετική περιοδικότητα 1 Tx/1', 1 Tx/5', 1 Tx/30', 1 Tx/60' και ένα μοντέλο τυχαίας εμφάνισης, με time window τα 30''. Το χρονικό διάστημα της παρατήρησης και καταγραφής, ορίστηκε η μια ώρα (1 hour). Έτσι, κάθε mMTC device, θα έχει ένα από τα μοτίβα εκπομπής: 60 Tx/h, 12 Tx/h, 2 Tx/h, 1 Tx/h και 120 Tx/h ανά 30'' σε τυχαίο χρονικό σημείο. Ο ισομοιασμός των traffic types στους mMTC users, δεν συμβαδίζει με τα πραγματικά σενάρια. Πιο αντικειμενικό είναι να υπάρχει μια ανισοκατανομή. Γι' αυτό η προσομοίωση έτρεξε για περιπτώσεις όπου η κατανομή των TTs είναι: 20-20-20-20-20%, 10-20-20-40-10%, 5-20-30-40-5%, 2.5/10/35/50/2.5%.

Στο σύστημα, κάθε eMBB user επιλέγει με τι MCS θα δουλέψει ενώ οι mMTCs είναι προ-ρυθμισμένοι για κάθε εκτέλεση της προσομοίωσης και σταθεροί στο MCS index του table 3 της αντίστοιχης οδηγίας (ETSI TS 138.214 v15.2.0/07-2018 [13]), δεδομένου ότι τα bits που είναι να αποσταλούν δεν είναι μεγάλη ποσότητα (1000 bits)[2].

Ο διαμοιρασμός των χρηστών πραγματοποιείται με εφαρμογή του Poisson διαμοιρασμού. Πιο συγκεκριμένα, οι eMBB χρήστες καταλαμβάνουν τυχαία σημεία στο χώρο, ενώ οι mMTC διαμοιράζονται στο χώρο σε πυκνώσεις και αραιώσεις, αντίστοιχες των τυχαίων σημείων συγκέντρωσης, τα hot points, δεδομένου ότι εκπληρώνεται μοντέλο συστήματος Urban Macro (ETSI TR 138 901 v14.3.0/01-2018 [17]). Οι SB τοποθετούνται στον καμβά προσομοίωσης, σε συγκεκριμένα σημεία και δεν μετακινούνται κατά την παρατήρηση.

Η χρήση NOMA είναι αποδεκτή από το μοντέλο. Για να θεωρηθεί επιτυχές ένα πακέτο του eMBB, θα πρέπει να υπολογιστεί πρώτα, το BLER του καναλιού [παράρτημα Α]. Σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό έχουν το SNR της λήψης, το MCS που έχει επιλεγεί, το PRB που περιέχει τα RBs που αποδώθηκαν στον χρήστη. Με την προσθήκη των mMTC users, η κατάσταση επιδεινώνεται διότι στον συνολικό θόρυβο προστίθεται και η στάθμη του σήματος του/των mMTC που συμμετέχουν στην εκπομπή του εν λόγω πακέτου του eMBB.

Αντίστοιχα, εξετάζονται τα πακέτα των mMTCs για την επιτυχία τους ή όχι, μετά από τον αντίστοιχο υπολογισμό του BLER (Παράρτημα Γ).

## 2.2 Θεωρητική ανάπτυξη

Θεωρούμε την προσέγγιση εκείνη που χρησιμοποιεί μια ομάδα από προ-αποφασισμένες στάθμες για πολλαπλή πρόσβαση.[4]

Η συνολική λήψη στο SB δίνεται από την σχέση:

$$y_i = \sum_{k \in I_i} h_{i,k} \sqrt{P_{i,k} S_{i,k}} + n_i$$

Όπου  $h_{i,k}$  αντιπροσωπεύει τον συντελεστή του καναλιού,  $P_{i,k}$ , αντιπροσωπεύει την ισχύ εκπομπής και  $S_{i,k}$  το σήμα του χρήστη  $k$ , μέσω του  $i^{\text{th}}$  υποφέροντος αντίστοιχα. Το  $n_i$  είναι ο θόρυβος. [4]

Θεωρούμε ότι κάθε χρήστης ξέρει το CSI του. Σε TDD mode, ο SB μπορεί να στέλνει ένα πιλοτικό σήμα στην αρχή κάθε slot, για να συγχρονίσει τις UL εκπομπές. Αυτό το pilot signal μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους χρήστες για να υπολογίσουν το CSI τους.[4]

Όταν το transmission rate  $R$  του εκάστοτε χρήστη, είναι αυτό που δίνεται από την σχέση:

$$R = \log_2(1 + \Gamma)$$

Όπου  $R$ : Transmission Rate,  $\Gamma$ : επιθυμητό SINR, τότε το σήμα του συγκεκριμένου χρήστη μπορεί να αποκωδικοποιηθεί και να απομακρυνθεί με χρήση SIC [4]. Ακολούθως, όλα τα σήματα των χρηστών μπορούν να αποκωδικοποιηθούν, αν τηρείται η παραπάνω σχέση, αν και εκπέμπουν ταυτόχρονα. [4]

Υπάρχει περίπτωση, να υπάρξουν χρήστες που επιλέγουν το ίδιο επίπεδο εκπομπής. Αυτό αναφέρεται ως power collision event. Σε τέτοια περίπτωση, τα σήματα των χρηστών αυτών δεν μπορούν να αποκωδικοποιηθούν σωστά.

Το UL NOMA χρειάζεται να μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς παρεμβάλλοντες ενεργούς χρήστες, ο αριθμός των οποίων είναι μεγαλύτερος από τα διαθέσιμα ORBs (Orthogonal Resource Blocks). Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, μαζεύονται οι GB users με τους GF users σε ένα NOMA cluster, που ορίζεται ως SEMI-GF NOMA.[3]

Η γενική διαδικασία της semi-GF NOMA έχει ως εξής:

- Ο ΣΒ αποδίδει ένα ORB (Orthogonal Resource Block) σε κάθε GB χρήστη (eMBB).
- Ο ΣΒ εκτιμάει το απόθεμα/περίσσεμα της ισχύος (την αποδεκτή ισχύ λήψης από τους GF users, για αυτό το ORB, και υπολογίζει την τιμή που θα αποστείλει με broadcasting).
- Αφού παραλάβουν οι GF users αυτή την τιμή, εκπέμπουν τα πακέτα τους προς τον ΣΒ με εκπομπές GF. [3]

Ως επακόλουθο, η πληροφορία που γίνεται broadcasting από τον ΣΒ, περιέχει δύο τιμές. (α) Την ελάχιστη τιμή εκπομπής – MTP (Minimal Transmission Power) (β) την μέγιστη ανεκτή ισχύ παρεμβολής – MTI (Maximal Tolerance to Interference).[3]

Επειδή δεν υπάρχει Channel State Information (CSI) για τους mMTC users, ως επακόλουθο, ο eMBB user μπορεί να προσαρμόσει την ισχύ εκπομπής του σύμφωνα με την στιγμιαία κατάσταση του καναλιού αλλά οι mMTC devices λειτουργούν χωρίς αυτή την πληροφορία και εκπέμπουν όλοι με την ίδια ισχύ. [6]

Ο eMBB user προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής του (gain αντίστοιχο ώστε το λαμβανόμενο SNR, πάντα να είναι ίσο με μια προ-ρυθμισμένη τιμή). Το επιθυμητό είναι ο eMBB να εκπέμπει στο μεγαλύτερο δυνατό rate που είναι συμβατό με την πιθανότητα σφάλματος (outage probability), βάσει ενός διαρκούς μέσου περιορισμού της ισχύος. [6]

Στην περίπτωση απουσίας παρεμβολής από mMTC κίνηση, η μόνη περίπτωση αποτυχίας της εκπομπής του eMBB, είναι η μη-εκπομπή, λόγω εξαιρετικά κακών συνθηκών καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση, το SNR που αντιστοιχεί στην πιθανότητα αποτυχίας του eMBB, δίνεται από την σχέση:

$$\gamma_B^{\min} = \Gamma_B \gamma^{-1}(L, \epsilon_B (L - 1)!) )$$

Όπου  $\gamma(a, z)$ , είναι η χαμηλότερη μη ολοκληρωμένη Gamma function. [6]

Τελικώς, το rate που μπορεί να φτάσει ο eMBB, δίνεται από την σχέση:

$$r_B^{\text{out}} = \log_2(1 + \gamma_B^{\text{tar}}) [6]$$

Αντίστοιχα, για τους mMTC users που είναι συνδεδεμένοι στον ΣΒ, στην αρχή θεωρούμε ότι δεν δέχονται παρεμβολή από τον eMBB user. Τότε, ο BS receiving vector δίνεται από την σχέση:

$$y = \sqrt{P_M} G_M x_M + n,$$

Όπου  $G_M$  είναι ο πίνακας με τα channel gains των mMTCs,  $\sqrt{P_M} G_M x_M$  είναι ο πίνακας με τα σύμβολα που εκπέμπουν οι mMTCs και  $n$ , ο πίνακας με τις τιμές του θορύβου (AWGN).

Από την στιγμή που οι mMTC users λειτουργούν χωρίς CSI, εκπέμπουν με την ίδια ισχύ και έχουν το ίδιο data rate  $r_M$ . Η διαδικασία του decoding ολοκληρώνεται όταν ένας από τους χρήστες δεν αποκωδικοποιείται σωστά ή όλοι οι mMTCs επιτυγχάνουν. [6] Η ακολουθία αποκωδικοποίησης ορίζεται σε φθίνουσα σειρά των ληφθέντων SNRs των ενεργών mMTCs.

$$g_1^H g_1 \geq g_2^H g_2 \geq \dots \geq g_M^H g_M$$

Κατά την NOMA πραγματοποίηση, που έχουμε επικάλυψη της κίνησης του eMBB με τις κινήσεις των ενεργών mMTCs, η συνισταμένη των σημάτων στην λήψη του ΣΒ, δίνεται από την σχέση:

$$Y = G_x + n [6],$$

Όπου  $G = [g_{m,1} \ g_{m,2} \ g_{m,3} \ \dots \ g_{m,M} \ g_B]$ , τα channel gains των mMTC και eMBB users.

Το σήμα του κάθε mMTC user, δίνεται από την σχέση:

$$x_m = \sqrt{P_M} g_m^H g_m x_m + \sqrt{P_M} g_m^H \sum_{m' \neq m}^M g_{m'} x_{m'} + \sqrt{P_B} g_B^H g_B x_B + g_m^H n [6]$$

Ενώ το σήμα του eMBB, δίνεται από την σχέση:

$$x_B = \sqrt{P_B} g_B^H g_B x_B + \sqrt{P_M} g_B^H \sum_{m=1}^M g_m x_m + g_B^H n [6]$$

Ακολουθώντας την σειρά αποκωδικοποίησης, το SINR του  $m^{\text{th}}$  mMTC user με παρουσία eMBB κίνησης, δίνεται από:

$$\sigma_m = \frac{P_M \|g_m\|^4}{P_M \sum_{m'=m+1}^M |g_m^H g_{m'}|^2 + P_B |g_m^H g_B|^2 + \|g_m\|^2}$$

Όσο, η ανισότητα  $\log_2(1 + \sigma_m) \geq r_M$ , τηρείται, ο mMTC user αποκωδικοποιείται σωστά. [6]

Αντίστοιχα, το SINR του eMBB χρήστη, δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_B = \frac{P_B \|g_B\|^4}{P_M \sum_{m'=m+1}^M |g_B^H g_{m'}|^2 + \|g_B\|^2}$$

Όσο, η ανισότητα  $\log_2(1 + \sigma_B) \geq r_B$ , τηρείται, ο eMBB user αποκωδικοποιείται σωστά. [6]

Κατά OMA, ο eMBB user χρησιμοποιεί το SNR που καλύπτει της ανάγκες μετάδοσης των δεδομένων του, κατά την ισότητα  $\mathbb{E}\{P_B(\gamma_B)\} = 1$ . Κατά NOMA, προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή που δημιουργείται στους mMTC χρήστες, επιτρέπεται στον eMBB να υιοθετήσει χαμηλότερες τιμές εκπομπής, ώστε να καλύπτεται η ανισότητα: [6]

$$\gamma_B^{\text{tar}} \leq \frac{\Gamma_B (L-1)!}{\Gamma(L-1, \frac{\gamma_B^{\text{min}}}{\Gamma_B})}$$

Το error probability του eMBB, σε αυτή την περίπτωση, δίνεται από την σχέση: [6]

$$\Pr(E_B) = \Pr\{\log_2(1 + \sigma_B) < r_B\}.$$

### 2.3 Προκαταρκτικοί υπολογισμοί

Κάνοντας τους υπολογισμούς που καλύπτουν τις απαιτήσεις του mMTC, έχουμε:

$$N_{\text{RE}} = 12 \text{ SCs} \times 14 \text{ OFDMs} - 12 \text{ SCs (DMRS)} = 168 \text{ REs/PRB}$$

$$N_{RE} = \min(156, N'_{RE}) \times n_{PRB} = 156 \times 10 = 1560 \text{ RE/PRB.}$$

$$1560 \text{ REs} \times 2 \text{ bits/RE (MCSindex 10/table3)} = 3120 \text{ bits/PRB}$$

$$\text{Payload} = 3120 \times (308/1024) = 938,4375 \text{ bits/PRB}$$

Σύμφωνα με το πίνακα των TBS [13], το πλησιέστερο TBSindex = 53.

Άρα, το TBS που χρησιμοποιείται, έχει μέγεθος **984 bits**.

Ο ρυθμός μετάδοσης των mMTC users είναι:  $984 \times 2000 \text{ slots } (\mu:1) = \mathbf{1,968 \text{ Mbps}}$ .

Αντίστοιχα, για τους eMBB users, εφαρμόζοντας το παραπάνω σκεπτικό, έχοντας κατά νου ότι ο eMBB πρέπει να έχει 50 Mbps throughput, το MCS index που επαρκεί για να τα αποδώσει, είναι από τον 2<sup>ο</sup> πίνακα του [13], MCS index 13. Αυτό μας δίνει SE 3,3223 bits/RE. Έτσι λοιπόν, έχουμε:

$$N'_{RE} = 12 \text{ SCs} \times 14 \text{ OFDMs} - 12 \text{ SCs (DMRS)} = 168 \text{ REs/PRB}$$

$$N_{RE} = \min(156, N'_{RE}) \times n_{PRB} = 156 \times 10 = 1560 \text{ RE/PRB.}$$

$$N_{info} = 1560 \times 6 \times (567/1024) = 25,913 \text{ kbs}$$

Ακολουθώντας την οδηγία προσδιορισμού του TBS [13], όταν  $N_{info} > 3824$ , βρίσκουμε ότι το **TBS= 26120**.

Άρα, το throughput των eMBBs φτάνει τα  $26,120 \text{ kbs} \times 2000 \text{ slots } (\mu:1) = \mathbf{52,24 \text{ Mbps}}$ .

Βεβαίως, ο συγκεκριμένος υπολογισμός είναι δυναμικός κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, γιατί αναλόγως τις συνθήκες, οι eMBB users επιλέγουν το βέλτιστο MCS index, ώστε να ικανοποιείται το αποδεκτό SNR που έχει οριστεί να αποδίδει BLER 0,1.

## 2.4 Μοντέλο Συστήματος

Το scheduling του eMBB user, θεωρούμε ότι έχει λυθεί προγενέστερα του υπό διερεύνηση slot. Το κανάλι θεωρείται ότι είναι εντός της περιόδου συνεκτικότητας ώστε οι συντελεστές του ασύρματου καναλιού είναι σταθεροί σε κάθε slot και επίσης οι διαλείψεις συμβαίνουν ανεξάρτητα σε κάθε slot. Τα gains των εκπομπών (eMBB και mMTC), όπως φαίνονται από την κεραία λήψης, είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα διαμοιραζόμενα. [6]

### 2.4.1 Σταθμοί Βάσης

Όπως έχει ειπωθεί πιο πάνω, οι τύποι των σταθμών βάσης που έχουμε, είναι δύο. Οι SBS (Short Base Station) και οι MBS (Macro Base Station).

Η 1<sup>η</sup> κατηγορία, είναι εκείνοι οι ΣΒ που δεν καλύπτουν ευρεία περιοχή αλλά ενδυναμώνουν την επικοινωνία σε μέρη που η κάλυψη δεν είναι επαρκής ή όχι τόσο ικανοποιητική (π.χ. μέσα ή/και ανάμεσα σε κτήρια). Αντιθέτως η άλλη κατηγορία των ΣΒ, είναι εκείνη που καλύπτει μεγάλες εκτάσεις. Το ύψος τους κυμαίνεται στα 15 – 70 μέτρα και τοποθετούνται σε στρατηγικά σημεία για να έχουν καλύτερη απόδοση. Είναι εξοπλισμένοι με εξελιγμένα συστήματα κεραιών, με πολλαπλές κεραιές σε σχηματισμό MIMO, που αποσκοπούν σε υψηλότερη χωρητικότητα εκπομπής και λήψης, γρηγορότερη μεταφορά δεδομένων και βελτιωμένη απόδοση RF ενέργειας. Η ισχύς εξόδου τους κυμαίνεται από 80-320W.

### 2.4.2 Χαρακτηριστικά των χρηστών

eMBB users: Είναι οι χρήστες που εμπίπτουν στην αντίστοιχη κατηγορία, εκ των τριών βασικών του 5G-NR, όπως ορίστηκαν από την 3GPP. Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

(α) η υψηλή χωρητικότητα. Η προσπέλαση ευρέος φάσματος, πρέπει να είναι διαθέσιμη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές (και indoor, outdoor) όπως αστικά κέντρα, κτήρια γραφείων, ανοιχτοί χώροι όπως στάδια, συνεδριακά κέντρα, κ.α.

(β) Αυξημένη συνδεσιμότητα. Η προσπέλαση ευρέος φάσματος πρέπει να είναι διαθέσιμη παντού ώστε να παρέχει σταθερή εμπειρία χρήστη.

(γ) Κινητικότητα. Η προσπέλαση ευρέος φάσματος πρέπει να καλύπτει υπηρεσίες σε κινούμενα οχήματα όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία, αεροπλάνα, τρένα κ.α.

mMTC users: Αποτελούν τα μέλη της επόμενης κατηγορίας εκ των βασικών του 5G-NR. Η κατηγορία αυτή δημιουργήθηκε ειδικά για να μπορεί πάρα πολύ μεγάλος όγκος μικρών πακέτων δεδομένων να συγκεντρώνονται από μεγάλο αριθμό συσκευών, ταυτόχρονα. Οι συσκευές (devices) αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν IoT αισθητήρες που χρειάζονται μειωμένη κατανάλωση ενέργειας (διάρκεια αυτονομίας, μέχρι 10 χρόνια) για την αποστολή των δεδομένων τους, σε αποστάσεις σχετικά μεγάλες (μέχρι 10 χλμ). Είναι οι ιδανικοί χρήστες για την πραγματοποίηση των smart cities και των FOF-Factory of Future.

### 2.4.3 Random Access

Η συνοπτική αυτή διαδικασία τυχαίας προσπέλασης, στοχεύει να μειώσει την καθυστέρηση από το ένα άκρο στο άλλο, με την αποστολή δεδομένων κατά το UL, στο πλαίσιο της RA εκτέλεσης. Ο σκοπός είναι τα δεδομένα να μεταδοθούν γρήγορα, χωρίς να έχει προηγηθεί το «στήσιμο» της σύνδεσης μεταξύ χρήστη και ΣΒ, καθώς η προσέγγιση αυτή νοείται να χρησιμοποιηθεί για αποστολή μη συχνού, σποραδικού και μικρού όγκου πληροφορίας.[16]

Ο ΣΒ χρειάζεται μόνο να αναγνωρίσει ότι πρόκειται για mMTC δεδομένα, και αυτό επιτυγχάνεται από το προοίμιο που χρησιμοποιείται.[16]

Το msgA περιέχει το προοίμιο στο PRACH channel και τα δεδομένα (payload) στο PUSCH channel. Αφού γίνει η αποστολή αυτή, ο χρήστης περιμένει για το msgB από τον ΣΒ, το οποίο περιέχει και την απόκρισή του (response - RAR), στο PDSCH channel.[9]

Ανάλογα με την λήψη, ο ΣΒ αποκρίνεται και ανάλογα.

- Ο ΣΒ επισημαίνει το προοίμιο και αποκωδικοποιεί επιτυχώς το payload. Ενημερώνει τον χρήστη στέλνοντάς του επιτυχές RAR – Random Access Response, μαζί με την τιμή του TA – Timing advance, βάσει της απόστασης μεταξύ τους.
- Ο ΣΒ επισημαίνει το προοίμιο αλλά δεν αποκωδικοποιεί επιτυχώς το payload. Χρησιμοποιώντας τον χρόνο λήψης του προοιμίου, στέλνει στον χρήστη το TA και την έγκριση για αποστολή δεδομένων μέσω του UL.
- Ο ΣΒ επισημαίνει πολλαπλά ίδια προοίμια από διαφορετικούς χρήστες. Δεν γίνεται καμία αποστολή RAR (αφού δεν μπορεί ο ΣΒ να ξεχωρίσει τους χρόνους λήψης των προοιμίων), αλλά αποστέλλεται η ένδειξη σε όλους τους χρήστες να ξανά προσπαθήσουν μετά από κάποιο back-off window time.
- Ο ΣΒ αποτυγχάνει να επισημάνει το προοίμιο. Δεν αποστέλλεται τίποτα προς τον χρήστη.



Στο μοντέλο, δεν αξιολογούνται και καταγράφονται ως αποτυχημένα τα πακέτα των mMTC που χρησιμοποιούν το ίδιο προοίμιο (preamble collision).

#### 2.4.4 Power Control

Αναλόγως της επιτρεπόμενης στάθμης εκπομπής, οι mMTC users, προσαρμόζουν την ισχύ εκπομπής, ώστε το σήμα τους να λαμβάνεται από τον ΣΒ με ισχύ τόση ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα με το σήμα του eMBB που εκπέμπει προς αυτό το ΣΒ. Αν οι συνθήκες το επιτρέπουν, ο κάθε mMTC, αναλόγως της απόστασής του και των διαλείψεων που υφίσταται, εκπέμπει την μέγιστη τιμή που είναι καθορισμένη στα 20 dBm. Αν δεν το επιτρέπουν, τότε μειώνει την ισχύ εκπομπής του σε αποδεκτά επίπεδα αλλά πραγματοποιεί επανεκπομπές (με κάθε επανεκπομπή, η συνολική ενεργεια που λαμβάνεται, αυξάνεται κατά 3dB) , τόσες ώστε η συνολική ενέργεια που φτάνει στον ΣΒ, να είναι αρκετή ώστε να ικανοποιείται το SNR αλλά χωρίς να υπερβάλλει την επιτρεπόμενη ισχύ παρεμβολής.

#### 2.4.5 AMC – Adaptive Modulation and Coding

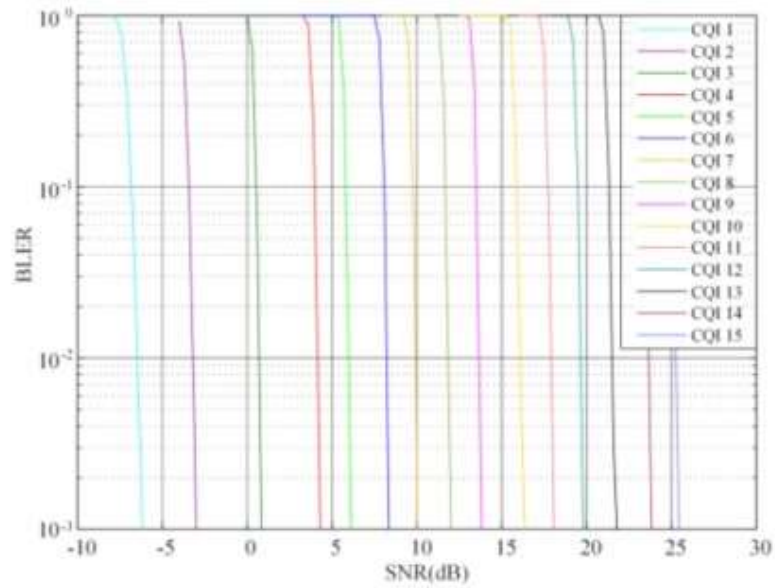
Κάτι άλλο που επηρεάζει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, είναι ο δείκτης MCS – Modulation and Coding Scheme. Ανάλογα με την ποιότητα και την κατάσταση του καναλιού, το σύστημα επιλέγει τον δείκτη εκείνο που μπορεί να εφαρμοστεί και να πραγματοποιηθεί η μετάδοση των δεδομένων. Σύμφωνα με την οδηγία 3GPP TS 38.214 version 15.2.0 Release 15 [13], οι μεταδόσεις των δεδομένων μπορούν να γίνουν με χρήση προεπιλεγμένων τιμών φασματικής απόδοσης (spectral efficiency), ανάλογα με το MCS index. Κάθε MCS index που υπάρχει, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο πλήθος bits/OFDM symbol, ωφέλιμων (payload) bits/σύνολο bits και Spectral Efficiency.

Ο σκοπός της προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (AMC – Adaptive Modulation and Coding) είναι να βελτιώσει την φασματική εκμετάλλευση του καναλιού, να μειώσει το BER, να διατηρεί σταθερή την στάθμη εκπομπής, να μειώσει την δημιουργία παρεμβολής [14]. Η βασική αρχή είναι να ρυθμιστεί η κωδικοποίηση σύμφωνα με τις ποιοτικές αλλαγές του καναλιού, μέσα στα όρια του συστήματος και να μεγιστοποιήσει το transmission rate ενώ διασφαλίζει την ποιότητα εκπομπής. [14]. Το MCS index επιλέγεται ανάλογα με την γνωστή κατάσταση του καναλιού.

Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί AMC, αν οι συνθήκες του καναλιού είναι εξαιρετικές, επιλέγεται προς χρήση, MCS μεγαλύτερης τάξης (που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο code rate και υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, όπως 64QAM κ.α.). Όταν η ποιότητα του καναλιού είναι χαμηλή, το υψηλότερο transmission rate σημαίνει σοβαρή ενδο-συμβολική παρεμβολή, κατά την λήψη από τον αποδέκτη. Γι' αυτό σε αυτή την περίπτωση, επιλέγεται MCS χαμηλότερης τάξης. [14]

Το πρώτο βήμα της εφαρμογής του AMC, είναι η δημιουργία της αναλογίας SNR and CQI. Γι' αυτό, προσομοιώνουμε τους πίνακες με τους δείκτες των MCS indexes [13], ώστε να αποκτήσουμε την σχέση μεταξύ BLER vs SNR. [14][Παράρτημα Β]

Σύμφωνα με την γραφική που παράγεται, εντοπίζουμε την τιμή του SNR σε κάθε γραφική απεικόνιση των CQI, για την οποία το BLER είναι ίσο με 0.1 ( $10^{-1}$ ).



Εικόνα 2.2 - SNR vs BLER curve [14]

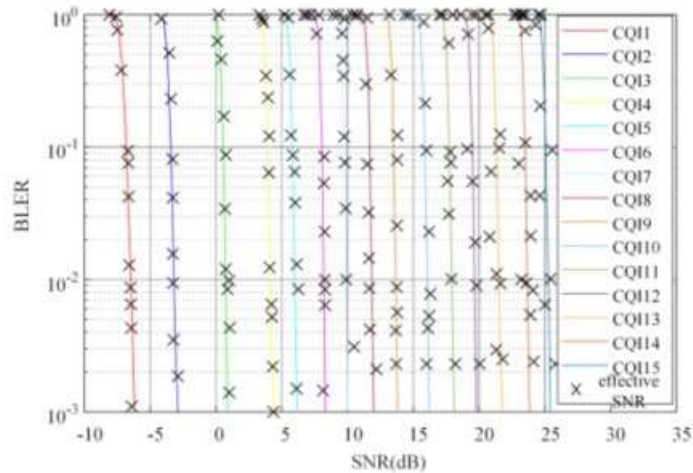
Υπολογίζουμε το effective SNR. Λόγω της επιλεκτικότητας στην συχνότητα των χαρακτηριστικών ενός πολύτροπου καναλιού, όταν το αποδιδόμενο φάσμα είναι μεγάλο, κάθε sub carrier έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που καταλήγουν σε μεγάλες διαφορές του SNR. Γι' αυτό, ο χρήστης χρειάζεται να εφαρμόζει μια συγκεκριμένη συνάρτηση, [14]

$$SNR_{eff} = \beta f^{-1} \left( \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R f \left( \frac{SNR_r}{\beta} \right) \right)$$

ώστε να υπολογίσει μια τιμή, αντίστοιχη του μέσου όρου του συνόλου των SNRs , για κάθε subcarrier, η οποία αντιπροσωπεύει την συνολική κατάσταση του καναλιού. Ο λήπτης έτσι, μπορεί να συγκρίνει την effective SNR ( $SNR_{eff}$ ) με την τιμή του SNR, όταν το BLER είναι 0,1 (σύμφωνα με την παραπάνω προσομοίωση) και να επιλέξει το υψηλότερο CQI, εκείνο το οποίο για το οποίο  $BLER < 0,1$ . Σε πρακτικές εφαρμογές, η ακρίβεια του υπολογισμού του CQI, σχετίζεται με το λάθος της εκτίμησης του SNR και με την ακρίβεια του διορθωτικού παράγοντα ( $\beta$ ) στον αλγόριθμο αντιστοίχισης του  $SNR_{eff}$ . Έτσι, μετά από μια βαθμωτή διαδικασία, ακόμα ένας παράγοντας εισάγεται, προκειμένου το προβλεπόμενο BLER να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στο BLER της προσομοίωσης και η πιο πάνω συνάρτηση, γίνεται:[14]

$$SNR_{eff} = \alpha f^{-1} \left( \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R f \left( \frac{SNR_r}{\beta} \right) \right)$$

Έτσι, μετά από την εφαρμογή της συνάρτησης (1) από το [14], τα διαφορετικά SNR αντικαθίστανται από ένα SNR effective, το οποίο χρησιμοποιείται για την απόδοση του αντίστοιχου MCS, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του BLER 0.1.



Εικόνα 2.3 - Effective SNR mapping [14]

Στο παραπάνω σχήμα, βλέπουμε τα σημεία που αντιστοιχούν στο υπολογιζόμενο SNR effective. Παρατηρούμε ότι διαφέρουν ελάχιστα από το ιδεατό SNR του καναλιού.

Έχοντας ορίσει το αποδεκτό BLER 0.1 για τους eMBB χρήστες, έχουμε βάσει της καμπύλης το αποδεκτό SNR για κάθε γνωστό CQI που αντιστοιχεί σε ένα MCS index. Κάθε eMBB, συμμετέχει στην προσομοίωση με το CQI που αποδίδει το MCS σύμφωνα με το επιθυμητό SNR, που μας δίνει BLER 0.1. Αυτή την τιμή του SNR που αντιστοιχεί στο CQI, την χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε το αποδεκτό επίπεδο παρεμβολής που μπορεί να δεχτεί ο ΣΒ, ώστε να μην επηρεαστούν οι μεταδόσεις των eMBBs.

#### 2.4.6 Poisson Distribution

Ο Πουασσόν διαμοιρασμός χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της πιθανότητας ενός συμβάντος, όταν ανεξάρτητα γεγονότα συμβαίνουν σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο με γνωστό μέσο ρυθμό επανάληψης. Με άλλα λόγια, έχει εφαρμογή για την εκτίμηση του πόσες φορές, ένα γεγονός έχει πιθανότητα να συμβεί σε συγκεκριμένο πλαίσιο παρατήρησης. Στην προσομοίωση, εφαρμόστηκε για να σημειωθούν τα σημεία των mMTCs users, γύρω από συγκεκριμένα σημεία, τυχαίας κατανομής στο χώρο. Δηλαδή, οι χρήστες αυτοί, τοποθετούνται τυχαία μεν στο χώρο, αλλά με τρόπο ώστε να υπάρχει σχετική πυκνότητα ύπαρξης γύρω από κάθε hot point.

Ο Poisson distribution, εκφράζεται με την σχέση:

$$F(x) = P(X=x) = (e^{-\lambda} \lambda^x) / x!$$

Όπου  $x=0,1,2,3,\dots$ ,  $e$  είναι η σταθερά του Euler ( $e=2,718$ ),  $\lambda$  είναι ο μέσος ρυθμός της αναμενόμενης τιμής και ισχύει  $\lambda =$  διαφορά και  $\lambda > 0$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τον μεγάλο αριθμό mMTC devices/km<sup>2</sup> που θα πρέπει να καλύψει ένα 5G σενάριο, δημιουργήθηκε από την αρχή, ο καμβάς αποτύπωσης των σημείων όλων αυτών των χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των eMBB και BSs.

#### 2.4.7 Traffic Model

Έχοντας κατά νου, τον πολύ μεγάλο αριθμό mMTC devices που αναμένεται να εγκατασταθούν στα πλαίσια της εδραίωσης των αυτοματισμών που θα λειτουργούν μέσω 5G, επιλέχθηκε το μοντέλο κίνησης των table VI, VII [2]. Πιο συγκεκριμένα, για τους συμμετέχοντες mMTC, δημιουργήθηκαν πέντε (5) διαφορετικά μοντέλα κίνησης, κατά τα οποία ο κάθε mMTC εκπέμπει με διαφορετική

περιοδικότητα 1 Tx/1', 1 Tx/5', 1 Tx/30', 1 Tx/60' και ένα μοντέλο τυχαίας εμφάνισης, με time window τα 30''. Το χρονικό διάστημα της παρατήρησης και καταγραφής, ορίστηκε η μια ώρα (1 hour). Έτσι, κάθε mMTC device, θα έχει ένα από τα μοτίβα εκπομπής: 60 Tx/h, 12 Tx/h, 2 Tx/h, 1 Tx/h και 120 Tx/h ανά 30'' σε τυχαίο χρονικό σημείο. Ο όγκος των δεδομένων, ορίστηκε σύμφωνα με το μοντέλο στο 1kbits / Tx. Αρκετός όγκος για να καλύψει τις αναμενόμενες ανάγκες ενός mMTC device.

Για τους eMBB users, λαμβάνεται υπόψη η φορητότητά τους και αλλάζουν θέση παρατήρησης κάθε 30''. Κάθε φορά ξαναυπολογίζονται οι απώλειες (PL and Rayleigh Fading) και το ανεκτό επίπεδο παρεμβολής, επαναπροσδιορίζεται το power control και βεβαίως, αντιστοιχίζεται το νέο SNR στο αντίστοιχο MCS. Όλα τα παραπάνω, εκτός από τις απώλειες απόστασης (PL), επανεκτελούνται και κάθε 6'', λόγω αλλαγής των διαλήψεων (Rayleigh Fading).

Λόγω όλων των προκλητικών στόχων του 5G, έχουν ξεκινήσει, μαζί με αξιοσημείωτες επενδύσεις, πρωτοβουλίες που αναπτύχθηκαν από οργανισμούς όπως η ITU – International Telecommunication Union, 3GPP – 3rd Generation Partnership Project, 5GPPP – 5G Infrastructure Public Private Partnership, NGMN – Next Generation Mobile Networks Alliance.[2] Οι διαφορετικές πλευρές των σεναρίων, τα διαφορετικά μοντέλα που χαρακτηρίζουν τα συστήματα, οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν όπως και οι απαιτήσεις των QoS, εξ ολοκλήρου ορίζουν το αποτέλεσμα της αξιολόγησης. [2]



Εικόνα 2.4 - Standardization Organizations [2]

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι το 5G αναφέρεται σε συστήματα κινητής που καλύπτουν τις απαιτήσεις που περιγράφονται στο IMT-2020 [1]. Το IMT-2020 επεκτείνει και υποστηρίζει σεναρία χρήσεων και εφαρμογών, που περιλαμβάνουν:

eMBB χρήση, η οποία είναι ανθρωποκεντρική ως προς την πρόσβαση σε περιεχόμενο multimedia, υπηρεσίες και δεδομένα (3D video, UHD resolution, augmented reality etc).

URLLC χρήση, η οποία έχει αυστηρές απαιτήσεις σε χωριτικότητα, καθυστέρηση μετάδοσης, διαθεσιμότητα (FoF, Industry Automation, V2X apps, mission-critical apps etc)

mMTC χρήση, η οποία διαχειρίζεται πάρα πολύ μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών που τυπικά εκπέμπουν ένα σχετικά μικρό όγκο δεδομένων (smart grid, smart home, smart cities etc).

Τα περιβάλλοντα ελέγχου ορίζονται ως συνδυασμός γεωγραφικών χαρακτηριστικών και σεναρίων χρήσης. Στην οδηγία ITU-P M.2412, γίνεται ένας κατανοητός ορισμός αυτών των περιβαλλόντων.

TABLE I  
SUMMARY OF IMT-2020 TEST ENVIRONMENTS

Name	Description	Scenario	Traffic patterns
Indoor hotspot-eMBB	Offices and/or shopping malls	<i>Environment:</i> floor with an area of 120 m x 50 m <i>Users:</i> stationary or pedestrian <i>Deployment:</i> 12 sites which are placed in 20 meter spacing	Full buffer
Dense urban-eMBB	City with high user density	<i>Environment:</i> urban environment with 19 sites (Inter Site Distance (ISD) = 200m) <i>Users:</i> pedestrian and vehicular <i>Deployment:</i> Composed of two layers, macro and micro. The macro layer follows a regular grid with three Transmission Reception Points (TRxPs) per site, and the micro layer is composed of 3 micro sites randomly dropped in each macro TRxP area	Full buffer
Rural-eMBB	Rural area with larger and continuous coverage	<i>Scenario:</i> rural environment with 19 sites (ISD = 1732 m or 6000 m) <i>Users:</i> pedestrian, vehicular and high speed vehicular <i>Deployment:</i> regular grid as in the dense urban-eMBB environment	Full buffer
Urban macro-mMTC	City with a high number of connected machine type devices	<i>Scenario:</i> urban environment with 19 sites (ISD = 500m) <i>Deployment:</i> regular grid as in the dense urban-eMBB environment	Poisson packet arrival (1 message per day or every 2 hours)
Urban macro-URLLC	City with services requiring URLLC communications	<i>Scenario:</i> regular grid as in the dense urban-eMBB environment <i>Deployment:</i> regular grid as in the dense urban-eMBB environment	Full buffer

Εικόνα 2.5 - Test environments [2]

Στην έκδοση 14 της αναφοράς 39.923 [2] της 3GPP, ορίζονται τα σενάρια εφαρμογής και οι απαιτήσεις τους, σύμφωνα με την γενική οδηγία της IMT-2020.

## Κεφάλαιο 2

TABLE III  
SUMMARY OF 3GPP DEPLOYMENT SCENARIOS

Name	Scenario
Indoor hotspot-cMBB	<i>Description:</i> offices and/or shopping malls <i>Environment:</i> indoor floor (open office) <i>Users:</i> 10 users per TRxP, indoor, 3 km/h <i>Deployment:</i> 12 TRxPs per 120m x 50m (ISD = 20m)
Dense urban	<i>Description:</i> city centres and dense urban areas <i>Environment:</i> high user densities and traffic loads, outdoor and outdoor-to-indoor coverage <i>Users:</i> 10 users per TRxP, 80% indoor (3 km/h), 20% outdoor (30 km/h) <i>Deployment:</i> macro layer with ISD = 200m, micro layer with 3 TRxPs (outdoor) per macro TRxP
Rural	<i>Description:</i> larger and continuous coverage <i>Scenario:</i> rural environment <i>Users:</i> 10 users per TRxP, 50% outdoor vehicles (120 km/h) and 50% indoor (3 km/h) <i>Deployment:</i> regular grid with ISD = 1732 m or 5000 m
Urban macro	<i>Description:</i> city <i>Scenario:</i> urban environment <i>Users:</i> 10 users per TRxP, 20% outdoor in cars (30 km/h), 80% indoor in houses (3 km/h) <i>Deployment:</i> regular grid (ISD = 500 m)
High speed	<i>Description:</i> high speed trains <i>Scenario:</i> track in high speed trains <i>Users:</i> 100% of users in train, 300 UEs per macro cell (1000 passengers per train and 10% of activity ratio), 500 km/h <i>Deployment:</i> ISD 1732m between RRH sites, with two TRxPs per RRH site (following the track)
Extreme long distance coverage	<i>Description:</i> very large areas with low density of users <i>Scenario:</i> rural environment <i>Users:</i> depending on the target user experience data rate (2 Mbps while stationary and 384 kbps while moving); up to 160 km/h <i>Deployment:</i> isolated cell with 100 km range
Urban coverage for massive MTC	<i>Description:</i> large cells and continuous coverage for mMTC <i>Scenario:</i> very high connection density of mMTC devices <i>Users:</i> 20% outdoor in cars (100 km/h) or users (3 km/h), and 80% indoor users <i>Deployment:</i> macro with ISD = 1732 or 500 m
Highway scenario	<i>Description:</i> vehicles in highways with high speed <i>Scenario:</i> highway <i>Users:</i> 100% in vehicles, with an inter-vehicle distance of 0.5 or 1 sec * average vehicle speed (100-300 km/h), sending 50 messages per second <i>Deployment:</i> macro only (ISD = 1732 or 500 m) or macro + RSUs (Roadside Unit, i.e. an eNB or UE with V2X communications, ISD = 50 or 100 m)

Urban coverage for massive MTC	<i>Deployment:</i> isolated cell with 100 km range <i>Description:</i> large cells and continuous coverage for mMTC <i>Scenario:</i> very high connection density of mMTC devices <i>Users:</i> 20% outdoor in cars (100 km/h) or users (3 km/h), and 80% indoor users <i>Deployment:</i> macro with ISD = 1732 or 500 m
Highway	<i>Description:</i> vehicles in highways with high speed

Εικόνα 2.6 – Test application scenarios [2]

Πιο συγκεκριμένα, για επικοινωνία M2M, η 3GPP στην οδηγία TP37.868 αναλύει την σπουδή για smart electric metering, fleet management, earthquake monitoring εφαρμογές. Το σύστημα περιγράφεται στον πίνακα:

TABLE VI  
SUMMARY OF 3GPP TRAFFIC MODELS FOR MTC (3GPP TR 37.868)

Parameter	Statistical characterization
<b>Traffic model 1</b>	
Number of MTC devices	1000, 3000, 5000, 10000, 30000
Arrival distribution	Uniform distribution over $T=60$ seconds
Application packet size	200 bytes
<b>Traffic model 2</b>	
Number of MTC devices	1000, 3000, 5000, 10000, 30000
Arrival distribution	Beta distribution over $T=10$ seconds ( $\alpha=3, \beta=4$ ) $f_t = \frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1}Beta(\alpha,\beta)}$ , where $Beta(\alpha, \beta)$ is the Beta function
Application packet size	200 bytes

Εικόνα 2.7 - M2M traffic model [2]

Ενώ, αντίστοιχα στην 36.888, γίνεται παράθεση δύο μοντέλων για mMTC χρήση, μια για περιοδικότητα στις εκπομπές και μια για σποραδικές ακανόνιστες εκπομπές.



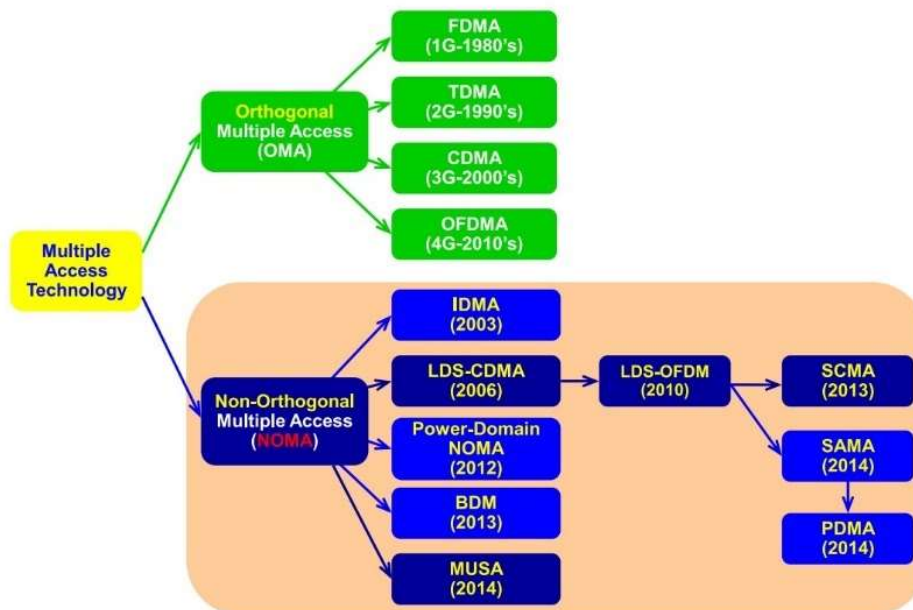
**TABLE VII**  
**SUMMARY OF 3GPP TRAFFIC MODELS FOR MTC (3GPP TR 36.888)**

Parameter	Statistical characterization
<b>Regular reporting for low-cost MTC (no mobility)</b>	
UL interval	1 min (optional), 5 min, 30 min, 1 hour
Packets (bits)	1000, optional 10000
Mobility	Static, pedestrian (optional)
<b>Regular reporting for low-cost MTC (limited mobility)</b>	
UL interval	5 s (optional), 10 s, 30 s
Packets (bits)	1000
Mobility	Vehicular
<b>Triggered reporting (UL and DL)</b>	
Volume	256 bits, 1000 bits
Inter-arrival time	Exponential with mean of 30 seconds

Εικόνα 2.8 - Traffic Model Transmissions [2]

### 2.4.8 NOMA

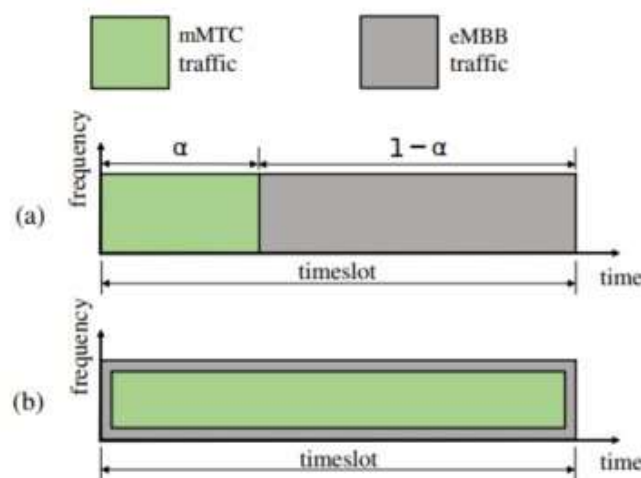
Η επαναστατική έννοια της μη-ορθογωνικής πολλαπλής πρόσβασης (NOMA – Non-orthogonal Multiple Access), έχει προταθεί ώστε να μπορούν να υποστηρίζονται παραπάνω χρήστες από τους διαθέσιμους ραδιοπόρους (Χρόνος, φάσμα συχνοτήτων). Η βασική ιδέα της NOMA είναι η μη-ορθογωνική ανάθεση ραδιοπόρων μεταξύ των χρηστών με ανώτατο τίμημα, αυτό της αυξημένης πολυπλοκότητας τους λήπτη, η οποία χρειάζεται για τον διαχωρισμό των μη-ορθογωνικών σημάτων. Πρόσφατα, διάφορα σχήματα/λύσεις NOMA έχουν διερευνηθεί, τα οποία μπορούν βασικά να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τις επονομαζόμενες (α) Power Domain NOMA και (β) Code Domain NOMA, περιλαμβάνοντας διάφορες λύσεις πολλαπλής πρόσβασης.[15]



Εικόνα 2.9 - The milestones of MA technologies [15]

Στο μοντέλο NOMA που εξετάστηκε, ένα Resource Block (RB) μοιράζεται/χρησιμοποιείται από περισσότερους των 1 χρήστες και η διαφορά στην στάθμη εκπομπής τους παίζει καθοριστικό ρόλο στην πολλαπλή πρόσβαση, ώστε να εκτελεστεί σωστά και με επιτυχία η SIC. [4].

Το μοντέλο συστήματος που επεξεργαζόμαστε, σχετίζεται με την απόδοση του UL ενός δικτύου 5G, όπου ένας χρήστης eMBB και πολλαπλοί mMTC συσκευές εκπέμπουν ανεξαρτήτως, πακέτα προς ένα κοινό ΣΒ. Ο eMBB και κάθε mMTC συσκευή, είναι μονής κεραίας (SISO), ενώ οι ΣΒ χρησιμοποιούν diversity, δηλαδή δύο κεραίες λήψης και εφαρμογή MRC – Maximum Ratio Combining. Ουσιαστικά, το σήμα λαμβάνεται από δύο κεραίες που έχουν μια απόσταση ανάμεσά τους, και προστίθενται τα SNR τους. Θεωρούμε ότι ένας ραδιοπόρος αποτελείται από ένα time slot και ένα κανάλι συχνότητας  $f$ , και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με ορθογονική απόδοση σε έναν χρήστη, είτε με μη-ορθογονική απόδοση σε δύο ή περισσότερους χρήστες.[6].



Εικόνα 2.10 - OMA vs NOMA data resources usage [6]

### 2.4.9 Hot Points

Ο διαμοιρασμός των mMTC users, εφαρμόζεται γύρω από σημεία συγκέντρωσης, τα hot points. Αυτά αντιστοιχούν σε πυκνώσεις συσκευών, βάσει του Urban Macro σεναρίου. Σύμφωνα με την απαιτούμενη ποσότητα, για το μέγεθος του καμβά παρατήρησης, πρέπει να είναι περίπου 50 σημεία. Η ακτίνα κάθε σημείου είναι 100 μέτρα. Επιτρέπεται η συσχέτιση των ακραίων χρηστών κάθε σημείου συγκέντρωσης. Παρατηρείται έτσι η κατάσταση, ακραία σημεία ενός hot point να είναι πιο κοντά στον πυρήνα άλλου hot point, αλλά αυτό δεν επηρεάζει την παρατήρηση διότι πραγματοποιείται ως προς τον ΣΒ που «ανήκει» η συσκευή και την απόσταση μεταξύ τους. Η καταχώρηση των χρηστών στους ΣΒ, γίνεται βάσει της καλύτερης λήψης. Δηλαδή, ένα UE, καταχωρείται στον αντίστοιχο ΣΒ αφού πρώτα υπολογιστούν οι απώλειες βάσει απόστασης και Rayleigh διαλείψεων.

## 2.5 Μοντέλο καναλιού

Κανάλι ονομάζουμε την κατάσταση/ποιότητα της ασύρματης ζεύξης που χρησιμοποιούμε για την επίτευξη της επικοινωνίας. Χαρακτηρίζεται από μεγέθη, όπως: χωρητικότητα, απώλειες απόστασης Path Loss, LoS, απώλειες διάδοσης (Rayleigh and Shadow fading).



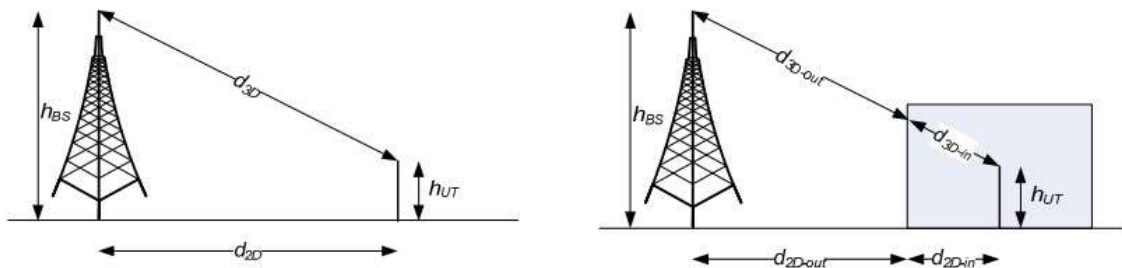
Η χωρητικότητα του καναλιού, ορίζεται ως το μέγιστο επιτεύξιμο Throughput που μπορεί να πετύχει μια ζεύξη πάνω από αυτό το κανάλι, συναρτήσει του διαθέσιμου bandwidth, της ληφθήσας ισχύ και του θορύβου (μπορεί να είναι μαζί με παρεμβολή και να έχουμε AWGN + Interference). Η μαθηματική του παράσταση, είναι:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Όπου C [bits/s]: το μέγιστο επιτεύξιμο throughput, W [Hz]: το εύρος φάσματος του καναλιού, S[W]: Η ισχύς του ληφθέντος σήματος, N[W]: η ισχύς παρεμβολής/θορύβου.

Η κατάσταση LoS (Line of Site), ορίζεται από την τοπολογική και γεωγραφική προσέγγιση του χάρτη παρατήρησης, σχετικά με τις θέσεις των σημείων ενδιαφέροντος (ΣΒ, χρήστες) και αν κτήρια ή/και άλλα εμπόδια παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε να παρεμποδίζουν την οπτική επαφή τους. Η επίπτωση άλλων εμποδίων που δεν αναπαρίστανται στον χάρτη, όπως δέντρα αυτοκίνητα κ.α. μοντελοποιούνται ξεχωριστά με χρήση όρων σκίασης και παρεμπόδισης. [19]

Σύμφωνα με την ETSI TR 138 901 v14.3.0 [17], τα μοντέλα των απωλειών της ζεύξης έχουν συγκεντρωθεί στον πίνακα 7.4.1-1 και οι ορισμοί των αποστάσεων καταγράφονται στα παρακάτω σχήματα: (Σημείωση:  $d_{3D-ou} + d_{3D-in} = \sqrt{(d_{2D-ou} + d_{2D-i})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2}$ )



Εικόνα 2.11 - Definitions of distances in Path Loss calculation [17]

Το υπό μελέτη σύστημα, έχει 80% indoor users, και 20% outdoor users. Οι χρήστες είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν εκπομπές, ανεξάρτητες μεταξύ τους. Δεδομένης της δυναμικής κατάστασης του συστήματος (μη σταθερά σημεία παρατήρησης), πραγματοποιούνται περιοδικοί υπολογισμοί απωλειών για τους EMBB και σε κάθε εκπομπή πακέτου mMTC οι αντίστοιχοι υπολογισμοί.

UMa	LOS	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km, \text{ see note 1} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m$
	NLOS	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ <p style="text-align: center;">for <math>10m \leq d_{2D} \leq 5km</math></p> $PL'_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 6$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m$ Explanations: see note 3
		Optional PL = $32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 7.8$	

Εικόνα 2.12 - Estimation of Path Loss for Urban Macro environment [17]

## 2.6 Υπολογισμός του περιθωρίου παρεμβολής και του πλήθους των reTX των mMTCs

Ο eMBB user εκπέμπει με μέγιστη ισχύ 24dBm. Αυτή η ισχύς εκπομπής μεταφράζεται σε αντίστοιχη ισχύ λήψης στον ΣΒ. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του SNR<sub>reqi</sub>, το μέγιστο rate που επιτυγχάνεται, είναι αυτό που έχει MCS με SNR αμέσως μικρότερο. Άρα στην πράξη, υπάρχει ένα περιθώριο μεταξύ του SNR<sub>actual</sub> – SNR<sub>reqi</sub> που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, ως ανεκτό περιθώριο από τον ΣΒ, ο οποίος μπορεί να δεχτεί χωρίς να απορρίψει το πακέτο του eMBB user.

Όταν ένας mMTC έχει δεδομένα προς μετάδοση, υπολογίζει την ισχύ εκπομπής του, να είναι τόση ώστε ο ΣΒ να λαμβάνει τα δεδομένα του χρήστη με αποδεκτή ισχύ παρεμβολής, για να μην δημιουργείται πρόβλημα με τα δεδομένα του eMBB. Το μέγιστο της εκπομπής του είναι 20dBm [20]. Ξέροντας το μέγιστο επιτρεπτό όριο παρεμβολής P<sub>interf</sub> και το SNR που αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ εκπομπής, είναι σε θέση να υπολογίσει το απαιτούμενο SNR που αντιστοιχεί σε ισχύ εκπομπής, τόση ώστε η λήψη από τον ΣΒ να μην ξεπερνά το αποδεκτό όριο.

$$SNR_{mMTCreq} [dB] = P_{rxreq} [dBm] - P_n [dBm]. \Rightarrow P_{rxreq} [dBm] = SNR_{mMTCreq} + P_n$$

$$\Theta \text{α πρέπει να ισχύει } P_{RX} \leq P_{interf}$$

Οι πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν είναι :

1) P<sub>tx\_mMTC\_max</sub> > P<sub>tx\_int\_adm</sub> > P<sub>tx\_req</sub>. Ο χρήστης μειώνει την εκπομπή του ώστε να φτάσει στο P<sub>tx\_req</sub>.

2) P<sub>tx\_mMTC\_max</sub> > P<sub>tx\_req</sub> > P<sub>tx\_int\_adm</sub>. Ο χρήστης, μειώνει την ισχύ εκπομπής του στο επιτρεπτό όριο παρεμβολής, αλλά επειδή αυτό είναι μικρότερο από το απαιτούμενο ώστε να είναι επιτυχής η εκπομπή, επαναλαμβάνει την εκπομπή με ισχύ P<sub>tx\_int\_adm</sub>, τόσες φορές, όσες χρειάζονται για να συγκεντρωθεί η απαιτούμενη ενέργεια στον ΣΒ και να πραγματοποιηθεί με επιτυχία, η αποκωδικοποίηση.

3) P<sub>tx\_int\_adm</sub> > P<sub>tx\_req</sub> > P<sub>tx\_mMTC\_max</sub>. Ο χρήστης εκπέμπει με την μέγιστη ισχύ και επαναλαμβάνει την εκπομπή στα αμέσως επόμενα slots, μέχρι το επίπεδο ενέργειας στην λήψη του ΣΒ, να φτάσει το P<sub>tx\_req</sub>.

4)  $P_{tx\_int\_adm} > P_{tx\_mMTC\_max} > P_{tx\_req}$ . Ο χρήστης μειώνει την εκπομπή του ώστε να φτάσει στο  $P_{tx\_req}$ .

5)  $P_{tx\_req} > P_{tx\_mMTC\_max} > P_{tx\_int\_adm}$ . Ο χρήστης εκπέμπει με την  $P_{tx\_int\_adm}$  ισχύ και επαναλαμβάνει την εκπομπή στα αμέσως επόμενα slots, μέχρι το επίπεδο ενέργειας στην λήψη του ΣΒ, να φτάσει το  $P_{tx\_req}$ .

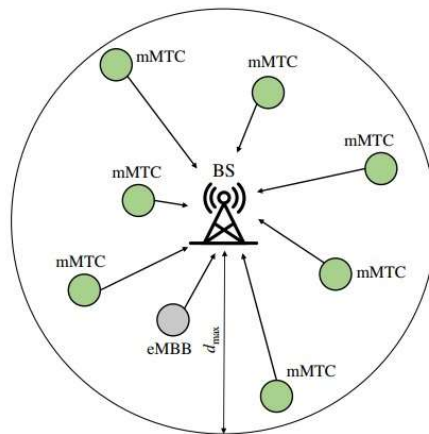
6)  $P_{tx\_req} > P_{tx\_int\_adm} > P_{tx\_mMTC\_max}$ . Ο χρήστης εκπέμπει με την  $P_{tx\_mMTC\_max}$  ισχύ και επαναλαμβάνει την εκπομπή στα αμέσως επόμενα slots, μέχρι το επίπεδο ενέργειας στην λήψη του ΣΒ, να φτάσει το  $P_{tx\_req}$ .

Παρατηρούμε ότι κάποιες περιπτώσεις, έχουν την ίδια αντιμετώπιση και άρα μπορούν να συμπτυχθούν. Έτσι καταλήγουμε στο πιο συγκεντρωτικό αποτέλεσμα, η ισχύς εκπομπής των mMTC users που είναι η απαιτούμενη για την επιτυχία του πακέτου, να είναι ή η απαιτούμενη βάσει SNR ή να είναι η μέγιστη δυνατή [20dBm] ή η επιτρεπόμενη ισχύ παρεμβολής, αν όμως αυτές είναι οι ελάχιστες εκ των τριών, αλλά με αντίστοιχες επανεκπομπές, ώστε να είναι επιτυχές το πακέτο.

## Κεφάλαιο 3ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

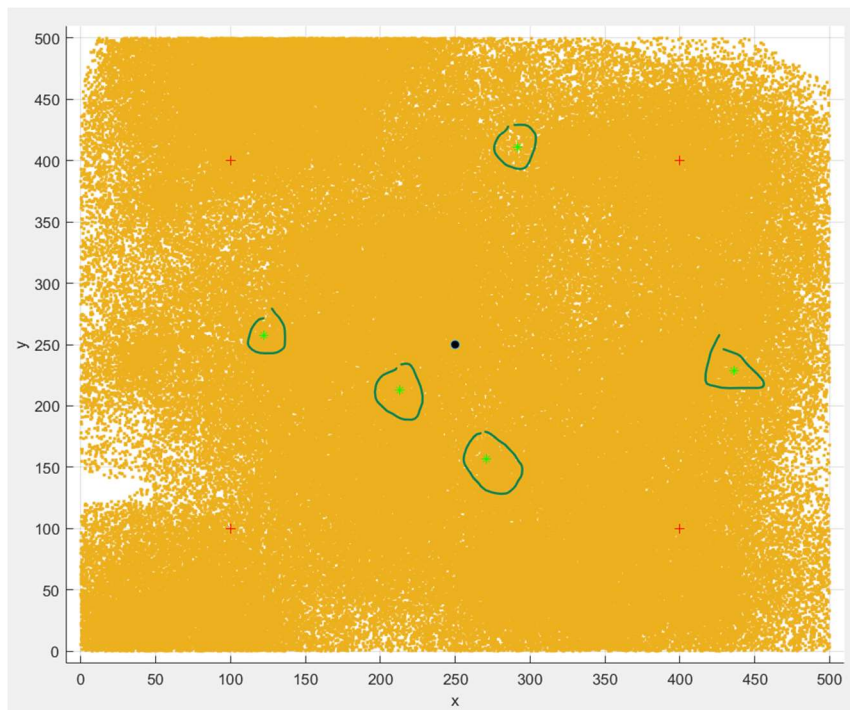
### 3.1 Εισαγωγή

Στην αρχή, κατά τις πρώτες σκέψεις, προκρίθηκε η περίπτωση να εξεταστεί η NOMA εφαρμογή σε μοντέλο 1 ΣΒ, 1 eMBB user, 1 mMTC device. Αυτό τελικά εγκαταλείφθηκε και εφαρμόστηκε η πιο ρεαλιστική προσομοίωση των 5 διαφορετικών BS, 1 eMBB user / BS, 50000 mMTC devices / BS. Όπως περιγράφεται στο [15], το 5G κατά την εφαρμογή του, αναμένεται να καλύπτει την επικοινωνία μεταξύ μηχανών, τουλάχιστον  $10^6/\text{km}^2$ .



Εικόνα 3.1 - Σχήμα προσομοίωσης [6]

Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, το αποτέλεσμα, είναι αντίστοιχο της παρακάτω εικόνας:



Εικόνα 3.2 - Τοποθέτηση των χρηστών στον καμβά παρατήρησης

Επειδή το τυπικό πλήθος χρηστών είναι  $1 \times 10^6 / \text{km}^2$ , άρα πάνω από 200.000 UEs/2500m<sup>2</sup>, το μέγεθος του καμβά περιορίστηκε στο  $\frac{1}{4} \text{ km}^2$  (500 X 500μ) χάριν συντομίας εκτέλεσης του κώδικα προσομοίωσης. Ο χρόνος παρατήρησης είναι 1h. Να σημειωθεί, οι θέσεις των eMBB (πράσινα σημεία), αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Η εικόνα 3.2 αποτελεί την τελευταία αποτύπωση των θέσεων, μιας συγκεκριμένης εκτέλεσης.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB και αναπτύχθηκε ο κατάλληλος κώδικας. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης, έχουν θεωρηθεί ήδη ολοκληρωμένα κάποια προ απαιτούμενα βήματα, απαραίτητα για την πραγματοποίηση της ζεύξης. Όπως π.χ. η ενημέρωση των mMTC devices και eMBB από το gNB (5G BS) για το πόσα resource blocks (RBs) θα χρησιμοποιήσουν (50 RBs για τους eMBB, 10RBs για τους mMTC), με τι ισχύ θα εκπέμψουν ώστε να μην δημιουργούν παρεμβολή, ποια είναι τα διαθέσιμα προοίμια (preambles), κ.α. Αυτό συμβαίνει με την αποστολή εκ μέρους του gNB με το DL – Down Link, του PDCCH – Physical Data Control Channel.

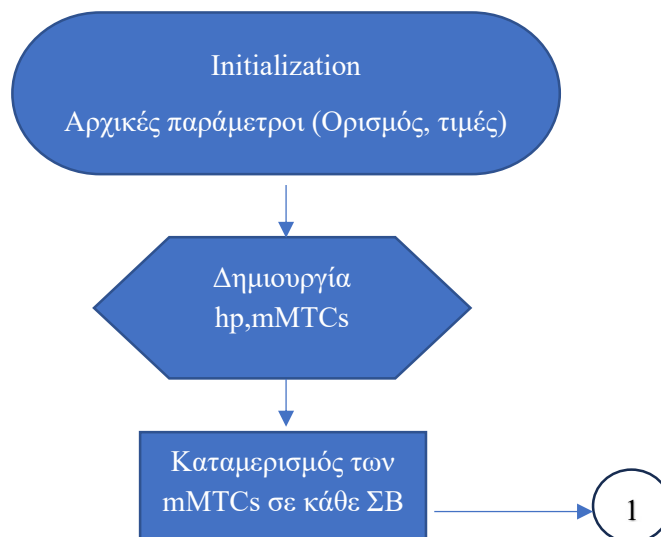
Στην προσομοίωση επιλέχτηκε η χρήση  $\mu=1$  (SCS 30kHz, slot duration 0.5ms,  $BW_{PRB} : 360\text{KHz}$ ). Το συνολικό εύρος συχνοτήτων είναι 100 MHz, με κεντρική συχνότητα  $f_c: 3,5\text{GHz}$  (FR1).

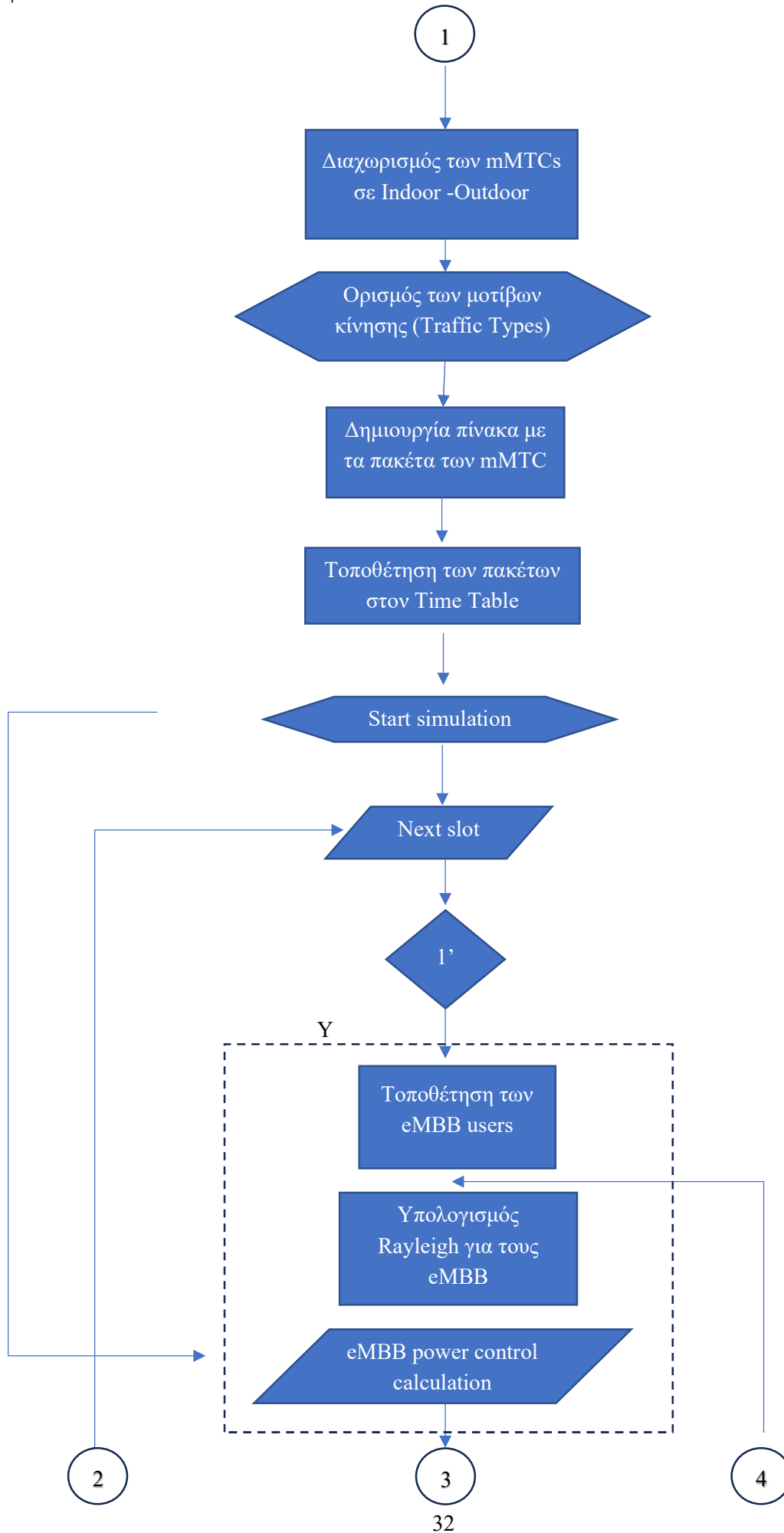
Ο όγκος των δεδομένων, ορίστηκε σύμφωνα με το μοντέλο [2] στο 1kbits / Tx. Αρκετός όγκος για να καλύψει τις αναμενόμενες ανάγκες ενός mMTC device.

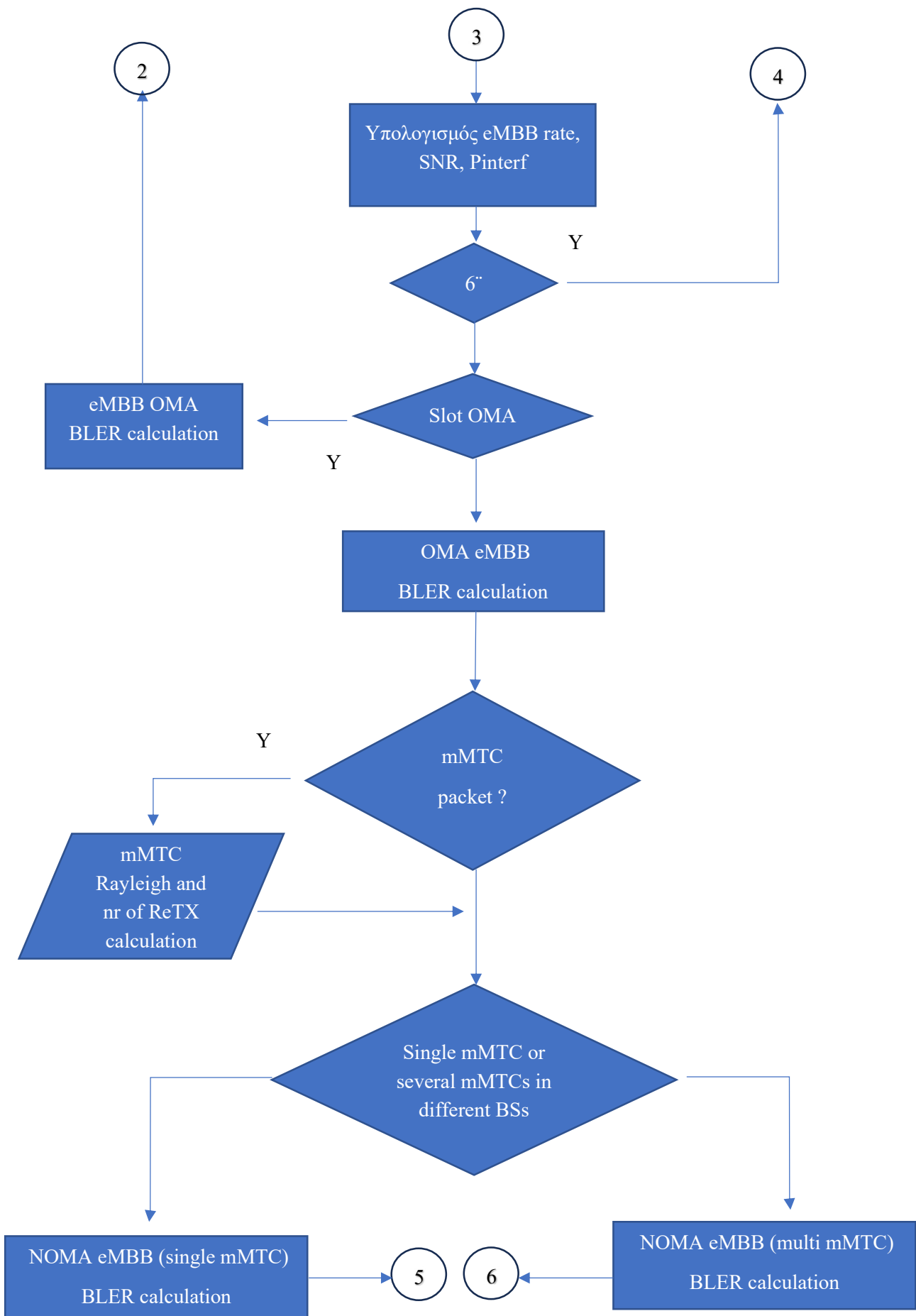
Σε μια γενική περιγραφή του κώδικα, μπορούμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρία μέρη:

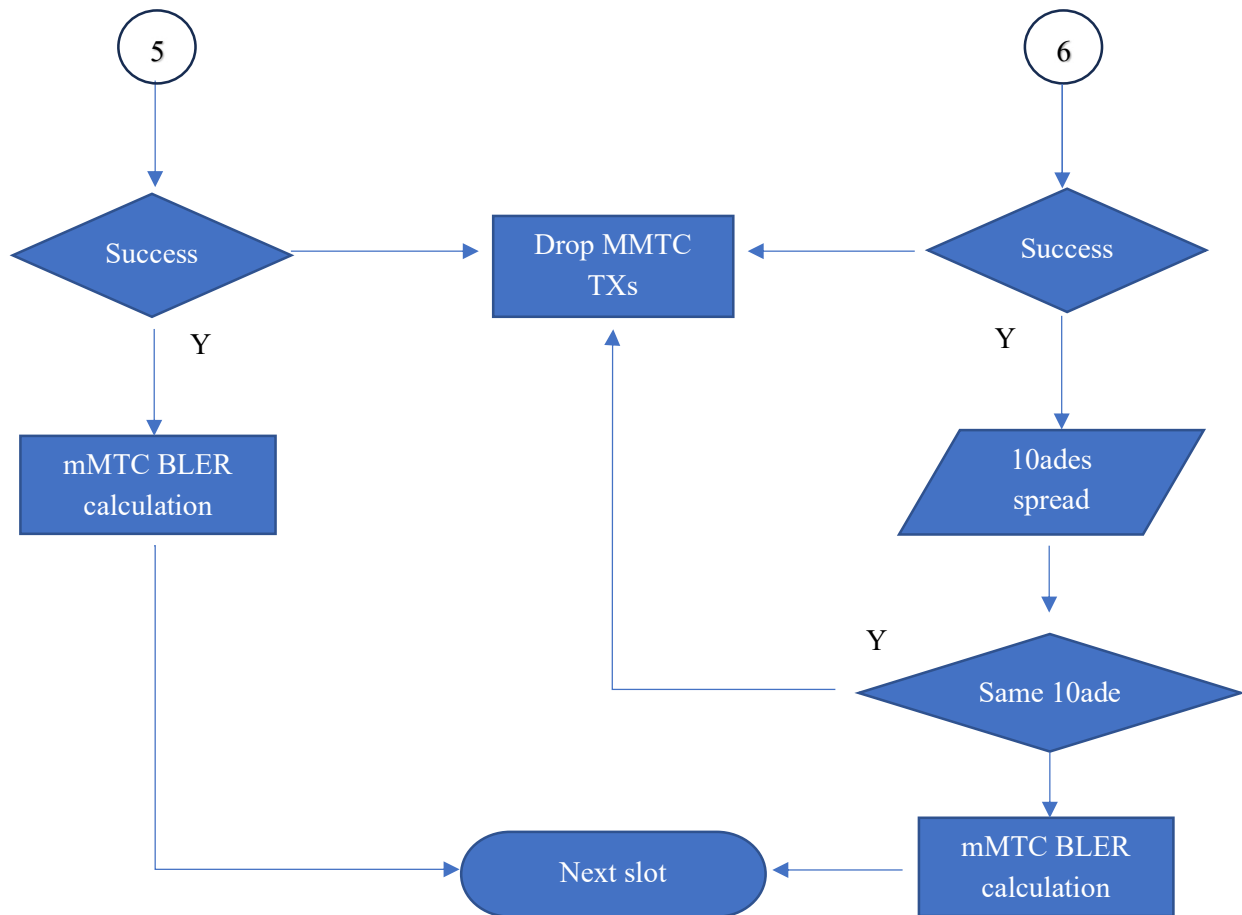
- Απόδοση τιμών σε σταθερά μεγέθη, όπως ύψη κεραιών των ΣΒ και των UEs, noise figure κ.α., που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, για να υπολογιστούν μεταβλητές, όπως το Path Loss, Rayleigh fadings κ.α. Σε αυτό το μέρος του κώδικα, καταγράφεται και το σύνολο των αποδεκτών SNR<sub>cq</sub> για τους χρήστες και των δύο κατηγοριών, που αποδίδονται από την χρήση των αντίστοιχων functions.
- Υπολογισμοί και εκτιμήσεις. Το μέρος του κώδικα που δημιουργούνται ο χώρος παρατήρησης - καμβάς (500μ X 500μ), οι χρήστες και οι ΣΒ (οι θέσεις τους στον καμβά), οι περιοδικότητες των διαφορετικών μοτίβων εκπομπών, η απόδοση αυτών των περιοδικοτήτων στους χρήστες.
- Εκτέλεση του κυρίως μέρους, ανά slot - χρονική παρατήρηση και καταγραφή αποτελεσμάτων.

### 3.2 Simulation Flow Chart









### 3.3 Επεξήγηση του προγράμματος προσομοίωσης

#### 3.3.1 Απόδοση αρχικών τιμών

Στην αρχή του κώδικα της προσομοίωσης, γίνεται η απόδοση τιμών σε σταθερές παραμέτρους.

```

Numerology = 1; % SCS 30kHz, 14 OFDMS/slot, slot period 0.5ms
NumofPreambles = 4;
NumofAttempts = 4;
initial_backoff = 12;
Transport_block_size = 480; % MCS 10 Table3
numOfSlots = [1 2 4 8];
SCS = [15 30 60 180]; % kHz
SlotLength = [1 0.5 0.25 0.125]; % ms
OFDMsymbol = [14 28 56 112]; % 1 slot=14 OFDM symbols
IndoorDevicesPercentage = 0.8; % Percentage of indoor mMTC devices
rho = 10; % (m) average buliding/blockage height
hMBS = 25; % (m) macro base station antenna height
hSBS = 10; % (m) small base station antenna height
hu = 1.5; % (m) user equipment antenna height
epsilon = 0.5; % fraction of network area covered by buildings
Y = 300/1000^2; % Average number of buildings per unit area
Ptx_BS_dBm = 30; %dBm
Ptx_BS_mW = 10^(Ptx_BS_dBm/10); %mW
Ptx_mMTC_dBm = 20; %dBm
Ptx_mMTC_mW = 10^(Ptx_mMTC_dBm/10); % mW
Ptx_eMBB_dBm = 24;%dBm
  
```



```
Ptx_eMbb_mW= 10^(Ptx_eMbb_dBm/10); %mW
aLOS = 2.5; % path loss exponent for LOS
aNLOS = 3.5; % path loss exponent for NLOS
mLOS = 10; % m parameter of  $\tilde{A}f\tilde{E}'$  function
mNLOS = 1; % m parameter of  $\tilde{A}f\tilde{E}'$  function
```

Κώδικας 3.1 - Αρχικοποίηση του προγράμματος

### 3.3.2 Παραμετροποίηση χρηστών

Αυτές χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για τον υπολογισμό τιμών και μεταβλητών όπως το path loss. Ακόμα και παράμετροι που μπορεί να αποκτήσουν περισσότερες από μια τιμές, οι οποίες όμως είναι γνωστές (π.χ. slot length), δίνονται με την μορφή πίνακα. Εδώ είναι που δηλώνονται και οι παράμετροι για τον υπολογισμό των απωλειών καθώς και οι τυπικές τιμές εκπομπής των διαφόρων τύπων.

Ακολουθεί η παραμετροποίηση των χρηστών που λαμβάνουν μέρος.

```
embbPRBnumber=50;
eMbb_PRB_symbols = embbPRBnumber*(12*14-12); % -12 DM-RS per PRB;
BW_eMbb = embbPRBnumber*12*SCS(Numerology+1)*10^3;
global eMbbUserData;
global UserData;

UserData = [];
eMbbUserData = [];
TotaleMbbUserData = [];

mmtcPRBnumber=10;
mMTC_PRB_symbols=mmtcPRBnumber*(12*OFDMsymbol(Numerology+1)-12); % -12
DM-RS per PRB;
BW_mMTC = mmtcPRBnumber*12*SCS(Numerology+1)*10^3;
MCS_mMTC = 5;

Carrier_frequency = 3.5; % GHz
RACH_period = 5; % ms
Gbs = 10+rand*2; % BS gain (dB)
Lother = 2; % Other losses (dB)
NF = 5; % Noise figure of base station (dB)
```

Κώδικας 3.2 – Παράμετροι eMbb and mMTC χρηστών

Στη συνέχεια, δίνονται τα δεδομένα των MCS (βάσει των πινάκων της οδηγίας), τα υπολογισμένα όρια του SNR<sub>req</sub> για τους δύο τύπους χρηστών καθώς και η διάρκεια παρατήρησης όπως και ο καμβάς της τοποθέτησης των χρηστών.

```
MCStable1 = [2,120,.2344; 2,157, .3066; 2,193,.3770; 2,251,.4902;
2,308,.6016; 2,379,.7402; 2,449,.8770; 2,526,1.0273; 2,602,1.1758;
2,679,1.3262; 4,340,1.3281; 4,378,1.4766; 4,434,1.6953; 4,490,1.9141;
4,553,2.1602; 4,616,2.4063; 4,658,2.5703; 6,438,2.5664; 6,466,2.7305;
6,517,3.0293; 6,567,3.3223; 6,616,3.694; 6,666,3.9023; 6,719,4.2129;
6,772,4.5234; 6,822,4.8164; 6,873,5.1152; 6,910,5.3320; 6,948,5.5547];

MCStable2 = [2,120,0.2344; 2,193,0.3770; 2,449,0.8770; 4,378,1.4766;
4,490,1.9141; 4,616,2.4063; 6,466,2.7305; 6,567,3.3223; 6,666,3.9023;
6,772,4.5234; 6,873,5.1152; 8,711,5.5547; 8,797,6.2266; 8,885,6.9141;
8,948,7.4063];
```

```

MCStable3 = [2,30,0.0586; 2,50,0.0977; 2,78,0.1523; 2,120,0.2344;
2,193,0.3770; 2,308,0.6016; 2,449,0.8770; 2,602,1.1758; 4,378,1.4766;
4,490,1.9141; 4,616,2.4063; 6,466,2.7305; 6,567,3.3223; 6,666,3.9023;
6,772,4.5234];

SNRcqi_dB = [-4.295; 2.065; 2.35; 5.61; 7.515; 9.42; 10.59; 12.62;
14.52; 16.495; 18.345; 19.7; 21.755; 23.85; 25.34];
mmtc_SNRcqi_dB = [-9.995; -8.06; -6.14; -4.21; -1.995; 0.34; 2.395;
4.15; 5.645; 7.545; 9.45; 10.62; 12.65; 14.55; 16.525];
Dt = SlotLength(Numerology+1); %time resolution for simulation in ms
TotalRunTimeHours = 1;
TotalRunTime = TotalRunTimeHours*60*60*1000*numOfSlots (Numerology+1); %
Total simulation time in slots
%Simulation window parameters
xMin=0;xMax=500;
yMin=0;yMax=500;
xDelta=xMax-xMin;yDelta=yMax-yMin; %rectangle dimensions
areaTotal=xDelta*yDelta;

```

Εικόνα 3.3 - MCS and CQI data

### 3.3.3 Υπολογισμός του SNRcqi για τους eMBB και τους mMTC χρήστες

Τα αποτελέσματα των SNRcqi για τους mMTC users, αναλόγως των MCS, βγαίνουν από την εκτέλεση της παρακάτω ρουτίνας. Παρόμοια ρουτίνα αποφέρει και τα SNRcqi των eMBB users.

```

Num_of_RB = 10;
mmtc_PRB_symbols=3240; %i=1 ->2 slots X 14 = 28 OFDMs, 10 PRBs

info_bits = mmtc_PRB_symbols*[0.0586; 0.0977; 0.1523; 0.2344; 0.3770;
0.6016; 0.8770; 1.1758;
1.4766; 1.9141; 2.4063;
2.7305; 3.3223; 3.9023; 4.5234];

total_symbols = mmtc_PRB_symbols;

for ii=1:length(info_bits)
    SNR_dB = -15:0.005:30;
    SNR = 10.^(.1*(SNR_dB-3));
    V = SNR.*(2+SNR)*log2(exp(1))^2./(1+SNR).^2;
    eps(ii,:) = qfunc(sqrt(total_symbols./V).*(log2(1+SNR)-
info_bits(ii)/total_symbols));
    semilogy(SNR_dB,eps(ii,:));
    hold on
end
grid
axis([-15 30 1e-3 1]);

XXXX = eps > .1; %Acceptable BLER 10% (0.1)
ind = sum(XXXX,2);
mmtc_SNRcqi = -10+(ind+1)*.005;
mmtc_SNR_dB = [-9.995; -8.06; -6.14; -4.21; -1.995; 0.34; 2.395; 4.15;
5.645; 7.545; 9.45; 10.62; 12.65; 14.55; 16.525];

```

Εικόνα 3.4 – Υπολογισμός των BLER ορίων για τους mMTC χρήστες

### 3.3.4 Δημιουργία και τοποθέτηση των χρηστών

Έπειτα, αποτυπώνονται οι χρήστες, πάνω στον καμβά της προσομοίωσης, σύμφωνα με την Poisson distribution, γύρω από τα σημεία συγκέντρωσης (hot points).

```
%Simulation window parameters
xMin=0;xMax=500;
yMin=0;yMax=500;
xDelta=xMax-xMin;yDelta=yMax-yMin; %rectangle dimensions
areaTotal=xDelta*yDelta;

%Point process parameters Macro-cells
MBSlambda=1e-6; %intensity (ie mean density) of the Poisson process

%Simulate Poisson point process
MBSPoints = 1;%poissrnd(areaTotal*MBSlambda);%Poisson number of points
MBSxx = 250;%xDelta*(rand(MBSPoints,1))+xMin;%x coordinates of Poisson
points
MBSyy = 250;%yDelta*(rand(MBSPoints,1))+yMin;%y coordinates of Poisson
points

%Point process parameters Small-cells
SBSlambda=4e-5; %[1,2,3,4...10]e-4 %intensity(density) of the Poisson
process

%Simulate Poisson point process
SBSPoints = 4;%poissrnd(areaTotal*SBSlambda);%Poisson number of points

SBSxx = [100;100;400;400];%xDelta*(rand(SBSPoints,1))+xMin;%x
coordinates of Poisson points
SBSyy = [100;400;100;400];%yDelta*(rand(SBSPoints,1))+yMin;%y
coordinates of Poisson points

figure
scatter(SBSxx,SBSyy,'x'); hold on
scatter(MBSxx,MBSyy,'o','MarkerFaceColor','k');
% axis([-10 xMax+10 -10 yMax+10])
xlabel('x');ylabel('y');
grid

% hotspots
37ambda = 2e-4; %intensity(density) of the Poisson process
hsPoints = 50;%poissrnd(areaTotal*37ambda); %Poisson number of points
hsxx = xDelta*(rand(hsPoints,1))+xMin; %x coordinates of Poisson points
hsyy = yDelta*(rand(hsPoints,1))+yMin; %y coordinates of Poisson points

%User equipment
cu = 5000; %1500 number of users per hotspot
R = 100; %Radius of hotspot
for ii = 1:hsPoints
    for kk = 1:cu
        xxp = -100;
        yyp = -100;
        while (xxp < xMin || xxp > xMax || yyp < yMin || yyp > yMax)
            Uedistance = R*rand;
            Ueangle = 2*pi*rand;
            xxp = hsxx(ii)+Uedistance*cos(Ueangle);
```

```

        yyp = hsy(ii)+Uedistance*sin(Ueangle);
    end
    Uexx((ii-1)*cu+kk) = xxp;
    Ueyy((ii-1)*cu+kk) = yyp;
end
end
scatter(Uexx,Ueyy, '.' );

%distance between MBS-user
MBSdistanceXXYY = sqrt((MBSxx-Uexx).^2+(MBSyy-Ueyy).^2);

%distance between SBS-user
SBSdistanceXXYY = sqrt((SBSxx-Uexx).^2+(SBSyy-Ueyy).^2);

NumofUE = length(Uexx);

```

Κώδικας 3.5 – Τοποθέτηση των χρηστών στον καμβά παρατήρησης

### 3.3.5 Κατάταξη χρηστών στους Σταθμούς Βάσης

Μετά την τοποθέτηση των χρηστών, ακολουθεί η κατάταξή τους από ποιο ΣΒ θα εξυπηρετούνται, βάσει απόστασής τους. Αυτό είναι και το πρώτο στοιχείο των υπολογισμών, γιατί μετά, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες κάθε χρήστη, βάσει απόστασης. Στο τέλος, η κατάταξη των χρηστών στους ΣΒ, βασίζεται στις απώλειες που έχει ο κάθε χρήστης. Ο ΣΒ στον οποίο έχει το μικρότερο PL, είναι και ο ΣΒ που τον εξυπηρετεί.

```

for ii = 1:NumofUE
    PL = zeros; dis = zeros; LOS = zeros;
    dis(1) = MBSdistanceXXYY(:,ii);
    BSserving = 1;
    [PL(1),LOS(1)] =
compute_path_loss(BSserving,dis(1),UserData(3,ii));
    Gbs = 10 + 3*rand; %%% Antenna gain of MBS
    PL(1) = PL(1) - Gbs;
    for jj = 2:SBSPoints+1
        BSserving = 9999+jj;
        dis(jj) = SBSdistanceXXYY(jj-1,ii);
        [PL(jj),LOS(jj)] =
compute_path_loss(BSserving,dis(jj),UserData(3,ii));
        Gbs = 8 + 4*rand; %%% Antenna gain SBS
        PL(jj) = PL(jj) - Gbs;
    end
    [plmin,II] = min(PL);
    if II==1
        UserData(1,ii) = 1;
    else
        UserData(1,ii) = 9999+II;
    end
    UserData(2,ii) = dis(II);

    Prx_BS_mMTC_dBm = Ptx_mMTC_dBm - plmin - Lother;
    UserData(4,ii) = Prx_BS_mMTC_dBm; % BS Prx from mMTC [dBm]
    UserData(7,ii) = plmin; % dB
    UserData(15,ii) = LOS(II); % 0:LOS 1:NLOS
end

```

Κώδικας 3.6 – Κατάταξη χρηστών στους ΣΒ

### 3.3.6 Δημιουργία των Traffic Types

Στη συνέχεια, ορίζονται οι διαφορετικές περιοδικότητες των εκπομπών, σύμφωνα με το μοντέλο που ακολουθήθηκε [2]. Οι τύποι κίνησης που καλύπτονται, είναι, 60TX - 5 TX - 2TX -1TX / ώρα και ο 5<sup>ος</sup> τύπος κίνησης που είναι η σποραδικός και ακολουθεί την τυχαιότητα ύπαρξης εκπομπής σε σταθερό χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων.

```
% traffic type 1: 1 message per 1 min, 60 Tx total
TT1_Period = 1*60*1000*numOfSlots (Numerology+1); % slot
TT1_NumofTx = floor (TotalRunTime/TT1_Period);

% traffic type 2: 1 message per 5 min, 12 Tx total
TT5_Period = 5*60*1000*numOfSlots (Numerology+1); % slot
TT5_NumofTx = floor (TotalRunTime/TT5_Period);

% traffic type 3: 1 message per 30 min, 2 Tx Total
TT30_Period = 30*60*1000*numOfSlots (Numerology+1); % slot
TT30_NumofTx = floor (TotalRunTime/TT30_Period);

% traffic type 4: 1 message per 60 min, 1 Tx total
TT60_Period = 60*60*1000*numOfSlots (Numerology+1); % slot
TT60_NumofTx = floor (TotalRunTime/TT60_Period);

% traffic type 5: exponential with mean of 30 seconds
MeanIAT = 30*1000*numOfSlots (Numerology+1);

UserData (5, :) = randi (5,1,NumofUE); % mMTC traffic period
%maxbackoff = initial_backoff*ones (1,NumofUE);
```

Εικόνα 3.7 – Τύποι κίνησης (Traffic Types)

Παρατηρούμε, ότι η απόδοση του χρόνου είναι σε διάρκεια time slot και μετατρέπεται σε ms και στη συνέχεια σε δευτερόλεπτα. Αυτό γίνεται για να υπάρχει αντιστοιχία χρόνου με το TTI του eMBB και να προσαρμόζεται η προσομοίωση σε αλλαγές του  $\mu$  (numerology).

### 3.3.7 Ορισμός των ποσοστών (Profile κίνησης) και απόδοση στους χρήστες mMTC

Τα Traffic Types, μοιράζονται σύμφωνα με τα ποσοστά συμμετοχής τους στα προφίλ κίνησης. Αυτές τις περιοδικότητες, τις αναθέτουμε στους χρήστες, έτσι ώστε ο καθένας να εμπίπτει σε αυτό το πλαίσιο παρατήρησης.

```
TrafficTypePerc = [2.5,10,35,50,2.5]; % Percentage of each traffic type
TrafficTypeAbsNr = (TrafficTypePerc./100)*NumofUE; %How many times each
Traffic Type appears
UserData (5, :) = 0; % mMTC traffic period annotation to UEs

for absNr1 = 1:5
    absNr2 = TrafficTypeAbsNr (absNr1);
    emptyUE = find (UserData (5, :)==0); % UEs without assigned TT
    toFill = randperm (length (emptyUE), absNr2);
    UserData (5, emptyUE (toFill)) = absNr1; % mMTC traffic period
annotation to UEs
end
Number_of_eMBB = SBSPoints+1;
```

Κώδικας 3.8 – Ορισμός του profile κίνησης

Η ανάθεση γίνεται με τυχαίο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ΣΒ εξυπηρετεί έναν eMBB user που εκπέμπει καθ' όλη την διάρκεια της παρατήρησης και πολλούς mMTC που εκπέμπουν σύμφωνα με το traffic type που τους αποδόθηκε, τυχαία.

```

NumofUE = length(UExx);
NumofTxUE = NumofUE;
UserTx = zeros(NumofUE,20);
for ii=1:NumofUE
    traffic_type = UserData(5,ii);
    switch traffic_type
        case 1
            UserTx(ii,1) = randi(TT1_Period);
            for kk=2:TT1_NumofTx-1
                UserTx(ii,kk) = UserTx(ii,kk-1)+TT1_Period;
            end
            UserData(10,ii) = TT1_NumofTx;
        case 2
            UserTx(ii,1) = randi(TT5_Period);
            for kk=2:TT5_NumofTx-1
                UserTx(ii,kk) = UserTx(ii,kk-1)+TT5_Period;
            end
            UserData(10,ii)=TT5_NumofTx;
        case 3
            TTx = randi(TT30_Period);
            if TTx < TotalRunTime
                for kk=2:TT30_NumofTx-1
                    UserTx(ii,kk) = UserTx(ii,kk-1)+TT30_Period;
                end
            else
                NumofTxUE = NumofTxUE-1;
            end
            UserData(10,ii) = TT30_NumofTx;
        case 4
            TTx = randi(TT60_Period);
            if TTx < TotalRunTime
                for kk=2:TT60_NumofTx-1
                    UserTx(ii,kk) = UserTx(ii,kk-1)+TT60_Period;
                end
            else
                NumofTxUE = NumofTxUE-1;
            end
            UserData(10,ii) = TT60_NumofTx;
        case 5
            UserTx(ii,1) = randi(MeanIAT);
            kk=1;
            while UserTx(ii,kk) <= TotalRunTime
                UserTx(ii,kk+1) = UserTx(ii,kk)+exprnd(MeanIAT);
                kk=kk+1;
            end
            for jj = 1:kk-1
                UserTx(ii,jj) = floor(UserTx(ii,jj));
            end
            UserTx(ii,kk) = 0;
            UserData(10,ii) = kk-1;
    end
end

```

Εικόνα 3.9 – Απόδοση των χρηστών στους τύπους κίνησης

### 3.3.8 Απόδοση των εκπομπών στα Time Slots

Μετά από τον ορισμό και την ανάθεση των τύπων εκπομπής, δημιουργούμε το χρονικό πλαίσιο παρατήρησης. Αντιστοιχεί σε διάστημα μιας ώρας αλλά είναι χωρισμένο σε slots. Σε αυτό, αποτυπώνουμε τις εκπομπές κάθε χρήστη.

```

TimeTable = zeros(TotalRunTime+1000,50);
%TotalRunTime/5 -> to create the groups => 3600000/5=720000

for ii=1:NumofUE
    %UserTx(ii,1)=ii;
    xpos = find(UserTx(ii,:)); % occupied Tx positions
    for kk=1:length(xpos)
        userpos = find(TimeTable(UserTx(ii,kk),:)==0); %Find the
positions of 0s in the row of the particular mMTC
        TimeTable(UserTx(ii,kk),userpos(1))=ii; %In the 1st 0 position,
put the mMTC nr
    end
end

end

```

Εικόνα 3.10 – Καταχώρηση των mMTC εκπομπών στα time slots

### 3.3.9 Αλλαγές θέσεων στους eMBB και υπολογισμός απωλειών

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης, οι καταστάσεις που λαμβάνουν μέρος είναι δυναμικές. Πχ. σε ένα πραγματικό σύστημα, οι χρήστες δεν μένουν σταθεροί αλλά μεταβάλλουν την θέση τους. Έτσι και στην εκτέλεση, οι eMBB χρήστες αλλάζουν σημείο, κάθε ένα 1'.

```

% eMBB change place -----
if (flagC == 1 && noma == 0) || (i==1) % Each minute
    eMBBUserData(18,:) = eMBBUserData(18,)./ (i-
eMBBUserData(20,:));
    TotaleMBBUserData = [TotaleMBBUserData,eMBBUserData];
    Number_of_eMBB = SBSPoints+1;
    eMBB_num = 0;
    eMBBUserData = zeros(20,Number_of_eMBB);
    eMBBUserData(17,:) = Ptx_eMBB_dBm;
    eMBBUserData(20,:) = i;
    while eMBB_num < SBSPoints
        tempxx = xDelta*rand+xMin;
        tempyy = yDelta*rand+yMin;
        [eMBBdistSBS,ind] = min(sqrt((SBSxx-tempxx).^2+(SBSyy-
tempyy).^2));
        if isempty(find(eMBBUserData(1,:)==ind+10000, 1))
            eMBB_num = eMBB_num+1;
            eMBBxx(eMBB_num) = tempxx;
            eMBByy(eMBB_num) = tempyy;
            eMBBUserData(1,eMBB_num) = ind+10000; %eMBB user ID
            eMBBUserData(2,eMBB_num) = eMBBdistSBS; %Distance
between SBS and eMBB
        end
    end
    eMBB_num = 0;
    while eMBB_num < 1
        tempxx = xDelta*rand+xMin;
        tempyy = yDelta*rand+yMin;

```



```

eMBBdistMBS = sqrt((MBSxx-tempxx).^2+(MBSyy-tempyy).^2);
eMBBdistSBS = min(sqrt((SBSxx-tempxx).^2+(SBSyy-
tempyy).^2));
if eMBBdistMBS < eMBBdistSBS
    eMBB_num = eMBB_num+1;
    eMBBxx(Number_of_eMBB) = tempxx;
    eMBByy(Number_of_eMBB) = tempyy;
    eMBBUserData(1,Number_of_eMBB) = 1; %eMBB user ID -
eMBBUserData(1,ii)
    eMBBUserData(2,Number_of_eMBB) = eMBBdistMBS; %Distance
between MBS and eMBB - eMBBUserData(2,ii)
end
end
end

```

Εικόνα 3.11 – Αλλαγή θέσης στους eMBB χρήστες

Παίζει μεγάλο ρόλο αυτή η μεταβολή στη θέση, διότι το περιθώριο ανοχής της παρεμβολής που μπορεί να αποδεχθεί ο ΣΒ, ώστε να αποκωδικοποιήσει σωστά το περιεχόμενο του eMBB, έχει άμεση σχέση με την απόσταση του eMBB user από τον ΣΒ και θα πρέπει κάθε φορά να πραγματοποιούνται οι κατάλληλοι υπολογισμοί, ώστε να ενημερώνονται οι συμμετέχοντες και να προσαρμόζουν τις εκπομπές τους. Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν το Rayleigh fading που υπομένει το κανάλι και το υπολογίζουμε κάθε λεπτό που αλλάζουν θέση οι eMBBs, όπως και το Path Loss. Με τη σειρά τους, συμμετέχουν στον υπολογισμό του SNR, της επιλογής του κατάλληλου MCS και τον υπολογισμό τελικώς, του περιθωρίου παρεμβολής που μπορεί να υπομένουν.

```

if RayYes == 0 && i~=1
    for jj = 1:Number_of_eMBB
        if eMBBUserData(4,jj) == 1
            gg = gamrnd(mLOS,1/mLOS);
        else
            gg = gamrnd(mNLOS,1/mNLOS);
        end
        eMBBUserData(8,jj) = gg;
        eMBBUserData(3,jj) = Ptx_eMBB_dBm - eMBBUserData(19,jj) +
Gbs - Lother + 10*log10(eMBBUserData(8,jj)); % BS Reception power from
eMBB users with Rayleigh
        eMBBUserData(14,jj) = Ptx_eMBB_dBm - eMBBUserData(19,jj) +
Gbs - Lother; % Average BS Reception power from eMBB users
        eMBB_Noise_power_dBm = -174 + 10*log10(BW_eMBB) + NF;
        SNR_dB = eMBBUserData(3,jj) - eMBB_Noise_power_dBm;
        if SNR_dB < SNRcqi_dB(1) % check if eMBB TX power is
adequate to attain CQI = 1
            %
            keyboard
            eMBBUserData(17,jj) = Ptx_eMBB_dBm + SNRcqi_dB(1) -
SNR_dB + 1; % Increase eMBB TX power to become .5 dB greater than
minimum required for CQI = 1
            eMBBUserData(3,jj) = eMBBUserData(17,jj) -
eMBBUserData(19,jj) + Gbs - Lother + 10*log10(eMBBUserData(8,jj)); % BS
Reception power from eMBB users with Rayleigh
            eMBBUserData(14,jj) = eMBBUserData(17,jj) -
eMBBUserData(19,jj) + Gbs - Lother; % Average BS Reception power from
eMBB user
        end
        if SNR_dB > SNRcqi_dB(end)+5 % check if eMBB TX power is
much greater than what is required to attain the higher CQI
            eMBBUserData(17,jj) = Ptx_eMBB_dBm + SNRcqi_dB(end) -
SNR_dB + 5; % Decrease eMBB TX power to become 5 dB greater than
minimum required for CQI = 1
        end
    end
end

```



```

        eMBBuserData(3,jj) = eMBBuserData(17,jj) -
eMBBuserData(19,jj) + Gbs - Lother + 10*log10(eMBBuserData(8,jj)); % BS
Reception power from eMBB users with Rayleigh
        eMBBuserData(14,jj) = eMBBuserData(17,jj) -
eMBBuserData(19,jj) + Gbs - Lother; % Average BS Reception power from
eMBB user
    end
    SNR_dB = eMBBuserData(3,jj) - eMBB_Noise_power_dBm;
%
    eMBBuserData(18,jj) = eMBBuserData(18,jj) +
10^(.1*eMBBuserData(17,jj)); % Add TX power every time it changes so to
caclulate average TX power
    eMBBuserData(5,jj) = SNR_dB; % eMBB SNR
    MCS_eMBB = sum(SNR_dB > SNRcqi_dB);
%
    if MCS_eMBB == 0
%
        keyboard
%
    end
    eMBBuserData(6,jj) = MCS_eMBB; %eMBB MCS index
    estimated_rate_eMBB = 0.9*MCStable2(MCS_eMBB,3) *
eMBB_PRB_symbols/0.001; % This rate refers to 10% eMBB BLER (10% rate
reduction)
    eMBBuserData(7,jj)= estimated_rate_eMBB;%eMBB rate
    Prx_BS_eMBB_mW = 10^(.1*eMBBuserData(3,jj));
    Pn_mW = 10^(.1*eMBB_Noise_power_dBm);
    SNRcqi = 10^(.1*SNRcqi_dB(MCS_eMBB));
    Pinterf = Prx_BS_eMBB_mW/SNRcqi - Pn_mW; %Pinterf in mW

    eMBBuserData(9,jj) = 10*log10(Pinterf); % Pinterf in dBm
end
end

```

Εικόνα 3.12 – Υπολογισμοί eMBB Rayleigh and MCS και Power Control

Εδώ επίσης, είναι το σημείο που γίνεται και το power control του eMBB. Πιο συγκεκριμένα, εάν το SNR του eMBB βγει τόσο μεγάλο ώστε να υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις του υψηλότερου MCS, τότε υποβαθμίζεται η ισχύς εκπομπής του, ώστε και το max MCS να καλύπτεται και η παρεμβολή προς τους υπόλοιπους να μειωθεί. Αντιθέτως, αν το υπολογιζόμενο SNR βγει αρκετά μικρό, τότε ενισχύεται η ισχύς του κατά 0.5 dB, ώστε να μπορέσει να έχει πιθανότητες επιτυχίας η εκπομπή.

### 3.3.10 Υπολογισμός αποδεκτής παρεμβολής ( $P_{interf}$ )

```

eMBBuserData(6,jj) = MCS_eMBB; %eMBB MCS index
    estimated_rate_eMBB = 0.9*MCStable2(MCS_eMBB,3) *
eMBB_PRB_symbols/0.001; % This rate refers to 10% eMBB BLER (10% rate
reduction)
    eMBBuserData(7,jj)= estimated_rate_eMBB;%eMBB rate
    Prx_BS_eMBB_mW = 10^(.1*eMBBuserData(3,jj));
    Pn_mW = 10^(.1*eMBB_Noise_power_dBm);
    SNRcqi = 10^(.1*SNRcqi_dB(MCS_eMBB));
    Pinterf = Prx_BS_eMBB_mW/SNRcqi - Pn_mW; %Pinterf in mW

```

Εικόνα 3.13 – Υπολογισμός αποδεκτής παρεμβολής

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, καταλήγουμε στον υπολογισμό του περιθωρίου παρεμβολής. Το χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό του αριθμού των επανεκπομπών στους mMTC users.

Όλα τα παραπάνω, εκτός από την αλλαγή θέσης, υπολογίζονται ξανά, κάθε 6°, δεδομένου ότι το Rayleigh fading δεν παραμένει σταθερό ακόμα και αν ο χρήστης είναι σταθερός.

Τα παραπάνω, αποτελούν τους περιοδικούς υπολογισμούς που γίνονται κατά την διάρκεια που εκτελείται η προσομοίωση, για να δημιουργηθεί κάθε φορά, το κατάλληλο πλαίσιο παρατήρησης.

### 3.3.11 Υπολογισμός OMA

Η παρατήρηση είναι επικεντρωμένη σε επίπεδο slot. Κάθε slot, έχει τρεις διαφορετικές επιλογές. Να μην έχει κίνηση mMTC, να έχει μόνο από έναν χρήστη, να έχει από 2 ή περισσότερους χρήστες.

Αν το slot έχει μόνο κίνηση eMBB, τότε υπολογίζεται μόνο το BLER του καναλιού του κάθε eMBB user. Στη συνέχεια, με τήρηση του ορίου για  $10^{-1}$  εσφαλμένα πακέτα, καταλήγουμε αν η κάθε εκπομπή από κάθε eMBB, σε αυτό το slot ήταν επιτυχής ή όχι. Καταγράφεται αντίστοιχα.

```
current_mMTC=[];
if noma==0
    for k=1:length(eMBBUserData(1,:))
        %pos = k; %find(eMBBUserData(1,k));
        eMBBUserData(13,k)= eMBBUserData(13,k)+1; %Counter of total
OMA eMBB packets
        RB_group = 0;
        BLER_eMBB =
compute_BLER_eMBBxR(k,BW_eMBB,eMBB_PRB_symbols,current_mMTC,RB_group);
% OMA eMBB BLER calculation
        if rand > BLER_eMBB
            eMBBUserData(12,k) = eMBBUserData(12,k)+1; %Counter of
successfull OMA eMBB packets
            eMBBUserData(16,k) = eMBBUserData(16,k) +
MCStable2(eMBBUserData(6,k),3)* eMBB_PRB_symbols;
        end
    end
end
```

Κώδικας 3.14 - eMBB OMA BLER

### 3.3.12 Υπολογισμός NOMA

Αν το slot, έχει κίνηση ΚΑΙ από mMTC, τότε εξετάζεται για κάθε έναν, αν είναι η πρώτη εκπομπή του πακέτου του. Αν ΝΑΙ, πρώτα υπολογίζεται η Rayleigh διάλειαση και ο αριθμός των επανεκπομπών που θα χρειαστεί το πακέτο, προκειμένου να μεταδοθεί με επιτυχία. Υπάρχει περίπτωση, η ισχύς εκπομπής του mMTC να είναι τόσο, ώστε η στάθμη λήψης του σήματός του από τον ΣΒ να είναι μεγαλύτερη από το όριο της αποδεκτής παρεμβολής. Σ' αυτή την περίπτωση, μειώνεται η εκπομπή ισχύος του, τόσο ώστε να εμπίπτει στο όριο παρεμβολής, αλλά προφανώς μειώνεται και η στάθμη λήψης, αναλόγως. Για να φτάσει η μετάδοση του πακέτου στα επιθυμητά επίπεδα του SNR, πραγματοποιούνται οι επανεκπομπές που υπολογίστηκαν (και που αποδίδουν στην συνολική ισχύ, 3dB/reTX, δηλαδή κάθε φορά αυξάνεται η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος, έτσι ώστε να μην καταστρατηγείται το όριο της αποδεκτής παρεμβολής). Οι επανεκπομπές λαμβάνουν χώρα στα αμέσως επόμενα slots. Κατά το slot που εκτελούνται επανεκπομπές, δεν υπολογίζονται Rayleigh fadings.

```
else % if noma > 0
    mMTCslotgroup = [];
    eMBBslotgroup = [];
    for w = 1:noma
```

```

mMTCslotgroup(w)=TimeTable(i,w); %
[458,345,1234,4567,6754,37213]
eMBBslotgroup(w)=UserData(1,TimeTable(i,w)); %
[10004,10002,10004,10003,10004,10002]
%if new packet for any mMTC recalculate Tx poewr and number
of retransmissions
mmm = mMTCslotgroup(w);

% mMTC Rayleigh calculation -----
----
if UserData(12,mmm) == 0 %Diaporismos an einai paketo or
epanekpompi - 0: neo paketo
if UserData(15,mmm) == 1
gg = gamrnd(mLOS,1/mLOS) + gamrnd(mLOS,1/mLOS);
else
gg = gamrnd(mNLOS,1/mNLOS) + gamrnd(mNLOS,1/mNLOS);
end
UserData(16,mmm) = gg;
SNR_dB = UserData(4,mmm) - mMTC_Noise_power_dBm; % SNR
for the BW of mMTC (different from eMBB)
UserData(6,mmm) = SNR_dB; % mMTC SNR

eMBBgroupID=UserData(1,mmm);

eMBBgroupIDposition=find(eMBBgroupID==eMBBUserData(1,:));%Find which
eMBB is grouped with the mMTC device, to the same BS
Ptx_req=Prx_mmTC_SNRaccept_dBm + UserData(7,mmm); % Ptx
related to MCSqci being used, regarding individual PL of each mMTC user

Ptx_interf_admit=eMBBUserData(9,eMBBgroupIDposition)+UserData(7,mmm); %
Pi + PL

% Ptx_mmTC_max=UserData(4,ii)+UserData(7,ii);
P = min([Ptx_req, Ptx_interf_admit, Ptx_mmTC_dBm]);
UserData(8,mmm)=P; % Check again
UserData(9,mmm) = 1;
ReTX_nr = 0;
if P~=Ptx_req
ReTX_nr=ceil((Ptx_req-P)/3)+1;
UserData(9,mmm)=ReTX_nr+1;% Nr of re-transmissions
%%%%%%%%

end
UserData(11,mmm)= UserData(11,mmm)+1; % Trexon paketo
tou mmTC

iic = i;
for ReTx = 1:ReTX_nr
iic = iic + 1;
userpos = find(TimeTable(iic,')==0); %Find the
positions of 0s in the row of the particular mMTC
TimeTable(iic,userpos(1)) = mmm;
end
end

```

Κώδικας 3.15 – Υπολογισμός mMTC Rayleigh and επανεκπομπών

Αφού γίνουν οι πάνω υπολογισμοί, υπολογίζεται το BLER του καναλιού για τον eMBB χρήστη, (αλλά τώρα συμπεριλαμβάνεται και η ισχύς παρεμβολής του mMTC user) και αντίστοιχα εκτιμάται, αν είναι επιτυχημένο ή όχι. Σε περίπτωση αποτυχίας, το πακέτο και του mMTC user απορρίπτεται ως

αποτυχημένο και δεν εκτελείται η ρουτίνα του BLER γι' αυτό. Αν είναι επιτυχημένο, τότε ακολουθεί ο αντίστοιχος υπολογισμός για τον mMTC. Καταγράφονται τα αποτελέσματα.

Τα παραπάνω εκτελούνται για εκείνα τα eMBB και mMTC που συμμετέχουν σε NOMA σχήμα. Τα υπόλοιπα eMBB, ακολουθούν τον υπολογισμό του OMA σχήματος.

```

for kkk=1:length(singleBS) % Single mMTCs
    current_mMTC = singleBS(kkk);
    RB_group = 1; %randi(5); % random RB group that mMTC
selects for transmission

    UserData(18,current_mMTC) = UserData(18,current_mMTC)+1; %
Counter of total TXs
    UserData(12,current_mMTC) = UserData(12,current_mMTC)+1; %
Pointer of Trexousa ekpompi tou paketou

    pos = find(eMBBUserData(1,:) == UserData(1,current_mMTC));
    BLER_eMBB =
compute_BLER_eMBBxR(pos,BW_eMBB,eMBB_PRB_symbols,current_mMTC,RB_group)
;
    % Prx eMBB without rayleigh, LOS / NLOS, eMBB BW = 18MHz,
REs according to Numerology, eMBB MCS, Addition of Rayleigh in eMBB
BLER (0=YES)
    eMBBUserData(11,pos) = eMBBUserData(11,pos)+1; % Counter of
NOMA total eMBB packets
    if rand > BLER_eMBB % packet of eMBB is successful
        eMBBUserData(10,pos) = eMBBUserData(10,pos)+1; %
Counter of NOMA Successfull eMBB packets
        eMBBUserData(15,pos) = eMBBUserData(15,pos) +
MCStable2(eMBBUserData(6,pos),3)* eMBB_PRB_symbols;
        UserData(13,current_mMTC) =
UserData(13,current_mMTC)+1; % Ekmetaleusimi ekpompi
        if UserData(17,current_mMTC) == 0 % this mMTC packet
has not been received correctly during the previout TXs
            BLER_mMTC =
compute_BLER_mMTC(BW_mMTC,mMTC_PRB_symbols,current_mMTC,MCS_mMTC);
            % Prx mMTC without rayleigh, LOS / NLOS, eMBB BW =
18MHz, REs according to Numerology, mMTC MCS, Addition of Rayleigh in
eMBB BLER (0=YES)
            if rand > BLER_mMTC
                UserData(17,current_mMTC) = 1;
                UserData(14,current_mMTC) =
UserData(14,current_mMTC)+1; % Counter successfull pakets tou mmtc
            else
                UserData(20,current_mMTC) =
UserData(20,current_mMTC)+1; % Counter of unsuccessful TXs, due to BLER
            end
        end
    else
        UserData(19,current_mMTC)=UserData(19,current_mMTC)+1;
%Counter of unsuccessful TXs due to eMBB BLER
    end

    if UserData(12,current_mMTC) == UserData(9,current_mMTC)
% Oloklirothikan oi ekpompes tou paketou
        UserData(12,current_mMTC) = 0;
        UserData(13,current_mMTC) = 0;

```

```

        % Check if UserData(17,...) is equal to one. If not the
packet
        % has to be retransmitted. If yes then we reset it to
zero.
        UserData(17,current_mMTC) = 0;
    end
end

```

### Κώδικας 3.16 - NOMA single mMTC

Υπάρχει περίπτωση, να έχουμε σε ένα slot, εκπομπές mMTC παραπάνω από μια. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίπτωση, να έχουμε εκπομπές από πολλαπλά mMTC, προς τον ίδιο ΣΒ.

Τότε, ξεχωρίζουμε τους mMTC χρήστες σε αυτούς που είναι μόνοι τους στον ΣΒ (single mMTC) και σε αυτούς που εξυπηρετούνται από τον ίδιο ΣΒ. Για τους μεν μόνους, ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία, ενώ για τους συμμετέχοντες σε κοινό ΣΒ, γίνεται διαμοιρασμός δεκάδων. Δεδομένου ότι οι mMTC εκπέμπουν σε 2-step Random Access scheme, όπως έχει ειπωθεί προηγουμένως, υπάρχει περίπτωση να γίνει επιλογή του ίδιου προοιμίου από δύο ή περισσότερους mMTC users, που εκπέμπουν προς τον ίδιο ΣΒ. Αυτό σημαίνει ότι ο ΣΒ δεν είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει σωστά τα προοίμια οπότε να μην μπορεί να αποκωδικοποιήσει και τα δεδομένα που έχουν αποσταλεί. Στο πρόγραμμα προσομοίωσης, αυτό αναπαρίσταται με την περίπτωση να ανατεθούν σε περισσότερους του ενός mMTC user, το ίδιο κομμάτι ραδιοπόρων (10αδα). Σε αυτή την περίπτωση έχουμε preamble collision, και οι εκπομπές αυτές των mMTC θεωρούνται αποτυχημένες και απορριπτέες. Δηλαδή δεν προσμετρώνται στις επιτυχημένες εκπομπές που θα μπορούσαν να αυξήσουν την λαμβανόμενη ενέργεια του ληφθέντος mMTC πακέτου ώστε το συγκεκριμένο να φτάσει το απαιτούμενο SNR και να επιτύχει η αποκωδικοποίησή του.

```

RB_group = randi(5,1,length(current_mMTC)); %Moirasma 10adon 1: [10
20], 2: [30 40 30]
[same10,single10] = pairs(current_mMTC,RB_group); %
1o perasma:[345 37213] 2o perasma:[458 1234 6754]

%----- SAME BS, DIFFERENT 10ade -----

for bbb=1:length(single10)
    current_mMTC1 = single10(bbb);
    %UserData(12,current_mMTC1) =
UserData(12,current_mMTC1)+1; % trexousa ekpompi
    UserData(13,current_mMTC1) =
UserData(13,current_mMTC1)+1;

    if UserData(17,current_mMTC1) == 0 % this mMTC
packet has not been received correctly during the previous TXs
        BLER_mMTC1 =
compute_BLER_mMTC(BW_mMTC,mMTC_PRB_symbols,current_mMTC1,MCS_mMTC);
        % Prx mMTC without rayleigh, LOS / NLOS,
eMBB BW = 18MHz, REs according to Numerology, mMTC MCS, Addition of
Rayleigh in eMBB BLER (0=YES)
        if rand > BLER_mMTC1
            UserData(17,current_mMTC1) = 1;
            UserData(14,current_mMTC1) =
UserData(14,current_mMTC1)+1; % Synolo successfull pakets tou
mmtc
        else

```

```
                                UserData(20,current_mMTC1) =  
UserData(20,current_mMTC1)+1; % Counter of unsuccessful TXs, due to  
BLER  
                                end  
                                end
```

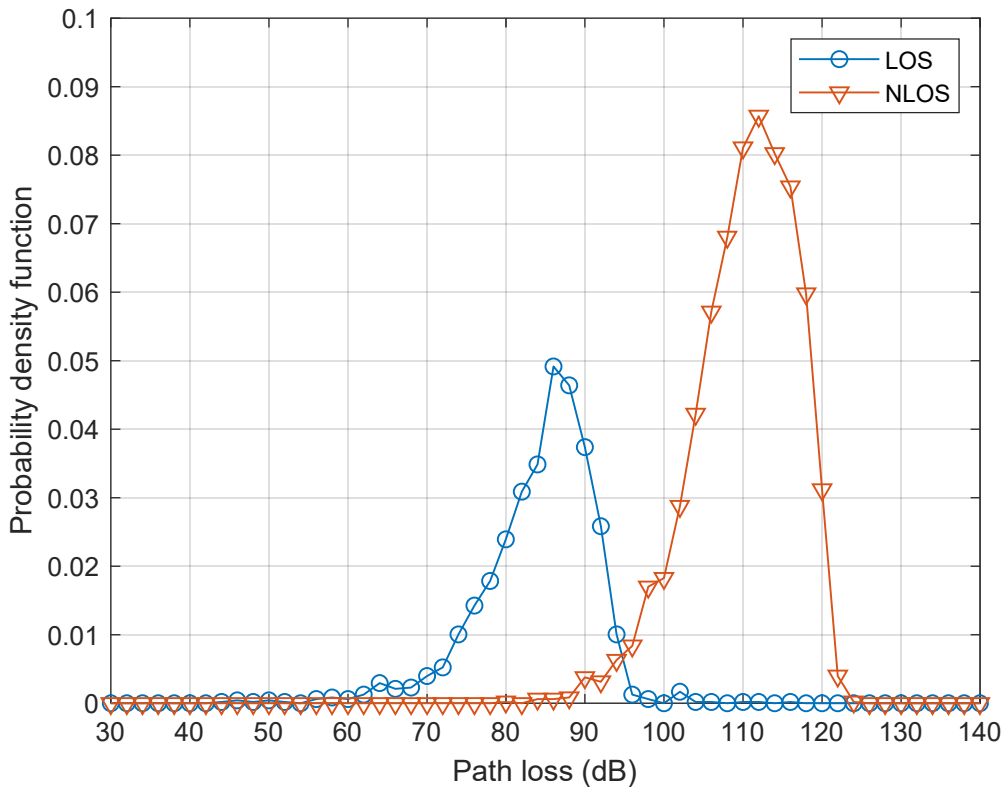
Εικόνα 3.17 – mMTCs in common BS

Όσοι έχουν δεκάδα που δεν έχει καταληφθεί από κανέναν άλλο, θεωρείται ότι ο συγκεκριμένος χρήστης είναι μόνος του στον ΣΒ και πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί για το BLER του. Οι υπόλοιποι που τους αποδόθηκε η ίδια δεκάδα, καταγράφονται ως αποτυχόντες στο slot αυτό. Οι εκπομπές τους δεν προσμετρώνται ως ωφέλιμες.

Όταν τελειώσει η επεξεργασία του slot, γίνεται έλεγχος των καταχωρητών και αντίστοιχη επαναφορά σε μηδενική τιμή.

## Κεφάλαιο 4ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

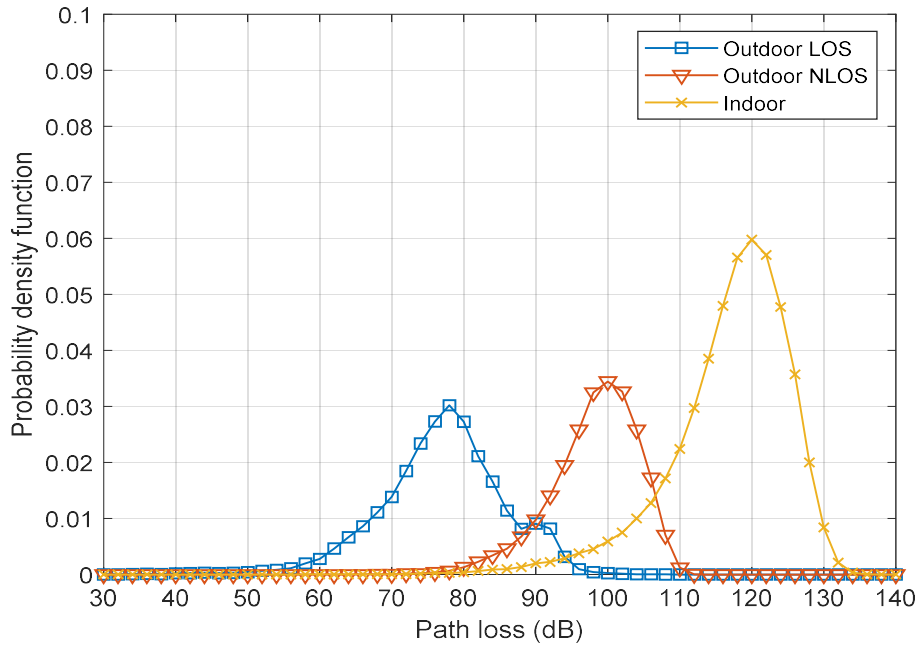
Μετά την ολοκλήρωση του κώδικα και τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, είμαστε σε θέση να παραθέσουμε παρακάτω, κάποια αντιπροσωπευτικά γραφήματα. Αυτά τα γραφήματα προσπαθούν να παρουσιάσουν στις απεικονίσεις τους, την ουσία της εργασίας.



Γράφημα 4.1: Κατανομή απωλειών σε LOS και NLOS eMBB χρήστες

Στο γράφημα 4.1, βλέπουμε την κατανομή των απωλειών διάδοσης των eMBB χρηστών, όταν έχουν (LOS) και όταν δεν έχουν (NLOS) οπτική επαφή. Θεωρούμε όλους τους χρήστες αυτού του τύπου ότι βρίσκονται σε εξωτερικό περιβάλλον (outdoor) και λαμβάνουν τυχαίες θέσεις στο χώρο. Αυτές οι θέσεις αλλάζουν, σύμφωνα με το μοντέλο μας. Η απεικόνιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, μας μεταφράζει ότι οι NLOS χρήστες έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αντιμετωπίζουν μεγαλύτερες απώλειες από τους LOS users. Ο μεγαλύτερος όγκος δηλαδή, των χρηστών χωρίς οπτική επαφή, έχει απώλειες γύρω στα 110 dB, την στιγμή που οι χρήστες με οπτική επαφή, παρατηρούνται να έχουν απώλειες, γύρω στα 85 dB.

Με το γράφημα 4.2 των mMTC χρηστών, εισέρχεται μια παράμετρος ακόμα, διαχωρίζοντας τους outdoor users σε LOS και NLOS. Οι indoor users θεωρούνται ότι είναι όλοι NLOS. Βλέπουμε δηλαδή ότι οι LOS outdoor users, απολαμβάνουν τις λιγότερες απώλειες, ενώ οι NLOS outdoor users είναι σε δυσχερέστερη θέση. Όχι όμως, τόσο όσο οι indoor, οι οποίοι έχουν τις μεγαλύτερες απώλειες. Αυτό συμβαίνει διότι, στον έξω χώρο, δεν υπάρχουν εκείνες οι πρόσθετες απώλειες, λόγω δυσκολίας διαπέρασης δομικών υλικών (μπετόν, τούβλο) και γυάλινων επιφανειών. Στο παράρτημα Δ, η ρουτίνα υπολογισμού των απωλειών αυτών, προσμετράει αυτά τα χαρακτηριστικά



Γράφημα 4.2: Κατανομή απωλειών στους mMTC users

Κατανομή των απωλειών διάδοσης των mMTC χρηστών (α) όταν είναι σε εξωτερικό χώρο και έχουν οπτική επαφή (Outdoor LOS), (β) όταν είναι σε εξωτερικό χώρο και δεν έχουν οπτική επαφή (Outdoor NLOS) και (γ) όταν είναι σε εσωτερικό χώρο. Αντίστοιχο γράφημα σε πιο απλή απεικόνιση, στην οποία διακρίνεται ευκρινέστερα, το σημείο καμπής (break point) που παρατηρείται στις LOS ζεύξεις, λόγω απόστασης. Είναι το σημείο εκείνο, μεταξύ πομπού και δέκτη, που εξαιτίας της απόστασης και των γωνιών των κεραιών, το ανακλώμενο σήμα στη γη, συναντάει και συντίθεται με το LOS σήμα, με τέτοιο τρόπο που οι απώλειες αυξάνονται.

Στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν, διαχωρίστηκε το ποσοστό συμμετοχής του κάθε traffic type σε τέσσερις (4) διαφορετικές κατανομές, από ισοκατανομή (20%/traffic type) μέχρι το ποσοστό 2,5%/traffic type 1 και 5. (Πίνακας 4.1)

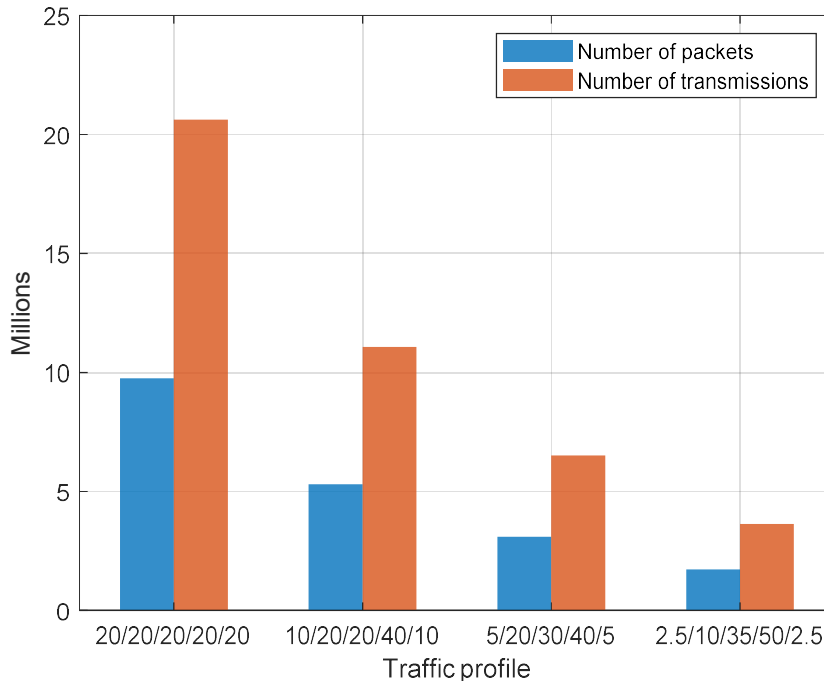
Traffic Type	Traffic Profile (%)			
TT 1: 1TX/1'(60Tx/h)	20	10	5	2.5
TT 2: 1TX/5'(12Tx/h)	20	20	20	10
TT 3: 1TX/30'(2Tx/h)	20	20	30	35
TT 4: 1TX/60'(1Tx/h)	20	40	40	50
TT 5: 1TX/30''(120Tx/h)	20	10	5	2.5

Πίνακας 4.1 – Κατανομή των profile κίνησης

Η κατανομές αυτές προσπαθούν να προσομοιώσουν την πραγματικότητα. Σε πραγματικές τιμές, το σύστημα καλείται να καλύψει 1 εκατομμύριο συσκευές mMTC, σε χώρο ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου. Δεδομένου ότι ο καμβάς παρατήρησής μας είναι 500 X 500 μέτρα (1/4 τ.χλμ.), έχουμε 250.000 χρήστες, οι οποίοι κάνουν χρήση ενός από τα traffic types του μοντέλου. Στην περίπτωση της



ισοκατανομής, 50.000 χρήστες θα εκπέμπουν πακέτα δεδομένων σε κάθε λεπτό και άλλοι τόσοι, θα εκπέμπουν δύο φορές /1', πράγμα που δεν αναμένεται, σύμφωνα με την χρήση των συγκεκριμένων συσκευών. Αντίστοιχα, οι χρήστες που εκπέμπουν 1 φορά/ώρα, είναι μόνο 50000. Γι' αυτό, ο κώδικας έτρεξε και για τα υπόλοιπα ποσοστά των traffic profiles.

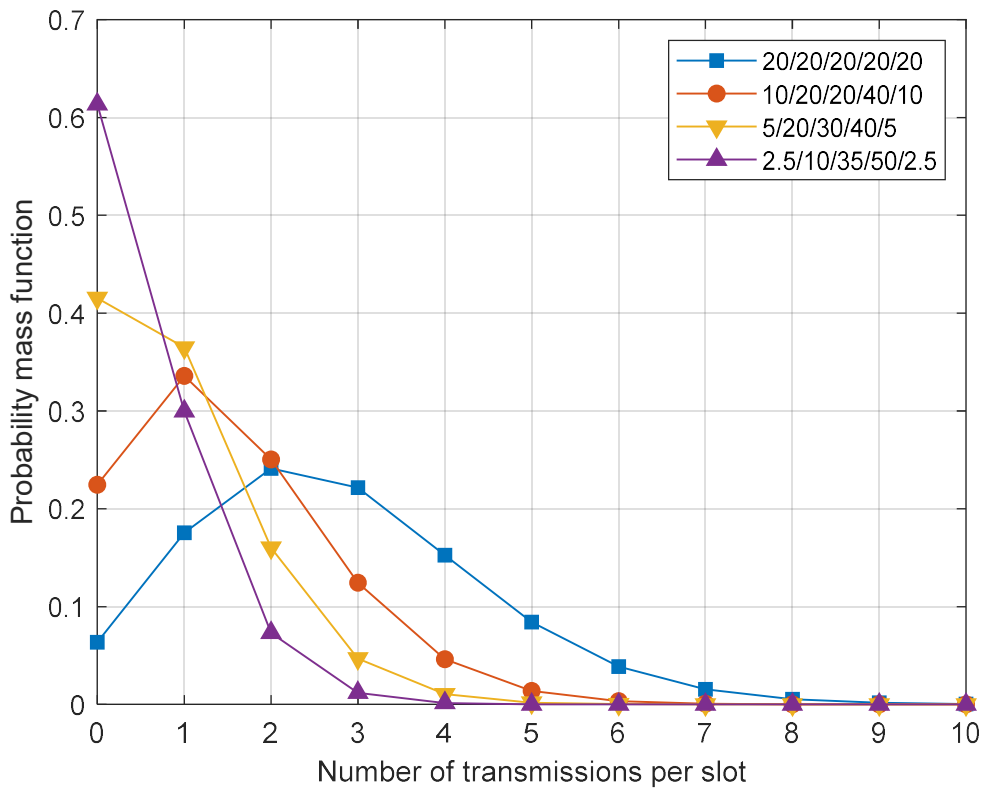


Γράφημα 4.2: Packets ανά προφίλ κίνησης

Στο γράφημα 4.3, διακρίνουμε ξεκάθαρα την αναλογία των διακινούμενων πακέτων (user data), ανά ποσοστό κατανομής των τύπων κίνησης. Σύμφωνα με το μοντέλο, όπως έχει προ ειπωθεί, το σύστημα διακινεί πέντε διαφορετικά traffic types, που ξεχωρίζουν από την συχνότητα εκπομπής των πακέτων χρήστη.

Παρατηρούμε, ότι ο όγκος των πακέτων και των επανεκπομπών στο 1<sup>ο</sup> προφίλ (της ισοκατανομής), είναι συγκριτικά, πολύ μεγαλύτερος από το 5<sup>ο</sup> προφίλ. Άρα το σύστημα πρέπει να διεκπεραιώσει περίπου 10 εκατομμύρια ληφθέντα πακέτα και σχεδόν διπλάσιο αριθμό (>20 εκατομμύρια) επανεκπομπών, όταν στο 4<sup>ο</sup> προφίλ, ο συνολικός αριθμός πακέτων και επανεκομπών, μόλις που ξεπερνά τα 5 εκατομμύρια.

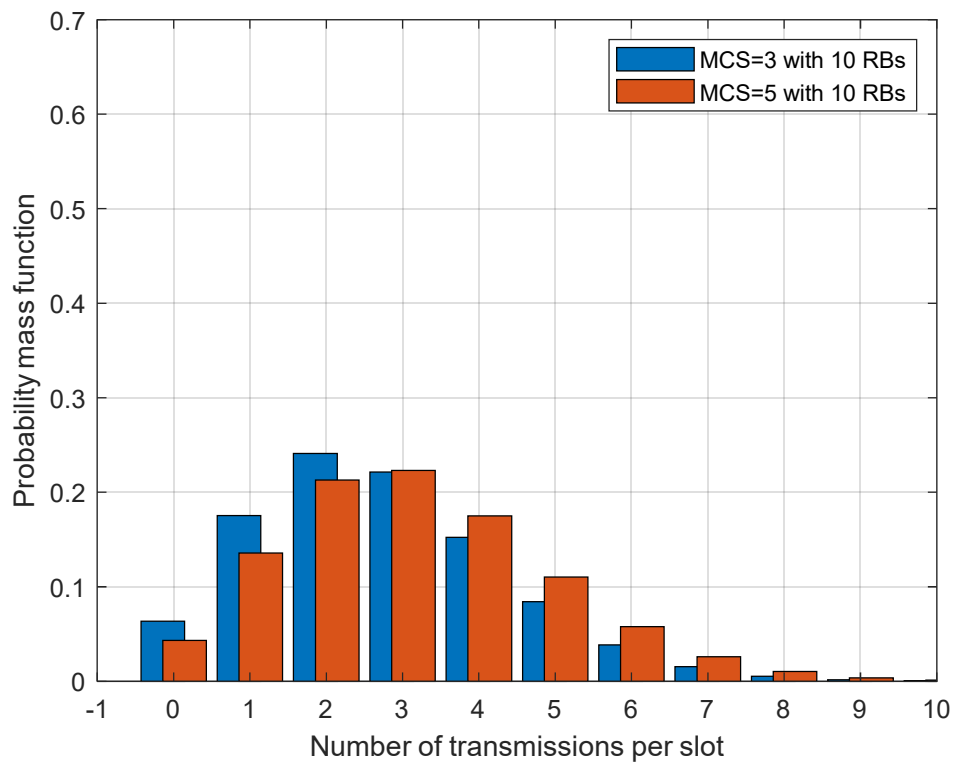
Αυτό μας οδηγεί στην επεξήγηση του παρακάτω γραφήματος. Παρατηρούμε στο γράφημα 4.4, προκειμένου να εξυπηρετηθούν τα πακέτα των χρηστών και να είναι επιτυχή, χρειάζονται επανεκπομπές ώστε να αυξηθεί η συγκεντρωμένη ενέργεια στον ΣΒ. Στο 1<sup>ο</sup> προφίλ της ισοκατανομής, ούτε το 10% του χρόνου δεν έχει καμία mMTC εκπομπή, ενώ πάνω από 40% του χρόνου, συνυπάρχουν 2-3 εκπομπές διαφορετικών χρηστών στα time slots, χωρίς να είναι αμελητέο το κλάσμα του χρόνου που οι εκπομπές ανα slot, είναι πιο πολλές από τρεις, την στιγμή που ούτε το 20% έχει μόνο μια εκπομπή. Για να καταλάβουμε την σημασία του πλεονάζοντος φόρτου, βλέπουμε τα αντίστοιχα ποσοστά για το 4<sup>ο</sup> προφίλ κίνησης. Πάνω από το 60% του χρόνου, διακινείται μόνο η eMBB κίνηση, ενώ στο 30% παρατηρείται μόλις 1 mMTC εκπομπή.



Γράφημα 4.4: Κατανομή των επανεκπομπών ανά slot

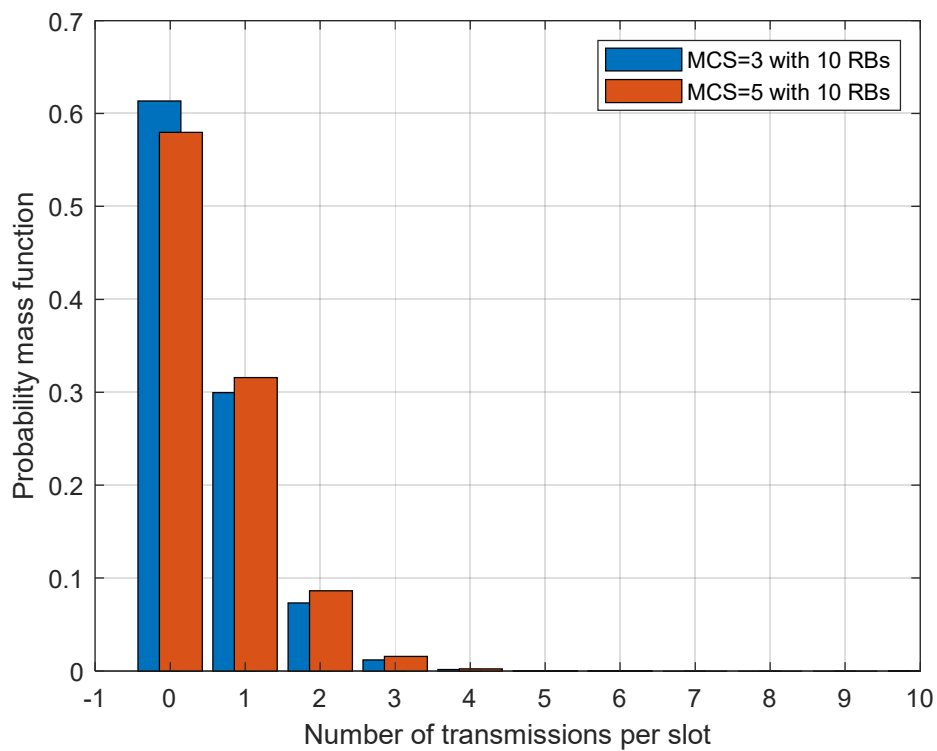
Επιπρόσθετα, ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τον φόρτο των εκπομπών ανά time slot παρατήρησης, είναι το MCS που επιλέγεται για την εκπομπή των πακέτων και γενικά των εκπομπών των mMTC χρηστών. Οι χρήστες αυτού του τύπου, δεν ακολουθούν την διαδικασία random access όπως οι eMBB users. Άρα δεν είναι σε θέση να γνωρίζουν την κατάσταση του καναλιού, πριν την πραγματοποιήσιμη εκπομπή και να προσαρμοστούν αναλόγως. Το MCS που χρησιμοποιείται, είναι σταθερό για όλη την διάρκεια της παρατήρησης.

Στο γράφημα 4.5, παρατηρούμε ότι για το ίδιο προφίλ κίνησης, οι απαιτούμενες επανεκπομπές ανά slot, είναι διαφορετικές όταν έχουμε MCS3 απ' όταν έχουμε MCS5. Πάνω από 30% των slots, έχουν 1-2 εκπομπές, στην χρήση του MCS3, ενώ η αντίστοιχη κορυφή για το MCS5, είναι στις επανεκπομπές 2-3, για το MCS5. Αυτό συμβαίνει διότι, το μεγαλύτερο MCS σημαίνει και περισσότερη εκπεμπόμενη ενέργεια για να επιτευχθεί το απαιτούμενο SNR της ζεύξης. Αυτό οδηγεί σε περισσότερες επανεκπομπές δεδομένου του περιορισμού της εκπεμπόμενης ισχύος από τους mMTC, ώστε να μην ξεπεραστεί το όριο της ανεκτής παρεμβολής. Το απαιτούμενο των παραπάνω επανεκπομπών δεν είναι τόσο ξεκάθαρο σε αυτό το σχήμα, λόγω των μεγάλων αναγκών εξυπηρέτησης πακέτων, εξαιτίας της ισοκατανομής των traffic types, σε αυτή την παρατήρηση.



Γράφημα 4.5: Κατανομή επανεκπομπών ανά MCS (profile 20/20/20/20/20)

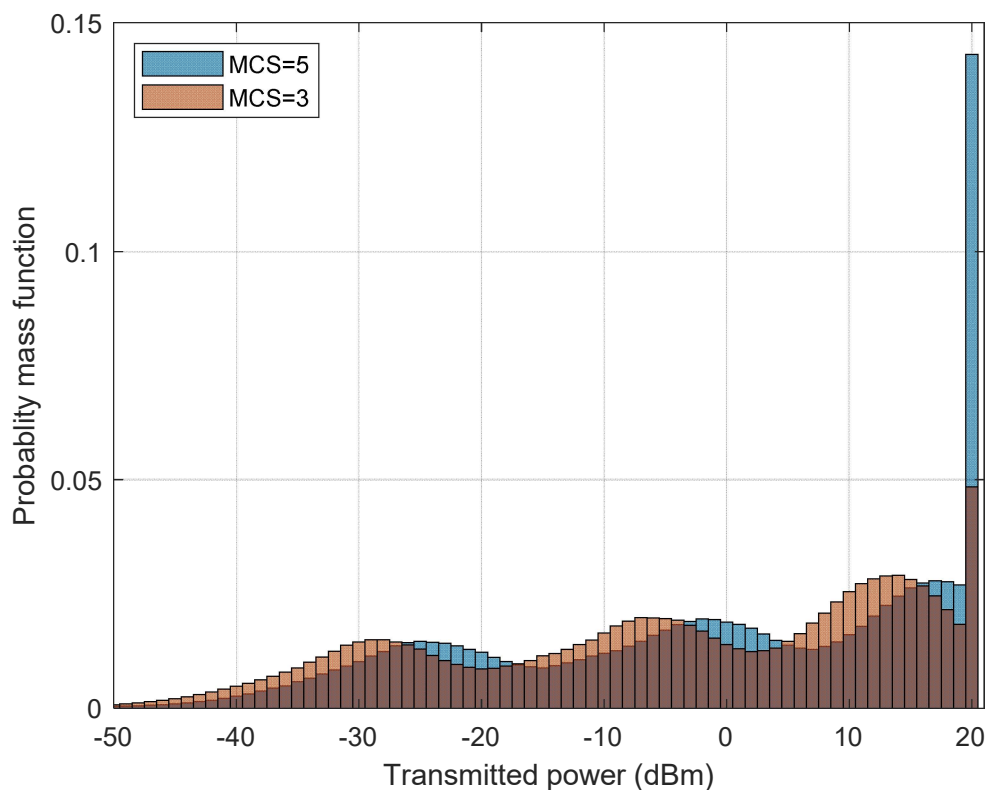
Στο παρακάτω γράφημα 4.6, μπορούμε να δούμε την σημασία του προφίλ κίνησης και τι σημαίνει αυτό για το σύστημα.



Γράφημα 4.6: Κατανομή επανεκπομπών ανά MCS (profile 2,5/10/35/50/2.5)

Με μια απλή σύγκριση των δύο παραπάνω σχημάτων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι βασικό ρόλο στον φόρτο των εκπομπών, παίζει το προφίλ της κίνησης. Παρατηρούμε ότι το πλήθος των επανεκπομπών έχει περιοριστεί δραστικά και πλέον η πλειοψηφία των slots, δεν έχει καθόλου mMTC κίνηση, ενώ όταν έχει, δεν συνυπάρχουν πολλαπλοί mMTC users. Αυτό οδηγεί σε εκμετάλλευση του περιθωρίου που μας δίνει η ανεκτή παρεμβολή, από έναν mMTC user και έτσι ο συγκεκριμένος δεν χρειάζεται επανεκπομπή. Πάντως, και σε αυτό στο σχήμα, παρατηρείται μια μετατόπιση προς τα δεξιά, του όγκου των εκπομπών, ανάλογη της επιλογής του MCS για τους mMTC χρήστες.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την σχέση μεταξύ MCS και εκπεμπόμενης ισχύος, Βλέπουμε το παρακάτω γράφημα 4.7.

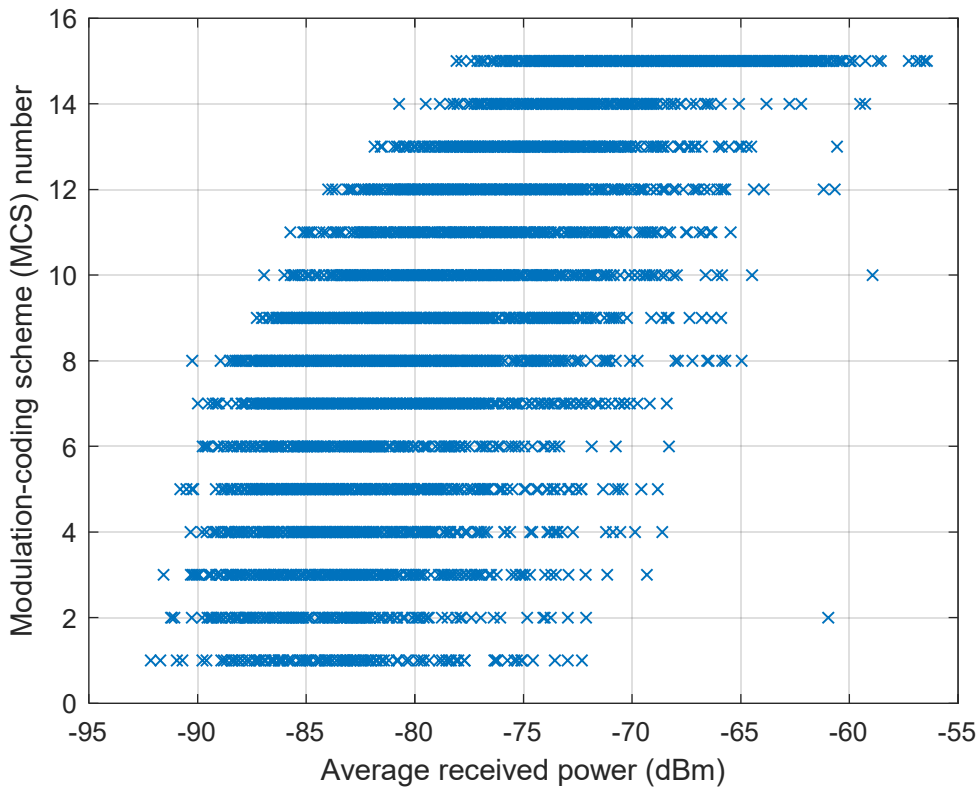


Γράφημα 4.7: Κατανομή της TX ισχύος των mMTC χρηστών

Στο γράφημα 4.7, εμφανίζεται επίσης η ανάγκη μεγαλύτερης ισχύος εκπομπής για τους mMTC users, όταν γίνεται χρήση μεγαλύτερου τη τάξει MCS. Βεβαίως υπάρχει διακύμανση, ή οποία σχετίζεται με τις απώλειες λόγω απόστασης αλλά παρατηρώντας την κατανομή των μετρούμενων επιπέδων εκπομπής, βλέπουμε την αυξημένη απαίτηση για μεγαλύτερο MCS. Στα δεξιά, η μεγάλη αύξηση των 20 dBm, σχετίζεται με τις πρώτες εκπομπές των πακέτων από τους mMTC που γίνονται με 20 dBm. Στο σύνολο του γραφήματος, για MCS3 έχουμε μέση τιμή ισχύος  $-4,75$  dBm, ενώ για MCS5, η μέση τιμή ανεβαίνει στο  $-1,25$  dBm.

Στους eMBB users, για την επιλογή του MCS index, εφαρμόζεται η τεχνική του AMC – Adaptive Modulation and Coding, όπως έχει προ-αναφερθεί. Δηλαδή, οι eMBB users, δεν χρησιμοποιούν ένα και μόνο δείκτη MCS, αλλά επιλέγουν το μέγιστο κατάλληλο MCS index που καλύπτει το επιθυμητό SNR, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις εκπομπής. Οι eMBB users, έχουν γνώση της κατάστασης του καναλιού, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν 4-step RA διαδικασία. Μέσω αυτής, κατά το DL, οι χρήστες αυτού του τύπου, ενημερώνονται από τον ΣΒ για το CQI – Channel Quality Indicator, TA-Timing

Advance κ.α. Έτσι, κάθε φορά που οι EMBB users αλλάζουν θέση, λαμβάνουν χώρα αντίστοιχοι υπολογισμοί που αφορούν το PL και το Rayleigh Fading, και έτσι η εκπομπή των πακέτων τους γίνεται με το αντίστοιχο MCS.



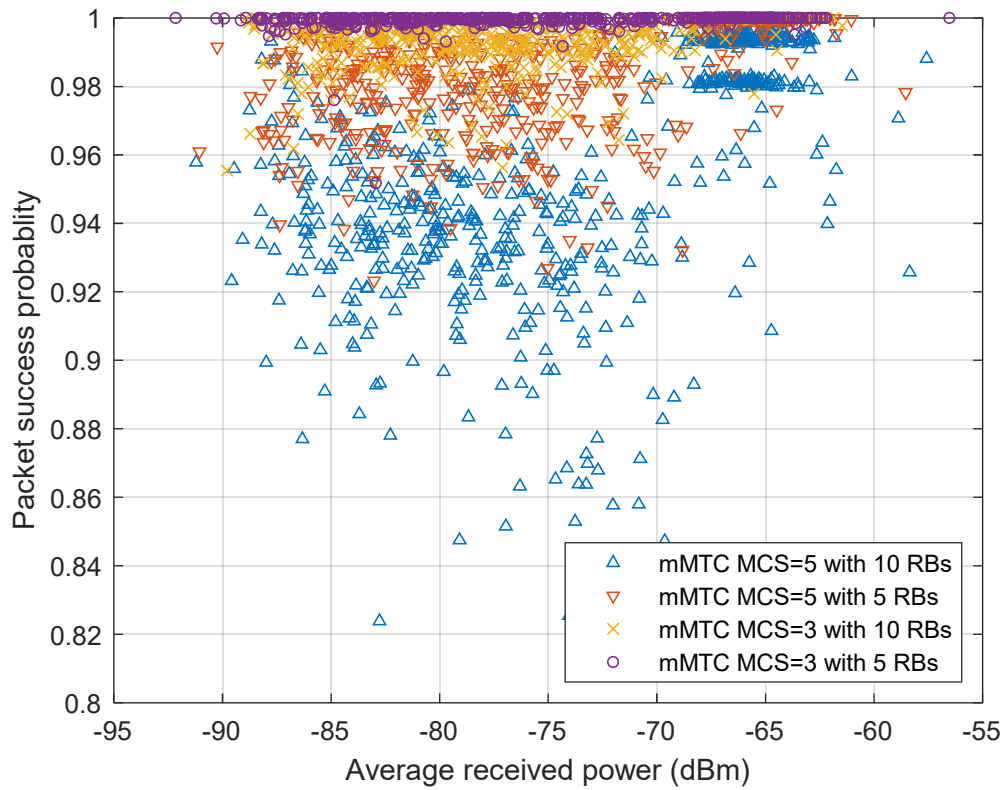
Γράφημα 4.8: Κατανομή MCS στους eMBB users

Στο γράφημα 4.8, αποτυπώνεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ του PL και της επιλογής του MCS. Παρατηρούμε πως σε κάθε MCS, υπάρχει μεγάλη διακύμανση του PL (περίπου 15 με 20 dBm). Αυτό καταδεικνύει την επιρροή που έχουν οι small scale fadings, όπως είναι οι Rayleigh Fadings, στο συνολικό PL του καναλιού. Η Rayleigh κατανομή, έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, αναλόγως με το LOS/NLOS. Προφανώς, το καλύτερο (μεγαλύτερο index) MCS, συνδέεται με το μεγαλύτερο SNR (άμεσα εξαρτώμενο της στάθμης λήψης). Η μέση λαμβανόμενη ισχύ του γραφήματος, παρατηρείται στην λήψη του ΣΒ.

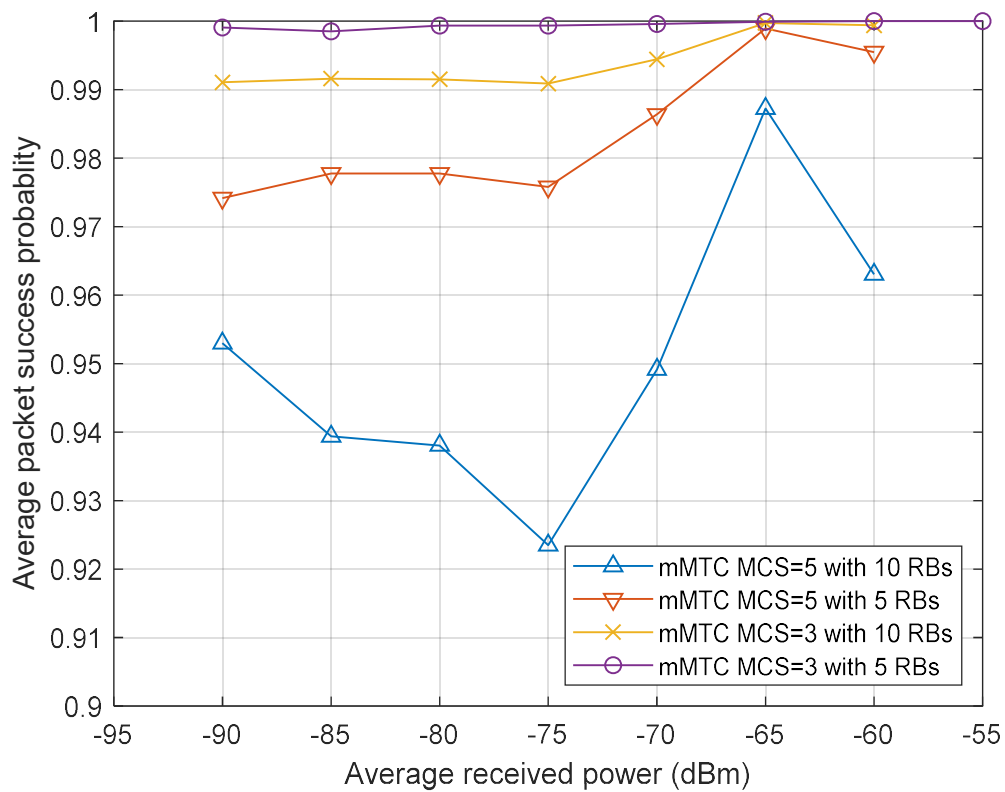
Το SNR του καναλιού, είναι ανεξάρτητο από τα δεδομένα που καλείται να μεταδώσει η ζεύξη. Συνεπώς, η απόδοση του καναλιού, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν. Χαρακτηριστικά όπως, το MCS, το μέγεθος του PRB (σύνολο των RBs που χρησιμοποιούνται για τις εκπομπές των mMTCs) και το προφίλ της κίνησης (όγκος πακέτων), έχουν την επιρροή τους στο συνολικό packet success rate. Στα παρακάτω διαγράμματα 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, καταγράφεται ο διαχωρισμός αυτός, του packet success rate, συναρτήσεως των χαρακτηριστικών των δεδομένων.

Όπως είναι αποτυπωμένο στα παραπάνω 4.9 και 4.10 γραφήματα, το ποσοστό της μέσης πιθανότητας επιτυχίας των πακέτων που εκπέμπονται από τους eMBB users, συναρτήσεως της μέσης λαμβανόμενης ισχύος, έχει άμεση σχέση με το MCS (των mMTCs), και του αριθμού των RBs που χρησιμοποιούν (οι

mMTCs). Έτσι, οι εκπομπές που έγιναν με MCS3 και 5 RBs, έχουν καλύτερο ποσοστό επιτυχίας από τις εκπομπές με MCS5 και 10 RBs, για το ίδιο προφίλ κίνησης (10/20/20/40/10).

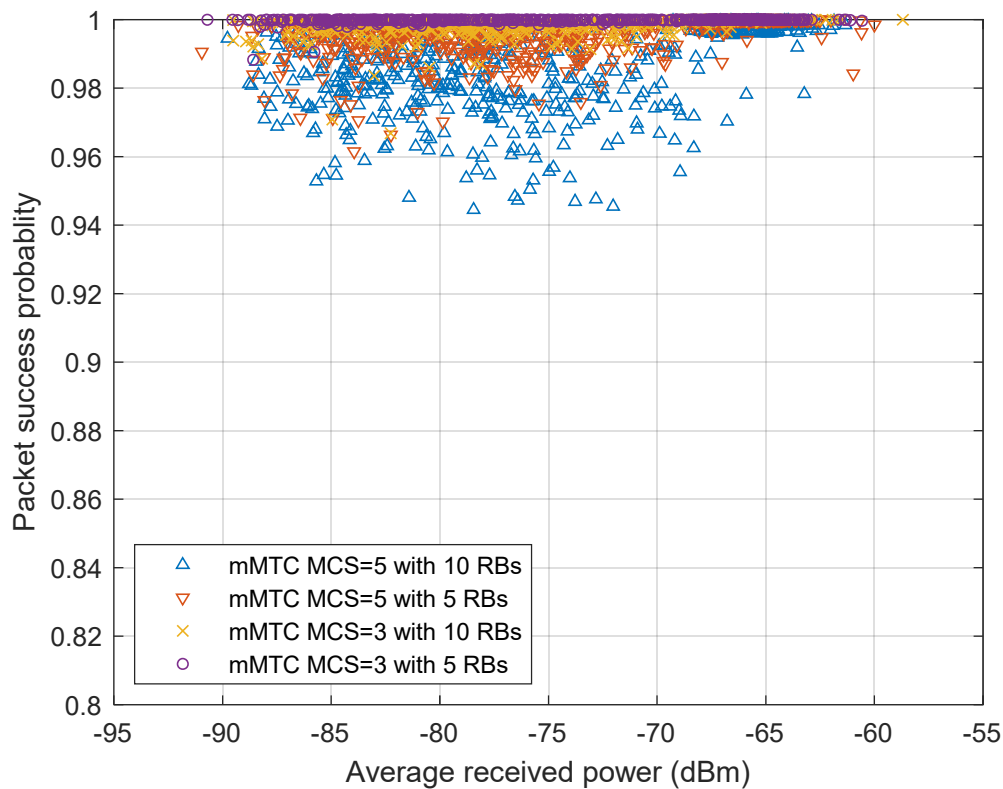


Γράφημα 4.9 – Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανά δείγμα (profile 10/20/20/40/10)



Γράφημα 4.10: Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανά MO (profile 10/20/20/40/10)

Οι καμπύλες βελτιώνονται αισθητά, όταν για τα ίδια δεδομένα, εφαρμόσουμε διαφορετικό προφίλ κίνησης.



Γράφημα 4.11 - Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανα δείγμα (profile 2.5/5/40/50/2.5)

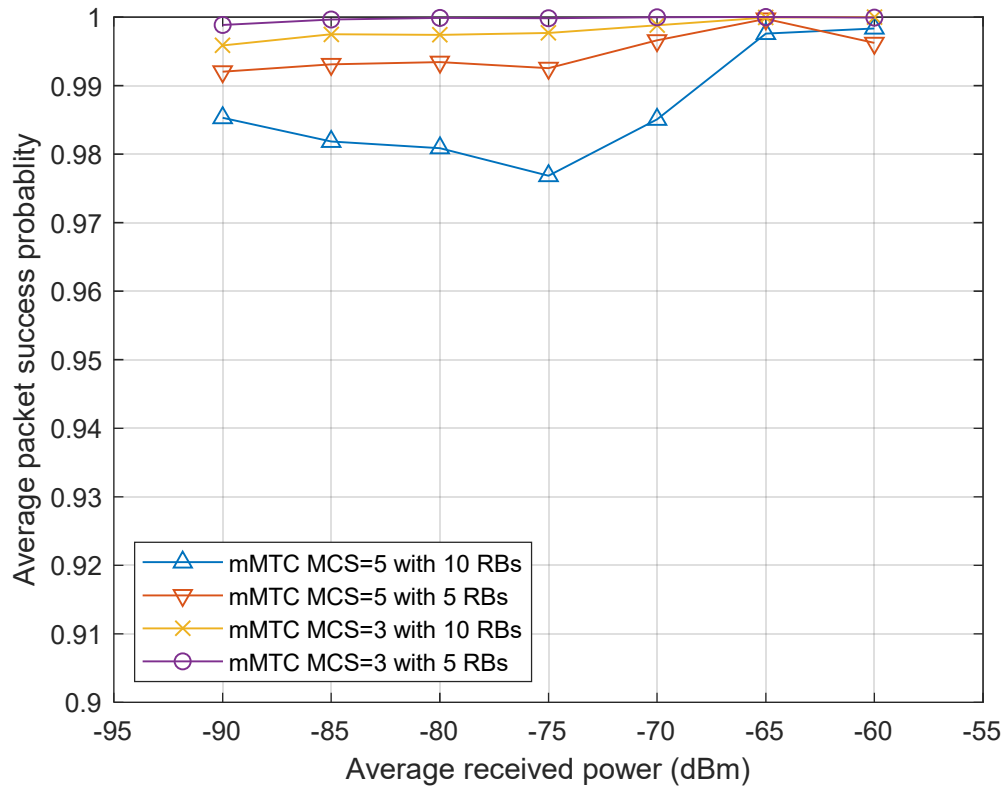
Συγκρίνοντας τα τέσσερα παραπάνω γραφήματα, βλέπουμε τον αντίκτυπο που έχει στην ποιότητα λήψης των πακέτων, το προφίλ κίνησης. Με τα ίδια χαρακτηριστικά, αλλά με διαφορετικό προφίλ, το ποσοστό επιτυχίας των πακέτων βελτιώνεται στο 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> διάγραμμα για όλους τους τύπους κίνησης, σε σύγκριση με το 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> διάγραμμα που αν και τα αποτελέσματα κυμαίνονται επίσης πάνω από 90% επιτυχίας, οι καμπύλες δεν είναι τόσο καλές όπως στο 4<sup>ο</sup>.

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω γραφήματα, μπορούμε να δούμε το αποτύπωμά τους στην απόδοση του συστήματος παρατήρησης, στο παρακάτω διάγραμμα, παρατηρώντας τις καμπύλες του μέσου όρου του ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνεται για τους eMBB χρήστες, όταν είναι μόνοι τους και όταν επιφορτίζονται με NOMA, δηλαδή υπάρχουν εκπομπές mMTC χρηστών.

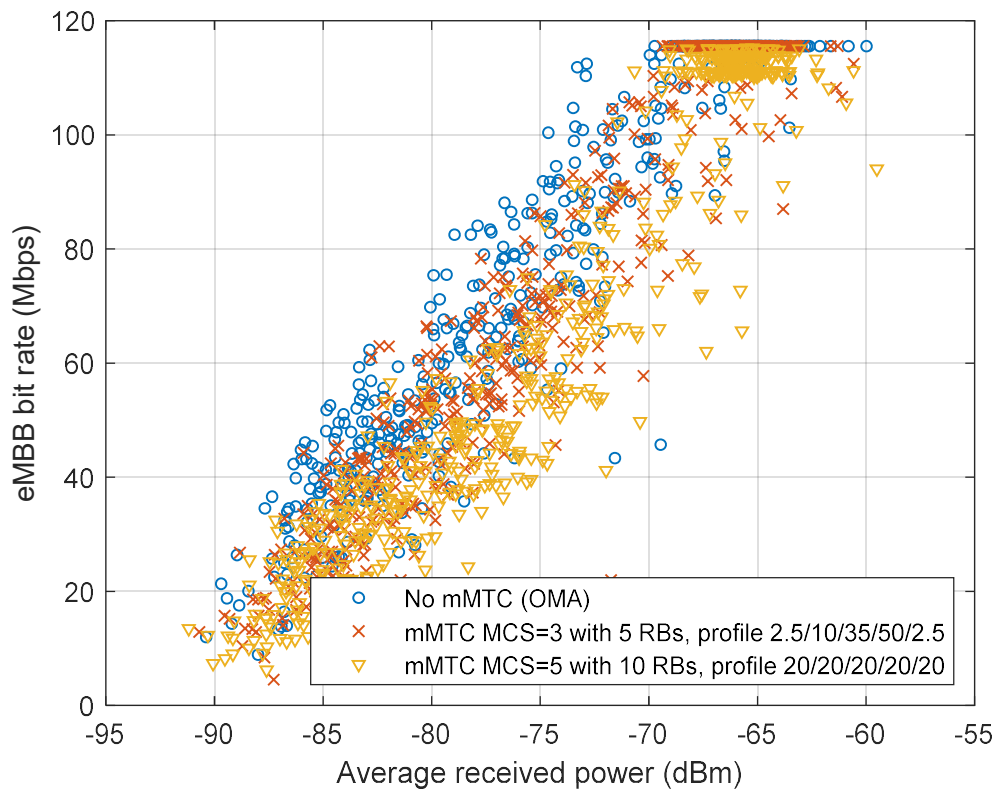
Βλέπουμε ότι υπάρχει μια αναλογία μεταξύ της στάθμης λήψης του σήματος των eMBB χρηστών από τον ΣΒ και του επιτευξιμού bit rate. Σε κάθε μέτρηση, υπάρχει η διακύμανση που σχετίζεται με τις επιλογές των χαρακτηριστικών κίνησης. Έτσι, ενώ καλύτερο όλων είναι το προφίλ OMA, τα υπόλοιπα NOMA προφίλ, ακολουθούν σε σχετικά σταθερή απόσταση την αύξηση του bit rate, καθώς αυξάνεται η ισχύς λήψης, τηρουμένων των χαρακτηριστικών των διαφορετικών profile κίνησης. Χαρακτηριστικό είναι επίσης, η επίτευξη bitrate πάνω από 100 Mbps.

Παρατηρούμε ότι σε όλα τα προφίλ κίνησης, εκτός από το προφίλ ισοκατανομής, το packet success probability παραμένει σε ποσοστό, πάνω από 90% για όλα τα traffic types. Επίσης είναι χαρακτηριστική η δυσκολία επίτευξης του 10% BLER, όταν ανεβαίνουμε σε επιλογή MCS και χρησιμοποιούμε αρκετά

RBs. Αυτό το τελευταίο, προσπαθεί να ισοσταθμιστεί από την επιλογή ελαφρύτερου προφίλ κίνησης. Γι' αυτό πλησιάζει το 85%, όταν το προφίλ είναι 2.5/10/35/50/2.5.

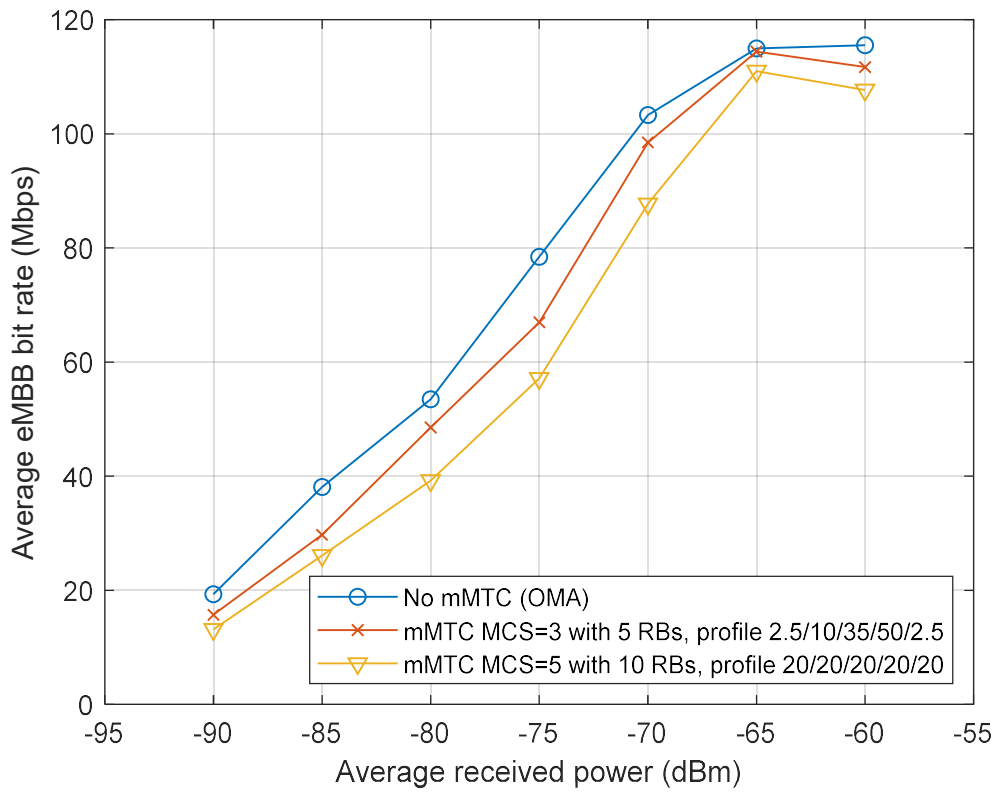


Γράφημα 4.12: Μέση πιθανότητα επιτυχίας των eMBB, ανα MO (profile 2.5/5/40/50/2.5)

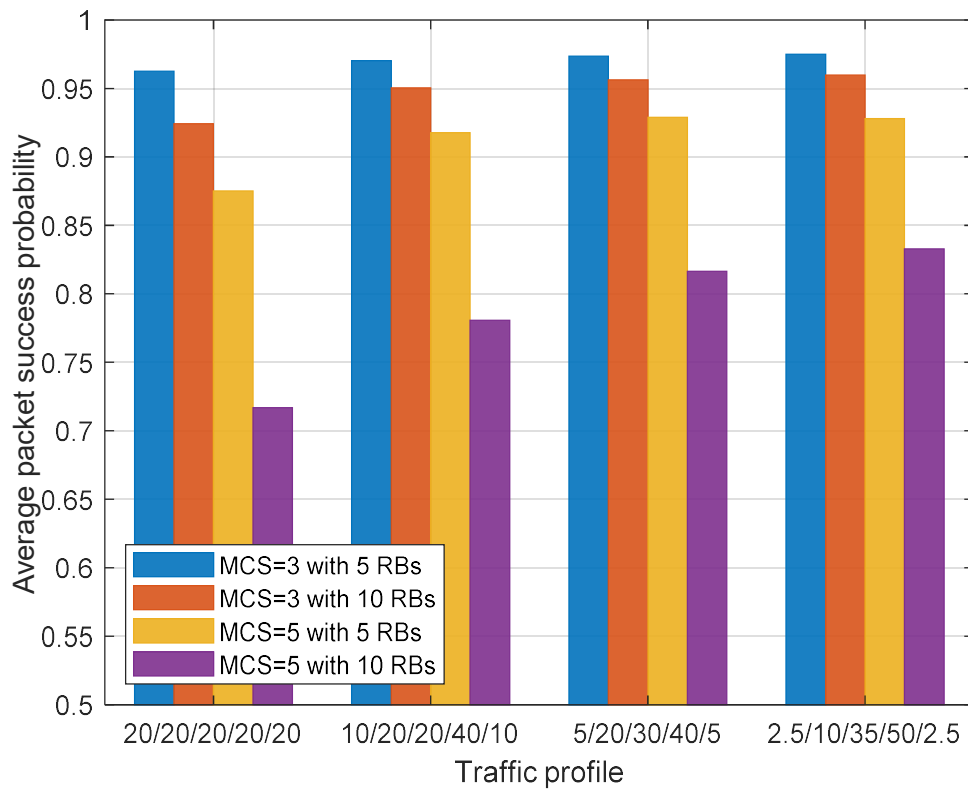


Γράφημα 4.13 - Μέσος ρυθμός μετάδοσης των eMBB χρηστών ανά δείγμα



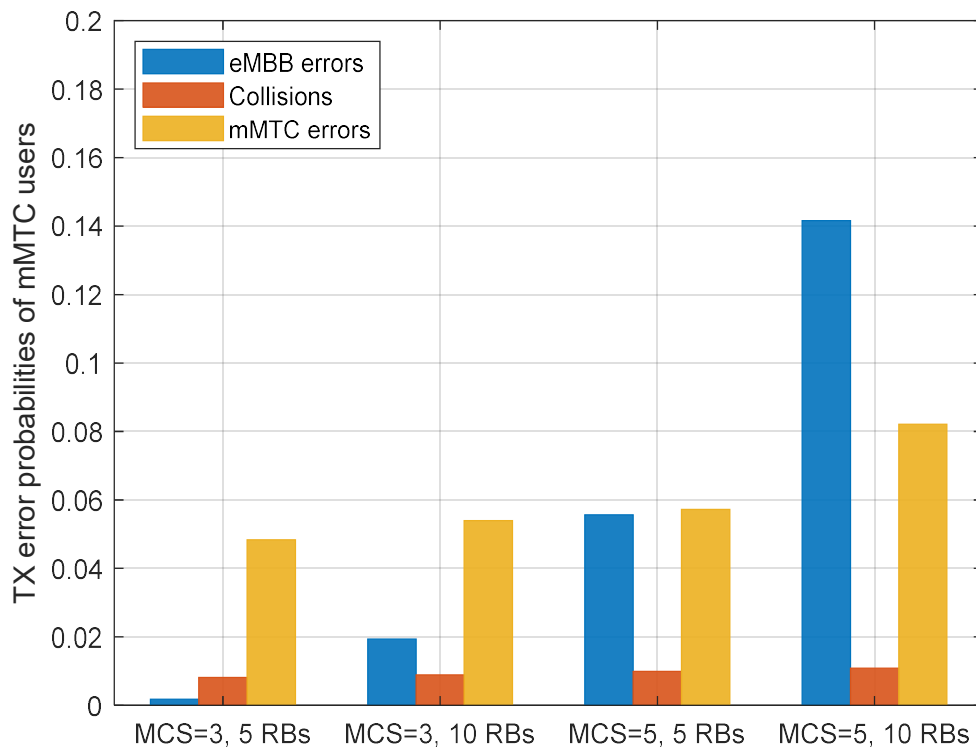


Γράφημα 4.14: Μέσος ρυθμός μετάδοσης των eMBB χρηστών ανά MO



Γράφημα 4.15: Μέση πιθανότητα επιτυχίας των mMTC users

Αυτές οι αστοχίες στο BLER των mMTC χρηστών, έχουν τρεις αιτίες ύπαρξης. Η 1<sup>η</sup> αιτία, είναι η απόρριψη της εκάστοτε εκπομπής, λόγω αποτυχίας του eMBB πακέτου. Σε κάθε slot, εξετάζεται πρώτα η eMBB εκπομπή και χαρακτηρίζεται ως επιτυχημένη ή αποτυχημένη. Στη δεύτερη περίπτωση, χαρακτηρίζονται επίσης, όλες οι εκπομπές των mMTC ως αποτυχημένες. Προσμετρώνται όμως στον υπολογισμό των παρεμβολών και της προσθετικής ενέργειας των packets τους. Η 2<sup>η</sup> αιτία, είναι η σύμπτωση χρήσης ιδίων RBs από 2 ή παραπάνω mMTC χρήστες. Ουσιαστικά, να έχουμε στο slot, NOMA μεταξύ eMBB και mMTC αλλά και NOMA μεταξύ mMTC χρηστών. Αυτή η περίπτωση, δεν καλύπτεται από την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Θεωρούμε αποτυχημένες τις συγκεκριμένες εκπομπές, οι οποίες όμως υπολογίζονται στους υπολογισμούς επιπέδου παρεμβολής και αύξησης της ενέργειας των πακέτων τους. Η 3<sup>η</sup> αιτία, είναι η πιθανή αποτυχία της ίδιας mMTC εκπομπής.



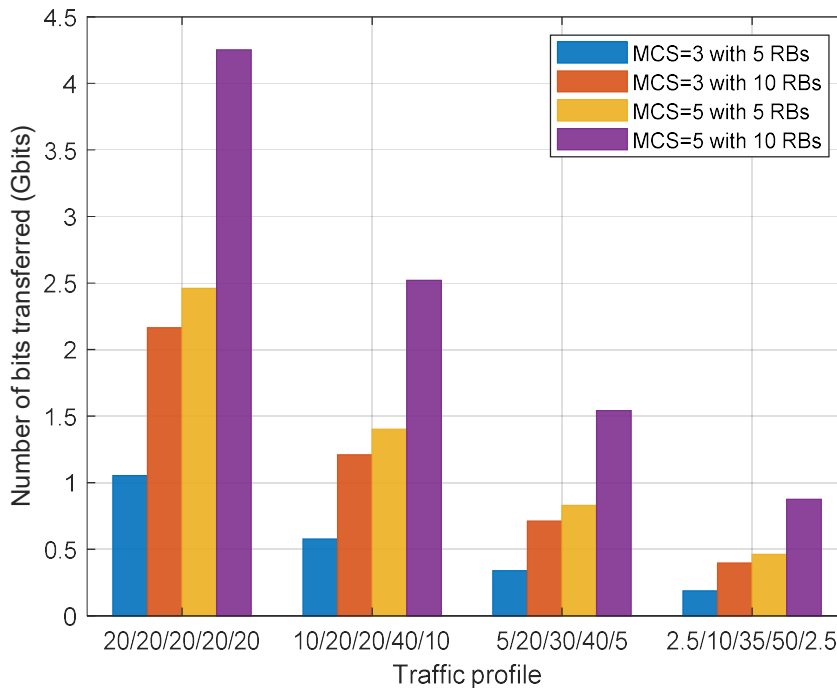
Γράφημα 4.16: Αιτίες αποτυχίας των mMTC εκπομπών

Παρατηρούμε, στις τρεις πρώτες περιπτώσεις, το μεγαλύτερο ποσοστό αποτυχίας και μάλιστα περίπου το ίδιο (γύρω στο 5%), καταγράφεται στην 3<sup>η</sup> αιτία, της ίδιας αποτυχίας των εκπομπών. Η 2<sup>η</sup> αιτία, παραμένει σταθερή (περίπου 1%) για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό που μεταβάλλεται περισσότερο σε κάθε σχήμα, είναι το μέγεθος των eMBB errors. Ειδικά στην τελευταία περίπτωση, είναι χαρακτηριστική η αύξηση στο 14%. Το προφίλ που χρησιμοποιήθηκε, είναι το 2.5/10/35/50/2.5.

MCS	5 RBs	10 RBs
3 (3GPP 4)	112	240
5 (3GPP 8)	288	608

Πίνακας 4.2 - Απόδοση bits ανά MCS

Σε κάθε περίπτωση, εκτός από το ποσοστό των αποτυχιών, υπάρχει και το ποσοστό των επιτυχιών. Το ζητούμενο είναι να καταφέρουμε την μεταφορά δεδομένων. Το παρακάτω ραβδογράφημα, δείχνει αυτό ακριβώς το επίτευγμα, σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Το πλήθος των συνολικά μεταφερόμενων bits σχετίζεται με το προφίλ κίνησης (γράφημα 4.17). Επιπρόσθετα, για κάθε προφίλ κίνησης, ο όγκος των bits πληροφορίας σχετίζεται με το σχήμα του MCS και των αποδιδόμενων RB στους χρήστες mMTC (πίνακας 4.2). Συγκρίνοντας τα ευρήματα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, αν και με περισσότερες αποτυχίες, το μεγαλύτερο σχήμα (MCS5, RB10) και με ισοκατανομή των τύπων κίνησης, μεταφέρει περισσότερα από το 4πλάσια bits σε σχέση με το πιο ελαφρύ σχήμα. Μεγαλύτερο βάρος έχει η χρήση μεγαλύτερου MCS παρά περισσότερων RBs. Επίσης, στις ενδιάμεσες περιπτώσεις, η κατάσταση είναι παραπλήσια σε απόδοση.



Γράφημα 4.17: Πλήθος μεταφερόμενων bits από τους mMTC χρήστες

Στο παρακάτω ραβδογράφημα, φαίνεται η ενεργειακή απόδοση, όλων των σχηματισμών. Ως μονάδα μέτρησης, έχουμε το Mb/J. Δηλαδή, πόσα Mbs μεταφέρονται με 1 J. Σύμφωνα με τα [23] και [24], το μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας για την εκπομπή ενός πακέτου είναι:

$$E = E_{on} + P_{TX}N_{TX}T_s$$

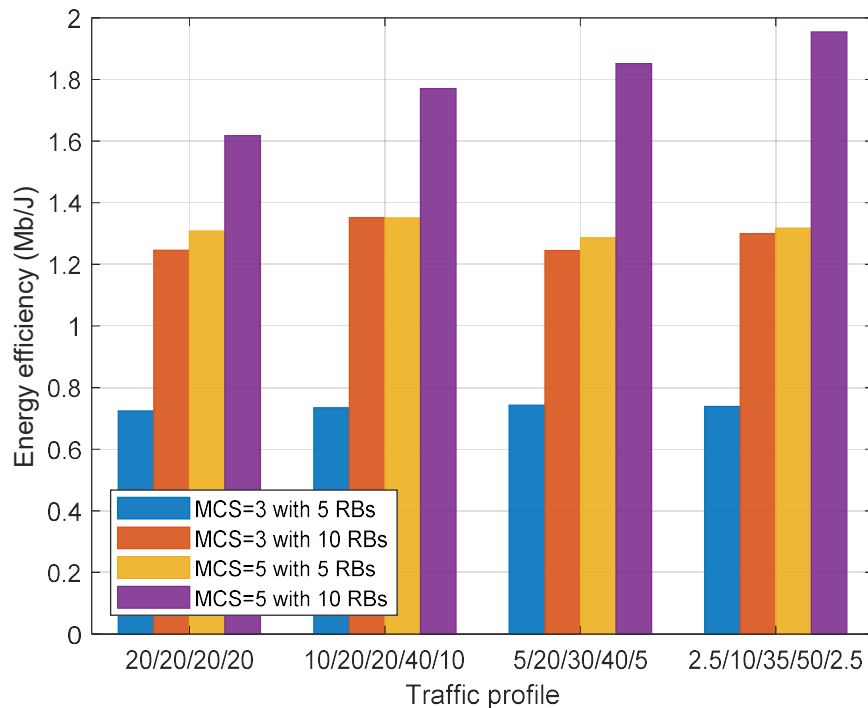
όπου  $E_{on} = 5.4 \mu\text{J}$  είναι η ενέργεια για να ανοίξει ο πομπός,  $N_{TX}$  είναι ο αριθμός εκπομπών ανά πακέτο και  $T_s = 0.5 \text{ ms}$  η διάρκεια κάθε εκπομπής. Η ισχύς που καταναλώνεται από την εκπομπή δίνεται σε W ως:

$$P_{TX} = \begin{cases} 0.0197P_{TXdBm} + 0.0454, & 0 < P_{TXdBm} \leq 23 \\ 0.0454, & P_{TXdBm} \leq 0 \end{cases}$$

όπου  $P_{TXdBm}$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς RF σε dBm.

Και σε αυτό το ραβδόγραμμα, την διαφορά κάνει το μεγαλύτερο σχήμα, το οποίο αντιδρά στην διαφοροποίηση του προφίλ κίνησης και αυξάνει την αποδοτικότητά καθώς εφαρμόζουμε ελαφρύτερο προφίλ. Τα υπόλοιπα σχήματα, δείχνουν μια σταθερή συμπεριφορά, ανεξάρτητα από το προφίλ. Μια

συνολική σύγκριση μεταξύ των σχημάτων θα επιδίωκε την μικρότερη επίδραση στους eMBB, την καλύτερη πιθανότητα επιτυχίας πακέτου στους mMTC και φυσικά την καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα των mMTC.



Γράφημα 4.18: Ενεργειακή αποδοτικότητα ανά profile κίνησης

Εν κατά κλείδι, αν θελήσουμε να βγάλουμε το απόσταγμα όλων των παραπάνω, καταλήγουμε στα συμπεράσματα:

A) Το σχήμα MCS=3, RB=5 έχει μικρά πακέτα (112 bits) και χαμηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, σε σχέση με τα υπόλοιπα. Οπότε απορρίπτεται, ακόμα και αν έχει πολύ μικρή επίδραση στους eMBB users και πολύ καλές πιθανότητες επιτυχίας των πακέτων του.

B) Το σχήμα με MCS=3, RB=10 or MCS=5, RB=5, είναι πολύ κοντά στις επιδόσεις και μάλλον η πιο καλή επιλογή γενικότερα. Αυτό γιατί, αν και υστερεί, ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα σε σχέση με το σχήμα MCS=5, RB=10, δίνουν πολύ καλύτερη πιθανότητα επιτυχίας πακέτων, τόσο στους eMBB, όσο και στους mMTC σε σχέση με το MCS=5, RB=10. Επίσης, όσο αυξάνεται η κίνηση, βελτιώνεται και η διαφορά στο rate των eMBB (της τάξης των 8 Mbps), διατηρούν δε, ένα «κανονικό μέγεθος πακέτου της τάξης των 30-36 bytes.

## Κεφάλαιο 5ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MatLab, ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες εφαρμογής της NOMA τεχνικής, για την κάλυψη του απαιτούμενου πλήθους χρηστών. Κατά την προσομοίωση, δημιουργήθηκε το περιβάλλον παρατήρησης με όλους τους συμμετέχοντες (ΣΒ, eMBB, mMTC χρήστες). Ορίστηκαν τα πέντε διαφορετικά σενάρια εκπομπής των mMTC χρηστών, όπως και τα ποσοστά συμμετοχής τους κατά τα επιλεγμένα profile κίνησης. Η παρατήρηση κάλυψε δύο διαφορετικά MCS για τους mMTC χρήστες. Η απόδοση των ραδιοπόρων σε αυτούς, εξετάστηκε σε δύο μεγέθη. Θεωρήθηκε ότι κατά την χρονική περίοδο της παρατήρησης, υπήρχε πάντα κίνηση από τους eMBB χρήστες. Πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί εύρεσης του PL για το σύνολο των χρηστών. Οι eMBB χρήστες δεν παρέμεναν στάσιμοι, αλλά άλλαζαν θέση και αυτό δημιουργούσε την ανάγκη επαναπροσδιορισμού των υπολογισμών.

Τα αποτελέσματα μετά τις προσομοιώσεις, έδειξαν ξεκάθαρα, τον σημαντικό ρόλο που παίζει στην απόδοση της NOMA, η επιλογή του MCS στην επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού επιτυχίας και του εφικτού bit rate. Επιβεβαίωσαν την επιβάρυνση που υπομένουν οι χρήστες που συμμετέχουν στο ίδιο slot, η οποία μπορεί να είναι αποδεκτή, όταν η παραγόμενη κίνηση διατηρεί ένα αποδεκτό μέγεθος. Κατέδειξε εμφανικά, την ανάγκη πολλαπλασιασμού της κίνησης (με την δημιουργία των επανεκπομπών), ώστε να επιτευχθεί η επιτυχία των πακέτων δεδομένων. Φάνηκε η έντονη διακύμανση στην αυξομείωση της ισχύος λήψης λόγω των διαλείψεων και πως αυτή συνδέεται με το μέγεθος των αποδιδόμενων ραδιοπόρων στους χρήστες mMTC.

Τα συμπεράσματα που βγήκαν μετά την ολοκλήρωση της εργασίας, κατέδειξαν την εφικτή εφαρμογή NOMA, όταν τηρούνται κάποιες συνθήκες και γίνονται κάποιες παραδοχές.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η περίπτωση NOMA για έναν mMTC μαζί με eMBB. Θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε και να εξετάσουμε την NOMA τεχνική και στους mMTC χρήστες, που συνυπάρχουν στο ίδιο κομμάτι ραδιοπόρων και εξυπηρετούνται από τον ίδιο ΣΒ. Εφαρμόστηκε diversity κατηγορίας 2 στους mMTC το οποίο βελτιώνει την απόδοση. Θα μπορούσαμε να προσθέσουμε στο μοντέλο, την εφαρμογή MIMO – multiple input, multiple output, στο κεραιοσύστημα επικοινωνίας των eMBB χρηστών. Στην εργασία εξετάστηκε η επίπτωση των mMTC στους eMBB. Θα μπορούσαμε να εξετάσουμε την επίπτωση των eMBB στους mMTC και πόσο επηρεάζει την επιτυχία των πακέτων τους, αλλάζοντας την λογική της ακολουθίας των αποκωδικοποιήσεων και να έχουμε ως κριτήριο προτεραιότητας το πιο δυνατό ληφθέν σήμα από τον ΣΒ, ανεξάρτητα αν είναι το σήμα του eMBB ή του mMTC. Ακόμα και μετά την εκτέλεση των επανεκπομπών, τα πακέτα των mMTC δεν ήταν όλα επιτυχημένα. Μια πρόταση βελτίωσης θα ήταν να συνυπολογίσουμε επαναπροωθήσεις των πακέτων των mMTC, σε περίπτωση που ένα πακέτο, μαζί με τις επανεκπομπές του, δεν είναι επιτυχές. Αυτό βέβαια, θα αύξανε το πλήθος παρουσίας mMTC εκπομπών και θα δημιουργούσε επιπρόσθετες περιπτώσεις NOMA.

Η εργασία αυτή, αποτελεί μια μόνο προσπάθεια από τις αμέτρητες που μπορούν να πραγματοποιηθούν, ώστε να ερευνηθούν όλες οι πτυχές της νέας γενιάς επικοινωνιών. Το σύνολο των παραμέτρων και των μεταβλητών καθώς και εξυπηρέτηση της τυχαιότητας, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα, καθιστά το εγχείρημα πολύπλοκο. Σίγουρα, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης και βαθύτερης προσέγγισης στην τεχνική της NOMA.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Minimum Technical Performance Requirements for IMT-2020 radio interface(s)
- [2] A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models  
Jorge Navarro-Ortiz , Pablo Romero-Diaz, Sandra Sendra , Pablo Ameigeiras , Juan J. Ramos-Munoz, and Juan M. Lopez-Soler - 2020
- [3] Developing NOMA to Next Generation Multiple Access: Future Vision and Research Opportunities  
Yuanwei Liu, Wenqiang Yi, Zhiguo Ding, Xiao Liu, Octavia A. Dobre, and Naofal Al-Dhahir – 2022
- [4] NOMA-Based Random Access With Multichannel ALOHA  
Jinho Choi, Senior Member, IEEE – 2017
- [5] Joint Scheduling of URLLC and eMBB Traffic in 5G Wireless Networks  
Arjun Anand , Gustavo de Veciana , and Sanjay Shakkottai – 2020
- [6] Network Slicing for eMBB and mMTC with NOMA and Space Diversity Reception  
Eduardo Noboro Tominaga, Hirley Alves, Onel L. Alcaraz Lopez , Richard Demo Souza, Joao Luiz, Rebelatto, Matti Latva-aho
- [7] Multi-Connectivity for URLLC and Coexistence with eMBB in Time-Varying and Frequency-Selective Fading Channels  
Govindu Sai Kesava and Neelesh B. Mehta, - 2022
- [8] Study of non-orthogonal multiple access schemes for the massive deployment of IoT in future cellular networks  
Wissal Ben Ameer – 2021
- [9] Two-Step Random Access for 5G System: Latest Trends and Challenges - 2021  
Junseok Kim, Goodsol Lee, Seongwon Kim, Tarik Taleb, Sunghyun Choi, and Saewoong Bahk
- [10] Base Station Coordination Scheme for Multi-Tier Ultra-Dense Networks  
Sudarshan Mukherjee , Member, IEEE, Dongsun Kim , Graduate Student Member, IEEE, and Jemin Lee , Member, IEEE – 2021
- [11] Simple Semi-Grant-Free Transmission Strategies Assisted by Non-Orthogonal Multiple Access  
Zhiguo Ding , Senior Member, IEEE, Robert Schober, Fellow, IEEE, Pingzhi Fan, Fellow, IEEE, and H. Vincent Poor , Fellow, IEEE – 2019
- [12] Understanding the 5G NR PHY- Tetcos comp. [5G-NR-PHY.pdf \(tetcos.com\)](https://www.ttcos.com/5G-NR-PHY.pdf)
- [13] ETSI TS 138 214 V15.2.0 (2018-07) 5G; NR;  
Physical layer procedures for data (3GPP TS 38.214 version 15.2.0 Release 15)
- [14] Adaptive Modulation and Coding Technology in 5G System – 2020
- [15] A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G  
Linglong Dai , Senior Member, IEEE, Bichai Wang , Student Member, IEEE, Zhiguo Ding , Member, IEEE, Zhaocheng Wang , Senior Member, IEEE, Sheng Chen , Fellow, IEEE, and Lajos Hanzo , Fellow, IEEE – 2028
- [16] Design and Assessment of Random Access Procedures Supporting Massive Connectivity and Low-Delay and High-Reliability Services in 5G Networks - Maria Raftopoulou – 2018

- [17] ETSI TR 138 901 V14.3.0 (2018-01) 5G;  
Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 14.3.0 Release 14)
- [18] Radio fundamentals for cellular networks – Rohde and Schwartz
- [19] 5G 3GPP-like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments  
Katsuyuki Hanedaa, Jianhua Zhangb, Lei Tianb, Guangyi Liuc, Yi Zhenge, Henrik Asplundd, Jian Lie, Yi Wange, David Steere, Clara Lif, Tommaso Balerciaf, Sunguk Leeg, YoungSeok King, Amitava Ghoshh, Timothy Thomash, Takehiro Nakamurai, Yuichi Kakishimai, Tetsuro Imaii, Haralabos Papadopoulasi, Theodore S. Rappaportj,  
George R. MacCartney Jr.j, Mathew K. Samimij, Shu Sunj, Ozge Koymenk, Sooyoung Hurl, Jeongho Parkl, Charlie Zhangl, Evangelos Melliosm, Andreas F. Molischn, Saeed S. Ghassemzadeho, and Arun Ghosho  
aAalto University, bBUPT, cCMCC, dEricsson, eHuawei, fIntel, gKT Corporation, hNokia, iNTT DOCOMO, jNYU WIRELESS, kQualcomm, lSamsung, mUniversity of Bristol, nUniversity of Southern California, oAT&T
- [20] [Network coverage forecast – Mobility Report - Ericsson](#)
- [21] [5G spectrum bands explained— low, mid and high band | Nokia](#)
- [22] [Standalone architecture is ultimate 5G - Ericsson](#)
- [23] Jacobsen, T., Kovács, I.Z., Lauridsen, M., Hongchao, L., Mogensen, P., Madsen, T. (2016). Generic Energy Evaluation Methodology for Machine Type Communication. In: Madsen, T., Nielsen, J., Pratas, N. (eds) Multiple Access Communications. MACOM 2016. Lecture Notes in Computer Science(), vol 10121. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51376-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51376-8_6)
- [24] Lauridsen, M. (2015). Studies on Mobile Terminal Energy Consumption for LTE and Future 5G. PhD thesis, Department of Electronic Systems, Aalborg University.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α –Ρουτίνα υπολογισμού BLER eMBB

```
function BLERe =
compute_BLER_eMBBxR_new(pos,BW,total_RE,current_mMTC,coef) % RBG to
be used for SINR effective if necessary
%For stats usage
global eMBBUserData;
global UserData;
%global SNRstats;
%Total_RE = Num_of_RB*RE_per_slot;
% RBGsize = 0;

info_bits = total_RE* [.2344, .3770, .8770, 1.4766, 1.9141, 2.4063,
2.7305, 3.3223, 3.9023, 4.5234, 5.1152, 5.5547, 6.2266, 6.9141,
7.4063];
total_symbols = total_RE;
NF = 5; % noise figure dB
% Base station antenna gain
PreMBBdBm = eMBBUserData(3,pos); % - 10*log10(eMBBUserData(8,pos)); %
Rayleigh addition to eMBB Prx
PreMBB = 10^(.1*PreMBBdBm)/coef; %10; %mW signal power per RB Group
(5 RBs)

% Simple caclulation of interference power by mMTCs without SINR
effective
Pinterf = 0;
for jj = 1:length(current_mMTC)
    PrmMTCdBm(jj) = UserData(8,current_mMTC(jj)) -
UserData(7,current_mMTC(jj)) +
10*log10(UserData(16,current_mMTC(jj))); %Prx + Rayleigh
    PrmMTC(jj) = 10^(.1*PrmMTCdBm(jj)); %mW
    Pinterf = Pinterf + PrmMTC(jj);
end
Pinterf = Pinterf/coef;%10; % interference power per RB group (5
RBs)
Noise_power_dBm = -174 + 10*log10(BW/coef) + NF; % -174 +
10*log10(BW/10) + NF;
Noise_power = 10^(.1*Noise_power_dBm);
SNR = PreMBB/(Pinterf + Noise_power);

SNR = SNR/2; % We use 1/2 so that to be closer to the BLER figures
of [1]
V = SNR*(2+SNR)*log2(exp(1))^2/(1+SNR)^2; %[2]
MCS = eMBBUserData(6,pos);

BLERe = qfunc(sqrt(total_symbols/V)*(log2(1+SNR)-
info_bits(MCS)/total_symbols)); %[2]

end

% [1] Y. Wang, W. Liu and L. Fang, "Adaptive Modulation and Coding
Technology in 5G System,"
% 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing
(IWCMC), Limassol, Cyprus, 2020,
% pp. 159-164, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148457.
```



```

% [2] J. Choi, "Sliding Network Coding for URLLC," in IEEE
Transactions on Wireless Communications,
% vol. 21, no. 6, pp. 4424-4433, June 2022, doi:
10.1109/TWC.2021.3129996.
%
% [3] MCS Selection for Throughput Improvement in Downlink LTE
Systems

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Ρουτίνα αντιστοίχισης SNR vs BLER

```

Num_of_RB = 10;
mmtc_PRB_symbols=3240; %i=1 ->2 slots X 14 = 28 OFDMs, 10 PRBs

info_bits = mmtc_PRB_symbols*[0.0586; 0.0977; 0.1523; 0.2344;
0.3770; 0.6016; 0.8770; 1.1758;
1.4766; 1.9141; 2.4063;
2.7305; 3.3223; 3.9023; 4.5234];
total_symbols = mmtc_PRB_symbols;

for ii=1:length(info_bits)
    SNR_dB = -15:0.005:30;
    SNR = 10.^(.1*(SNR_dB-3));
    V = SNR.*(2+SNR)*log2(exp(1))^2./(1+SNR).^2;
    eps(ii,:) = qfunc(sqrt(total_symbols./V).*(log2(1+SNR)-
info_bits(ii)/total_symbols));
    semilogy(SNR_dB,eps(ii,:));
    hold on
end
grid
axis([-15 30 1e-3 1]);

XXXX = eps > .1; %Acceptable BLER 10% (0.1)
ind = sum(XXXX,2);
mmtc_SNRcqi = -10+(ind+1)*.005;
mmtc_SNR_dB = [-9.995; -8.06; -6.14; -4.21; -1.995; 0.34; 2.395;
4.15; 5.645; 7.545; 9.45; 10.62; 12.65; 14.55; 16.525];

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Ρουτίνα υπολογισμού BLER mMTC

```

function BLERm = compute_BLER_mMTC(BW,total_RE,current_mMTC,MCS) %
RBG to be used for SINR effective if necessary

%global eMBBUserData;
global UserData;

%Total_RE = Num_of_RB*RE_per_slot;
info_bits = total_RE*[0.0586 0.0977 0.1523 0.2344 0.3770 0.6016
0.8770 1.1758 1.4766 1.9141 2.4063 2.7305 3.3223 3.9023 4.5234];
total_symbols = total_RE;
SNRdB = UserData(6,current_mMTC) +
10*log10(UserData(16,current_mMTC)) +
10*log10(UserData(13,current_mMTC));

```

```

SNR = 10^(.1*SNRdB);
SNR = SNR/2; % We use 1/2 so that to be closer to the BLER figures
of [1]
V = SNR*(2+SNR)*log2(exp(1))^2/(1+SNR)^2; %[2]
%MCS = 5; % Afti i parametros, den exei ginei GLOBAL
BLERm = qfunc(sqrt(total_symbols/V)*(log2(1+SNR)-
info_bits(MCS)/total_symbols)); %[2]
end

% [1] Y. Wang, W. Liu and L. Fang, "Adaptive Modulation and Coding
Technology in 5G System,"
% 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing
(IWCMC), Limassol, Cyprus, 2020,
% pp. 159-164, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148457.

% [2] J. Choi, "Sliding Network Coding for URLLC," in IEEE
Transactions on Wireless Communications,
% vol. 21, no. 6, pp. 4424-4433, June 2022, doi:
10.1109/TWC.2021.3129996.
%
% [3] MCS Selection for Throughput Improvement in Downlink LTE
Systems

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ – Ρουτίνα υπολογισμού του PL

```

function [L,los] = compute_path_loss(BS, d2D, indoor)
% 3GPP path loss model TR 38.901 (2018)
% UEs are considered to be placed lower than 13 m
fc = 3.5; % GHz
c = 3e8;
hMBS = 25; % MBS height (m)
hMBSp = hMBS - 1;
hSBS = 10; % SBS height (m)
hSBSp = hSBS - 1;
hUE = rand*13; % UE height
hUEp = hUE - 1;
sfUMilos = 4; % shadowing (dB)
sfUMinlos = 7.82; % shadowing (dB)
sfUMalos = 4; % shadowing (dB)
sfUManlos = 6; % shadowing (dB)
sfO2I1l = 4.4; % O2I shadowing low-loss (dB)
% sfO2Ih1 = 6.5; % O2I shadowing high-loss (dB)

%% Calculate din/dout distances for indoor UE
if indoor == 1
    if d2D > 25
        rand1 = rand*25;
        rand2 = rand*25;
        d2Din = min(rand1,rand2);
        d2Dout = d2D-d2Din;
    else
        rand1 = rand*d2D;
        rand2 = rand*d2D;
        d2Din = min(rand1,rand2);
        d2Dout = d2D-d2Din;
    end
end

```

```

    end
else
    d2Dout = d2D;
end

%% Calculate pathloss
if BS > 10000 % UE is served by SBS, UMi model
    % Calculate LOS probability
    los = 0;
    if d2Dout <= 18
        PrLOS = 1;
    else
        PrLOS = 18/d2Dout+exp(-d2Dout/36)*(1-18/d2Dout);
    end
    if rand < PrLOS
        los = 1;
    end
    if indoor == 1
        los = 0;
    end

    d3D = sqrt(d2D^2+(hSBS-hUE)^2);
    dBP = 4*hSBSp*hUEp*fc*10^9/c; % breakpoint distance
    if d2D < dBP
        PLlos = 32.4+21*log10(d3D)+20*log10(fc);
    else
        PLlos = 32.4+40*log10(d3D)+20*log10(fc)-
9.5*log10(dBP^2+(hSBS-hUE)^2);
    end
    if los == 1
        PL = PLlos;
        % shadowing
        v = lognrnd(0,10^(.1*sfUMilos));
        PL = PL + 10*log10(v);
        PL = PL + sfUMilos;
    else
        PLnlos = 35.3*log10(d3D)+22.4+21.3*log10(fc)-0.3*(hUE-1.5);
        PL = max(PLlos,PLnlos);
        % shadowing
        v = lognrnd(0,10^(.1*sfUMinlos));
        PL = PL + 10*log10(v);
        PL = PL + sfUMinlos;
    end
end
else % UE is served by MBS, UMa model
    % Calculate LOS probability
    los = 0;
    if d2Dout <= 18
        PrLOS = 1;
    else
        PrLOS = 18/d2Dout+exp(-d2Dout/63)*(1-18/d2Dout);
    end
    if rand < PrLOS
        los = 1;
    end
    if indoor == 1
        los = 0;
    end
end

```

```

end

d3D = sqrt(d2D^2+(hMBS-hUE)^2);
dBP = 4*hMBSp*hUEp*fc*10^9/c;
if d2D < dBP
    PLlos = 28+22*log10(d3D)+20*log10(fc);
else
    PLlos = 28+40*log10(d3D)+20*log10(fc)-9*log10(dBP^2+(hMBS-
hUE)^2);
end
if los == 1
    PL = PLlos;
    % shadowing
%     v = lognrnd(0,10^(.1*sfUMalos));
%     PL = PL + 10*log10(v);
    PL = PL + sfUMalos;
else
    PLnlos = 13.54+39.08*log10(d3D)+20*log10(fc)-0.6*(hUE-1.5);
    PL = max(PLlos,PLnlos);
    % shadowing
%     v = lognrnd(0,10^(.1*sfUMalos));
%     PL = PL + 10*log10(v);
    PL = PL + sfUMalos;
end
end
L = PL;

%% O2I building penetration losses for indoor UE
Lglass = 2+0.2*fc;
% LIIRglass = 23+0.3*fc;
Lconcrete = 5+4*fc;
if indoor == 1
    % low-loss model
    PLtw = 5-10*log10(0.3*10^(-Lglass/10)+0.7*10^(-Lconcrete/10));
    % high-loss model
%     PLtw = 5-10*log10(0.7*10^(-LIIRglass/10)+0.3*10^(-
Lconcrete/10));
    PLin = 0.5*d2Din;
    % shadowing
%     v = lognrnd(0,10^(.1*sfO2Ih1));
%     v = lognrnd(0,10^(.1*sfO2I1l));
%     L = PL+PLtw+PLin+10*log10(v);
    L = PL + PLtw + PLin + sfO2I1l;
end

```