

Μετάδοση φωνής (voice) σε IEEE 802.11 ασύρματα τοπικά δίκτυα

Μπρουζιούτης Χαρίσης

January 19, 2010

Περιεχομενα

1	Μετάδοση φωνής σε IEEE 802.11 δίκτυα	2
1.1	Χωρητικότητα Φωνής	2
1.2	Μέτρα Ποιότητας	2
2	Αναλυτικό Μοντέλο	5
2.1	Παραδοχές	6
2.2	Μοντελοποίηση σε Αλυσίδα Markov	6
2.3	Πιθανότητα Απόρριψης Πακέτου	8
2.4	Μέση Καθυστέρηση Πακέτων	8
2.5	Απόκλιση Καθυστέρησης Πακέτου (Jitter)	11
3	Αποτελέσματα	13
3.1	Επιβεβαίωση Αναλυτικού Μοντέλου	13
3.2	Χωρητικότητα	16

1

Μετάδοση φωνής σε IEEE 802.11 δίκτυα

1.1 Χωρητικότητα Φωνής

Στη βιβλιογραφία ως χωρητικότητα φωνής ορίζεται το μέγιστο πλήθος τηλεφωνικών συνεδριών που μπορούν να υποστηριχθούν ταυτόχρονα από ένα δίκτυο ενώ παράλληλα ικανοποιούνται καθορισμένοι περιορισμοί ποιότητας [Eiger et al., 2005]. Σ' αυτή τη μελέτη θα υπολογίσουμε την χωρητικότητα IEEE 802.11 ασυρμάτων δικτύων σε καλής ποιότητας τηλεφωνικές συνεδρίες. Μία σειρά από μέτρα ποιότητας και συγκεκριμένες οριακές τιμές για αυτά κρίνουν την ποιότητα των τηλεφωνικών συνεδριών.

1.2 Μέτρα Ποιότητας

Τρία είναι τα σημαντικότερα μέτρα που αποδίδουν με σαφήνεια την ποιότητα ενός δικτύου όσον αναφορά τη μετάδοση φωνής σε δίκτυο μεταγωγής πακέτων:

- Μέση καθυστέρηση μετάδοσης
- Μέση απόκλιση καθυστέρησης μετάδοσης
- Ρυθμός απόρριψης πακέτων

Ο Caputo στο [Caputo, 2000] αναγνωρίζει αυτά τα τρία ως τα μέτρα κλειδιά και προτείνει προδιαγραφές για υπηρεσίες μετάδοσης φωνής (VoIP) όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Caputo in [Caputo, 2000] identified average delay, delay variation and packet loss rate as the key factors that impact voice quality in packet networks, and proposed the widely accepted VoIP Quality of Service (QoS) requirements listed in Table 1.1. We will compare our analytical results against the requirements of Table 1.1 and

Table 1.1: Απαιτήσεις ποιότητας VoIP

Ποιότητα	Καθυστέρηση (ms)	Απόκλιση καθυστέρησης (ms)	Απώλεια πακέτων
Καλή	0 - 150	0 - 75	< 3%
Μεσαία	150 - 400	0 - 125	< 7%
Κακή	>400	0 - 225	> 7%

examine how these conditions are met when data communication is also present in the network.

Voice codecs packetize generated voice data at a constant interval called packetization interval. In the considered scenarios, if voice packet delay is higher than the packetization interval, then, on average, a new voice packet is generated before the previous packet has been successfully transmitted. The new voice packet must be buffered and buffer time increases as new voice packets are added to the queue. This leads to significant and rapid voice quality degradation. Thus, for good quality voice calls, we consider that the average voice packet delay should be lower than the packetization interval (depending on the utilized voice codec). Moreover, we retain the other two good quality requirements, jitter less than 75ms and packet loss rate less than 3% (as indicated in Table 1.1).

Voice capacity is measured at the point where a quality requirement is not met anymore and thus at saturation conditions due to the number of stations. This methodology has been described in detail and successfully utilized in predicting WLAN voice capacity with no data traffic at [Amanatiadis et al., 2007].

Table 1.2: System Parameter Values

MAC Header	224 bits at 11Mbit/s
Physical header PHY	192 bits at 1Mbit/s
ACK	112 bits at 11Mbit/s + PHY
RTS	160 bits at 1Mbit/s + PHY
CTS	112 bits at 1Mbit/s + PHY
Propagation delay, δ	1 μs
Slot time, σ	20 μs
SIFS	10 μs
DIFS	50 μs
Minimum CW, W_0	32
Number of CW sizes, m'	5
Retransmission limit m	6
l_{data}	8184 bits
l_{ack}	416 bits (52 bytes)
G.711 codec l_{voice}	1600 bits
G.711 packetization interval	20 ms
G.729 codec l_{voice}	480 bits
G.729 packetization interval	20 ms
G.723.1 codec l_{voice}	512 bits
G.723.1 packetization interval	30 ms

2

Αναλυτικό Μοντέλο

2.1 Παραδοχές

Το αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε βασίζεται σε κάποιες θεμελιώδεις παραδοχές.

Βασικότερη παραδοχή είναι ότι τα πακέτα συγκρούονται με σταθερή πιθανότητα p , ανεξάρτητη από τον αριθμό των συγκρούσεων που αντιμετώπισε το πακέτο προηγουμένως.

2.2 Μοντελοποίηση σε Αλυσίδα Markov

Η μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1 χρησιμοποιείται για να απεικονίσει τη δισδιάστατη διαδικασία $\{b(t), s(t)\}$. Για ένα δεδομένο σταθμό στο χρονικό slot t , $b(t)$ και $s(t)$ είναι οι στοχαστικές διαδικασίες που εκφράζουν τον μετρητή υποχώρησης και το στάδιο υποχώρησης αντίστοιχα.

Έστω $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$ η στατική κατανομή της μαρκοβιανής αλυσίδας, όπου $i \in [0, m], k \in [0, W_i - 1]$. Σύμφωνα με τα [Bianchi, 2000] και [Wu et al., 2002], οι σχέσεις (2.1) και (2.2) ισχύουν:

$$b_{i,0} = p \cdot b_{i-1,0}, \quad 0 < i \leq m \quad (2.1)$$

$$b_{i,0} = p^i \cdot b_{0,0}, \quad 0 < i \leq m \quad (2.2)$$

Από τη σχέση (2.1) και λόγω της κανονικότητας της αλυσίδας ισχύει:

$$b_{i,k} = \frac{W_i - k}{W_i} \cdot b_{i,0}, \quad i \in [0, m], \quad k \in [0, W_i - 1] \quad (2.3)$$

Οι τιμές $b_{i,k}$ εκφράζονται συναρτήσει των $b_{0,0}$ και p από τις σχέσεις (2.2) και (2.3). Εφαρμόζοντας τη συνθήκη κανονικοποίησης και μετά από κάποιες πράξεις το $b_{0,0}$ υπολογίζεται από την σχέση (2.6). Το $b_{0,0}$ εξαρτάται από τις τιμές m και m' .

$$b_{0,0} = \frac{2(1-2p)(1-p)}{W(1-(2p)^{m'+1})(1-p) + (1-2p)(1-p^{m+1}) + W2^{m'}p^{m'+1}(1-2p)(1-p^{m-m'})}, \quad m > m' \quad (2.6)$$

Με βάση αυτή την ανάλυση υπολογίζεται η πιθανότητα τ ένας σταθμός να εκπέμψει ένα πακέτο σε ένα τυχαίο χρονικό slot. Εφόσον ένας σταθμός εκπέμπει όταν ο μετρητής υποχώρησής του μηδενίζεται, το τ είναι:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \sum_{i=0}^m p^i \cdot b_{0,0} = b_{0,0} \cdot \frac{1-p^{m+1}}{(1-p)} \quad (2.7)$$

Σύμφωνα με την (2.7) η πιθανότητα εκπομπής τ εξαρτάται από την πιθανότητα σύγκρουσης p .

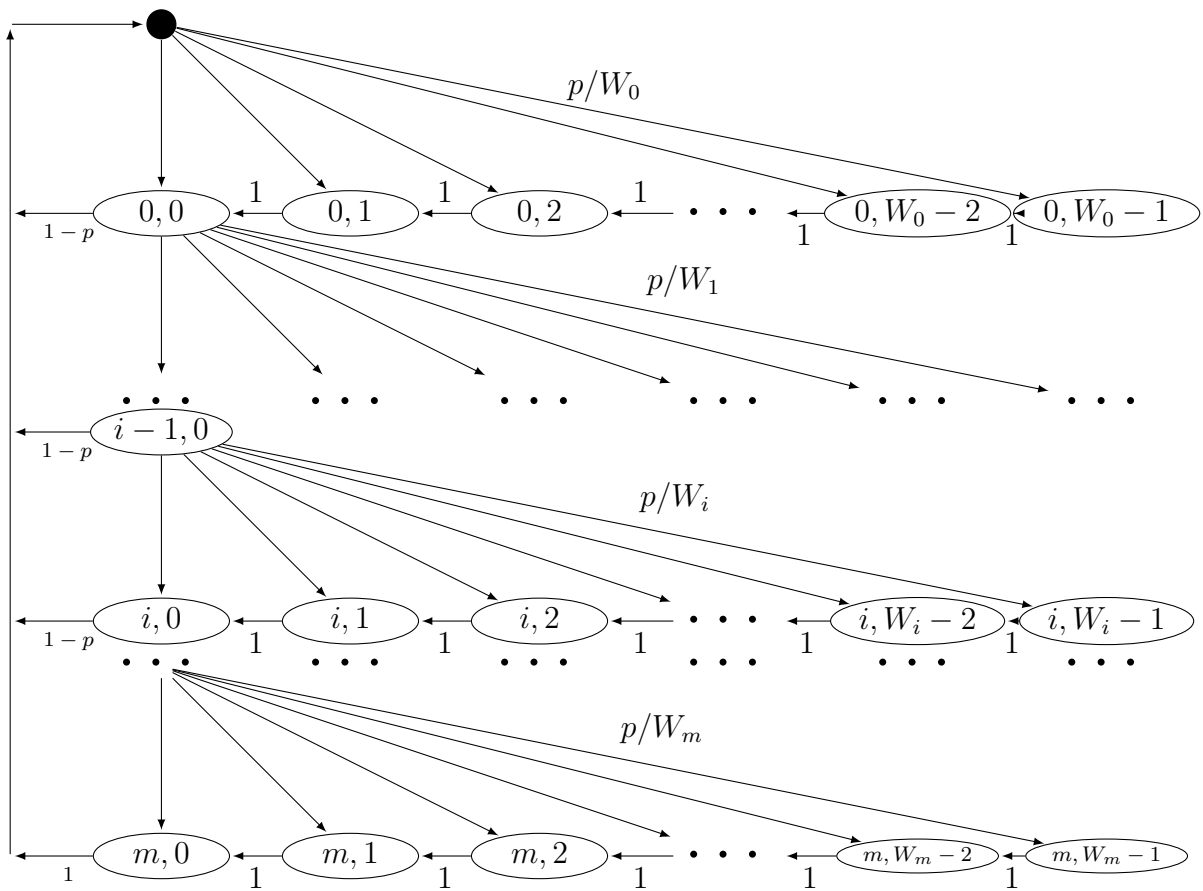


Figure 2.1: Μοντελοποίηση σε αλυσίδα Markov

Η πιθανότητα p ένα εκπεμπόμενο πακέτο να συγκρουστεί ισούται με τη πιθανότητα τουλάχιστον ένας από τους υπόλοιπους $n - 1$ σταθμούς να εκπέμψει κατά το ίδιο χρονικό slot. Οι σταθμοί συγκρούονται με σταθερή πιθανότητα τ , όποτε για την πιθανότητα p ισχύει:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.8)$$

Οι εξισώσεις (2.7) και (2.8) σχηματίζουν ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων με δύο αγνώστους, p και τ . Το σύστημα μπορεί να λυθεί με χρήση αριθμητικών μεθόδων και αποδεικνύεται ότι έχει μοναδική λύση. Ισχύουν $p \in [0, 1]$ και $\tau \in [0, 1]$.

2.3 Πιθανότητα Απόρριψης Πακέτου

Πιθανότητα απόρριψης πακέτου ονομάζεται η πιθανότητα ένα πακέτο να φτάσει το όριο επανεκπομπών και να απορριφθεί. Ισχύει:

$$P_{drop} = p^{m+1} \quad (2.9)$$

μιας και το πακέτο απορρίπτεται εφόσον έχει υποστεί $m + 1$ συγκρούσεις.

2.4 Μέση Καθυστέρηση Πακέτων

Η μέση καθυστέρηση ορίζεται ως το μέσο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη στιγμή που ένα πακέτο είναι στην κεφαλή της MAC ουράς ενός σταθμού μέχρι να ληφθεί ένα ACK πακέτο για αυτό. Αν το πακέτο απορριφθεί η καθυστέρηση του δεν υπολογίζεται για τη μέση καθυστέρηση.

Έστω $E[D_j^{voice}]$ η μέση καθυστέρηση των πακέτων που εκπέμφθηκαν επιτυχώς από το στάδιο υποχώρησης j .

$$E[D_j^{voice}] = T_s^{voice} + jT_c^{voice} + E[slot] \sum_{i=0}^j \frac{(W_i - 1)}{2} \quad (2.10)$$

$$0 \leq j \leq m$$

όπου $E[slot]$ είναι ο μέσος χρόνος που καθυστερεί ένας σταθμός σε ένα χρονικό slot:

$$E[slot] = (1 - P_{tr}) \cdot \sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s^{mean} + P_{tr} \cdot (1 - P_s) \cdot T_c \quad (2.11)$$

σ είναι ο χρόνος ενός άδειου slot, ενώ T_s^{mean} είναι ο μέσος χρόνος που το μέσο είναι κατειλημμένο κατά τη διάρκεια μίας τυχαίας επιτυχούς μετάδοσης και T_c είναι ο μέσος χρόνος που το μέσο είναι κατειλημμένο κατά τη διάρκεια μίας σύγκρουσης.

Έστω P_{tr} η πιθανότητα τουλάχιστον ένας από $n - 1$ σταθμούς να μεταδώσει ένα πακέτο:

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.12)$$

Η πιθανότητα P_s μια μετάδοση να είναι επιτυχημένη δίνεται από την πιθανότητα μόνο ένας από $n - 1$ σταθμούς να μεταδώσει δεδομένου ότι υπάρχει μετάδοση στο κανάλι:

$$P_s = \frac{(n - 1) \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-2}}{1 - (1 - \tau)^{n-1}} \quad (2.13)$$

Έστω P_k η πιθανότητα ακριβώς k από $n - 1$ σταθμούς να εμπλακούν σε μία σύγκρουση:

$$P_k = \binom{n - 1}{k} \frac{\tau^k (1 - \tau)^{n-1-k}}{P_{tr}(1 - P_s)} \quad (2.14)$$

Έστω $P_{ack,k}$, $P_{voice,k}$ και $P_{data,k}$ οι πιθανότητες ένα πακέτο ACK, φωνής και δεδομένων αντίστοιχα να είναι το μεγαλύτερο πακέτο που εμπλέκεται σε μία σύγκρουση:

$$P_{ack,k} = \prod_{r=0}^{k-1} \frac{n_{ack} - r}{n - 1 - r} \quad (2.15)$$

$$P_{voice,k} = 1 - \prod_{r=0}^{k-1} \frac{n_{data} + n_{ack} - r}{n - 1 - r} \quad (2.16)$$

$$P_{data,k} = 1 - P_{ack,k} - P_{voice,k} \quad (2.17)$$

$$2 \leq k \leq n - 1$$

Οι χρονικές διάρκειες T_s^{voice} και T_s^{mean} εκφράζουν το μέσο χρόνο χρήσης του μέσου κατά τη διάρκεια μιας επιτυχούς μετάδοσης φωνής και τυχαίας μετάδοσης αντίστοιχα. Ισχύουν:

$$T_s^{voice} = O^{bas} + \frac{l_{voice}}{C} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} T_s^{mean} = & \left(O^{RTS} + \frac{l_{data}}{C} \right) \frac{n_{data}}{n - 1} \\ & + \left(O^{basic} + \frac{l_{ack}}{C} \right) \frac{n_{ack}}{n - 1} \\ & + \left(O^{basic} + \frac{l_{voice}}{C} \right) \frac{n_{voice} - 1}{n - 1} \end{aligned} \quad (2.19)$$

T_c είναι ο μέσος χρόνος χρήσης του μέσου κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης και

ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΤΑΙ:

$$\begin{aligned}
T_c = & \left(O_c^{bas} + \frac{l_{ack}}{C} \right) \sum_{k=2}^{n-1} P_k P_{ack,k} \\
& + \left(O_c^{bas} + \frac{l_{voice}}{C} \right) \sum_{k=2}^{n-1} P_k P_{voice,k} \\
& + \left(O_c^{RTS} \right) \sum_{k=2}^{n-1} P_k P_{data,k}
\end{aligned} \tag{2.20}$$

T_c^{voice} είναι ο μέσος χρόνος χρήσης του μέσου κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης όπως εμπλέκεται ένας σταθμός φωνής:

$$T_c^{voice} = O_c^{RTS} \tag{2.21}$$

όπου O_c^{RTS} και O_c^{bas} είναι το overhead για επιτυχή μετάδοση χρησιμοποιώντας RTS και basic access αντίστοιχα. Ομοίως, O_c^{RTS} και O_c^{bas} είναι τα αντίστοιχα overheads για ανεπιτυχείς μεταδόσεις (συγκρούσεις):

$$\begin{aligned}
O_c^{RTS} = & DIFS + T_H + T_{RTS} + 3SIFS + \\
& + 4\delta + T_{CTS} + T_{ACK}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$O_c^{bas} = DIFS + T_H + SIFS + T_{ACK} + \delta \tag{2.23}$$

$$O_c^{RTS} = DIFS + T_{RTS} + \delta + SIFS + T_{CTS} \tag{2.24}$$

$$O_c^{bas} = O_c^{bas} \tag{2.25}$$

Τα T_H , T_{RTS} , T_{CTS} , T_{ACK} εκφράζουν τους χρόνους διάρκειας εκπομπής για το Header (MAC Header συν PHY Header), το πλαίσιο RTS, το πλαίσιο CTS και το πλαίσιο ACK αντίστοιχα ενώ δ είναι η καθυστέρηση μετάδοσης.

Έστω Q_j η πιθανότητα μια επιτυχημένη εκπομπή να προήλθε από το j στάδιο υποχώρησης.

$$Q_j = \frac{(1-p)p^j}{1-p^{m+1}} \quad 0 \leq j \leq m \tag{2.26}$$

Οπότε, η μέση καθυστέρηση των πακέτων φωνής υπολογίζεται ως:

$$E[D^{voice}] = \sum_{j=0}^m \left(E[D_j^{voice}] \cdot Q_j \right) \tag{2.27}$$

2.5 Απόκλιση Καθυστέρησης Πακέτου (Jitter)

Η ανάλυση για το jitter που ακολουθεί βασίζεται στην υπόθεση ότι η απόκλιση καθυστέρησης προέρχεται κυρίως από τις διαφορετικές τιμές που επιλέχθηκαν στα στάδια υποχώρησης και όχι από την διαφοροποίηση της χρονικής διάρκειας των χρονικών slots υποχώρησης. [Raptis et al.,]

Έστω $E[D_{0,i}^{voice}]$ η μέση καθυστέρηση πακέτων φωνής που εκπέμφθηκαν επιτυχώς από το στάδιο 0 έχοντας αρχικά επιλέξει τιμή υποχώρησης i και $E[U_{0,i}^{voice}]$ η αντίστοιχη μέση καθυστέρηση αποτυχημένων εκπομπών φωνής. Θεωρώ ότι κάθε σταθμός καθυστερεί σε κάθε χρονικό slot χρόνο $E[slot]$ κατά μέσο όρο:

$$\begin{aligned} E[D_{0,i}^{voice}] &= T_s^{voice} + i \cdot E[slot] \\ E[U_{0,i}^{voice}] &= T_c^{voice} + i \cdot E[slot] \\ 0 &\leq i \leq W_0 - 1 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Η μέση καθυστέρηση $E[U_0^{voice}]$ των πακέτων φωνής, που εκπέμφθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο 0, είναι

$$E[U_0^{voice}] = T_c^{voice} + E[slot] \frac{W_0 - 1}{2} \quad (2.29)$$

Οπότε, γενικά, η μέση καθυστέρηση $E[U_j^{voice}]$ των πακέτων φωνής, που εκπέμφθηκαν ανεπιτυχώς από το στάδιο j , υπολογίζεται:

$$\begin{aligned} E[U_j^{voice}] &= (j+1)T_c^{voice} + E[slot] \sum_{i=0}^j \frac{W_i - 1}{2} \\ 0 &\leq j \leq m \end{aligned} \quad (2.30)$$

Η μέση καθυστέρηση $E[D_{i,j}^{voice}]$ των πακέτων, που εκπέμφθηκαν επιτυχώς από το στάδιο j έχοντας προηγουμένως επιλέξει τιμή υποχώρησης i στο στάδιο j , είναι:

$$\begin{aligned} E[D_{j,i}^{voice}] &= T_s^{voice} + iE[slot] + E[U_{j-1}^{voice}] \\ 0 &\leq j \leq m, \quad 0 \leq i \leq W_j - 1 \end{aligned} \quad (2.31)$$

όπου $E[U_{-1}^{voice}] = 0$.

Η πιθανότητα ένας σταθμός να διαλέξει την τιμή υποχώρησης i στο στάδιο j είναι $1/W_j$ (ανεξάρτητη του i) μιάς και οι σταθμοί επιλέγουν την τιμή τυχαία από το διάστημα $[0, W_j - 1]$ (κανονική κατανομή). Οπότε, η πιθανότητα P_j ένα πακέτο να εκπέμφθει επιτυχώς (δεδομένου ότι δεν απορρίπτεται) από το στάδιο j έχοντας

προηγουμένως επιλέξει τιμή υποχώρησης i στο στάδιο j , είναι:

$$P_j = \frac{(1-p)p^j}{1-p^{m+1}} \frac{1}{W_j} \quad 0 \leq j \leq m \quad (2.32)$$

Ακόμη

$$E[D^{voice^2}] = \sum_{j=0}^m \left(\sum_{i=0}^{W_j-1} (E[D_{j,i}^{voice}])^2 P_j \right) \quad (2.33)$$

Οπότε, η τυπική απόκλιση της καθυστέρησης πακέτων φωνής (jitter) J^{voice} υπολογίζεται ως:

$$J^{voice} = \sqrt{E[D^{voice^2}] - (E[D^{voice}])^2} \quad (2.34)$$

3

Αποτελέσματα

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρατεθούν κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα από το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου ???. Κατ' αρχήν, στο κεφάλαιο 3.1 συγκριθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης με αποτελέσματα προσωμείωσης δείχνοντας ότι το μαθηματικό μοντέλο είναι ορθό και τα αποτελέσματα του είναι πολύ κοντά στη πραγματικότητα.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια αποτελέσματα με σκοπό να μελετηθεί η χωρητικότητα του δικτύου σε τηλεφωνικές κλήσεις σε διαφορετικά σενάρια παράλληλης μετάδοσης δεδομένων. Μετρήσεις χωρητικότητας θα παρουσιαστούν για τα τρία δημοφιλή codecs φωνής: G.711, G.729 και G.723.1.

Όλα τα αποτελέσματα που παρατίθενται έχουν υπολογιστεί με βάση της παραμέτρους λειτουργίας του Direct Spread Sequence Spectrum (DSSS) PHY επιπέδου όπως ορίζεται στο [802.11, 2007]. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμέτρους του DSSS καθώς και οι παράμετροι των codecs φωνής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

3.1 Επιβεβαίωση Αναλυτικού Μοντέλου

Για την επιβεβαίωση του αναλυτικού μοντέλου συγκρίνονται τα αποτελέσματα τού με τα αποτελέσματα προσωμειωτή στις ίδιες συνθήκες. Ο προσωμειωτής αναπτύχθηκε στο ελεύθερο μαθηματικό πακέτο ανοικτού κώδικα, Sage [Stein et al., 2009].

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση φωνής $E[D^{voice}]$ (όπως υπολογίζεται από την σχέση (2.27)) ως προς τον αριθμό των G.711 τηλεφωνικών συνεδριών, εξετάζοντας διάφορα σενάρια παράλληλης μετάδοσης δεδομένων. Παρουσιάζονται μετρήσεις από τον προσωμειωτή και προβλέψεις του αναλυτικού μοντέλου για μετάδοση μόνο φωνής καθώς και φωνής με 1, 2, 3 ή 4 ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου (γραμμές) συμφωνούν με τις μετρήσεις του προσωμειωτή (σύμβολα). Έτσι, αποδिकνύεται ότι το μαθηματικό μοντέλο για τη μέση

Table 3.1: Παραμετρικές Τιμές Λειτουργίας

MAC Header	224 bits at 11Mbit/s
Physical header PHY	192 bits at 1Mbit/s
ACK	112 bits at 11Mbit/s + PHY
RTS	160 bits at 1Mbit/s + PHY
CTS	112 bits at 1Mbit/s + PHY
Καθυστέρηση μετάδοσης, δ	1 μs
Slot time, σ	20 μs
SIFS	10 μs
DIFS	50 μs
Ελάχιστο CW, W_0	32
Number of CW sizes, m'	5
Όριο επανεκπομπών m	6
l_{data}	8184 bits
l_{ack}	416 bits (52 bytes)
G.711 codec l_{voice}	1600 bits
G.711 packetization interval	20 ms
G.729 codec l_{voice}	480 bits
G.729 packetization interval	20 ms
G.723.1 codec l_{voice}	512 bits
G.723.1 packetization interval	30 ms

καθυστέρηση μετάδοσης φωνής που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 2.4 είναι ακριβές.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μέση απόκλιση καθυστέρησης φωνής (jitter) J^{voice} (όπως υπολογίζεται από τη Σχέση (2.34)) ως προς τον αριθμό των τηλεφωνικών συνεδριών με κωδικοποίηση G.711. Παρουσιάζονται αναλυτικές προβλέψεις και τιμές προσωμοίωσης για μετάδοση φωνής με παράλληλη μετάδοση καμίας έως 4 ταυτόχρονων ροών δεδομένων. Τα αναλυτικά αποτελέσματα (γραμμές) προσεγγίζουν τις τιμές της προσωμοίωσης (σύμβολα) με σταθερή ακρίβεια. Το προτεινόμενο μοντέλο του υποκεφαλαίου 2.5 για το jitter λαμβάνει υπ'όψιν του την διαφοροποίηση των τιμών που επιλέγονται για τον μετρητή οπισθωχώρησης μόνο στο τελευταίο στάδιο οπισθωχώρησης. Ως αποτέλεσμα, τα αναλυτικά αποτελέσματα είναι ελαφρώς υποεκτιμημένα αλλά και η υπολογιστική πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι σημαντικά μειωμένη. Η υπολογιζόμενη τιμές συγκλίνουν στις πραγματικές τιμές αρκετά ώστε να οδηγούν σε ακριβείς προβλέψεις χωρητικότητας.

Τα Σχήματα 3.1 αποδεικνύουν 3.2 ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι ακριβές και ικανό να προβλέψει συνθήκες του δικτύου. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου για να προβλέψουμε την χωρητικότητα του δικτύου σε συνεδρίες φωνής.

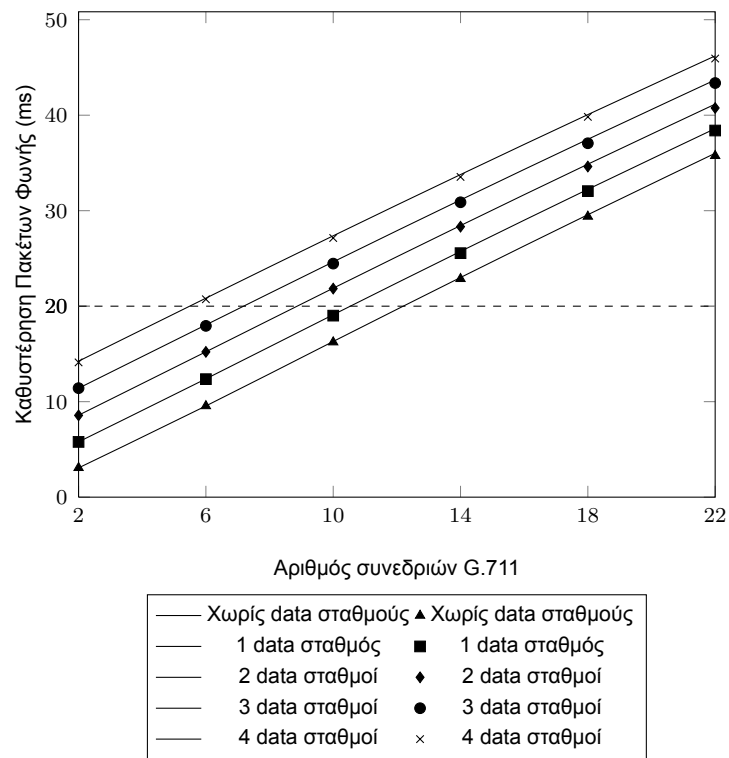


Figure 3.1: Καθυστέρηση G.711 ως προς τηλεφωνικές συνεδρίες

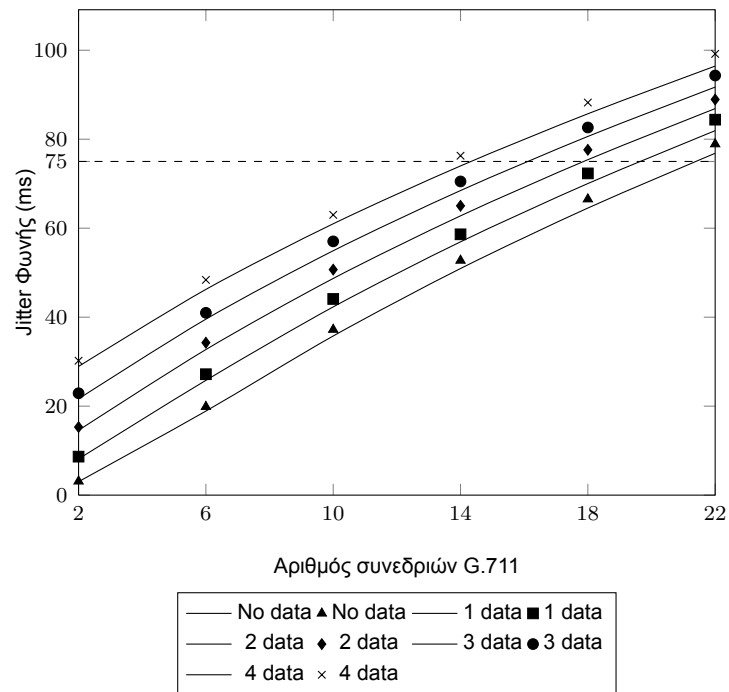


Figure 3.2: G.711 Jitter ως προς τηλεφωνικές συνεδρίες

3.2 Χωρητικότητα

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση μετάδωσης φωνής ως προς τον αριθμό των τηλεφωνικών συνεδριών. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου καμία έως 4 παράλληλες ροές δεδομένων επιβαρύνουν το δίκτυο. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το όριο καλής ποιότητας φωνής όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 1.1. Η χωρητικότητα φωνής του δικτύου υπολογίζεται στο σημείο όπου η καμπύλη των αποτελεσμάτων τέμνει το όριο καλής ποιότητας. Μετρήσεις χωρητικότητας παρουσιάζονται στο πίνακα 3.2. Για ένα δίκτυο όπου μεταδίδεται αποκλιστικά φωνή, υπολογίζεται μια χωρητικότητα 12 τηλεφωνικών συνεδριών. Αυτή η πρόβλεψη συμφωνεί απόλυτα με άλλα αποτελέσματα γνωστά στη βιβλιογραφία ([Amanatiadis et al., 2007], [Garg and Kappes, 2003] και [Hole and Tobagi, 2004]). Η πρόβλεπόμενη χωρητικότητα των 12 σταθμών μειώνεται γραμμικά κατά δύο συνεδρίες φωνής για κάθε ροή δεδομένων που προστίθεται στο δίκτυο.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μέση απόκλιση καθυστέρηση φωνής (jitter) ως προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής όταν στο δίκτυο εκπέμπονται από καμία έως και τέσσερις ροές δεδομένων παράλληλα. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το όριο του jitter για την επίτευξη τηλεφωνικής κλήσης καλής ποιότητας. Το όριο αυτό είναι 75 ms όπως προτάθηκε στο υποκεφάλαιο 1.1. Η χωρητικότητα φωνής υπολογίζεται στο σημείο τομής της καμπύλης του jitter με την ευθεία του ορίου ποιότητας. Για ένα δίκτυο χωρίς μετάδοση δεδομένων (μετάδοση μόνο φωνής) υπολογίζεται χωρητικότητα 21 συνεδριών φωνής, όπως αυτή περιορίζεται από απώλειες ποιότητας λόγω jitter. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2 αυτή η πρόβλεψη μειώνεται γραμμικά κατά 2 συνεδρίες για κάθε ροή δεδομένων που προστίθεται στο δίκτυο.

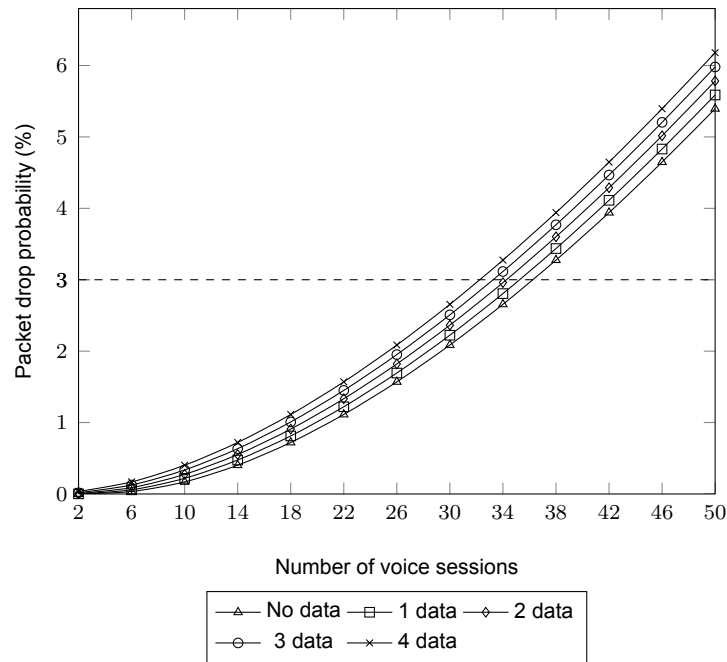


Figure 3.3: Πιθανότητα απόρριψης πακέτου προς τον αριθμό των συνεδριών φωνής

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η πιθανότητα αππόριψης πακέτου ως προς τον αριθμό των τηλεφωνικών συνεδριών. Υπο εξέταση είναι τα σενάρια χωρίς μετάδοση δεδομένων καθώς και με 1, 2, 3 ή 4 ταυτόχρονες ροές δεδομένων. Είναι εμφανές ότι για όλα τα σενάρια η χωρητικότητα φωνής περιορίζεται στο διάστημα μεταξύ 32 και 36 συνεδριών. Εφόσον το μοντέλο υποθέτει ιδανικές συνθήκες καναλιού και δικτύου, η πιθανότητα απόρριψης εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των σταθμών στο δίκτυο και όχι από την κωδικοποίηση φωνής που χρησιμοποιείται.

Ο πίνακας 3.2 συγκεντρώνει τις υπολογισμένες τιμές χωρητικότητας για τα τρία διαφορετικά μέτρα ποιότητας που υιοθετήθηκαν στο υποκεφάλαιο 1.1. Για κάθε σενάριο που εξετάζεται, η μέση καθυστέρηση φωνής είναι το πρώτο μέτρο ποιότητας που εκφυλίζεται και ως εκ τούτου είναι αυτό το οποίο καθορίζει την συνολική χωρητικότητα φωνής του δικτύου. Άλλες μελέτες χωρητικότητας στην βιβλιογραφία, λαμβάνοντας υπ'οψιν μόνο μετάδοση φωνής ([Amanatiadis et al., 2007], [Cai et al., 2006], [Garg and Kappes, 2004] και [Hole and Tobagi, 2004]), παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα. Έτσι, αποδικνύεται ότι η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της χωρητικότητας είναι έγκυρη και παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τα σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζουν τη μέση καθυστέρηση και μέση απόκλιση καθυστέρησης φωνής αντίστοιχα, ως προς τον αριθμό των συνεδριών G.729 τηλεφωνίας. Εξετάζονται τα ίδια σενάρια μετάδοσης με παραπάνω. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις μετρήσεις χωρητικότητας. Τα σχήματα παρουσιάζουν και πάλι μια γραμμική μείωση της χωρητικότητας όσο περισσότερες ροές δεδομένων μεταδίδονται στο δίκτυο. Για κάθε ροή δεδομένων, η χωρητικότητα του δικτύου σε τηλεφωνικές συνεδρίες μειώνεται κατά 2 συνεδρίες. Για το σενάριο της αποκλιστικής μετάδοσης φωνής

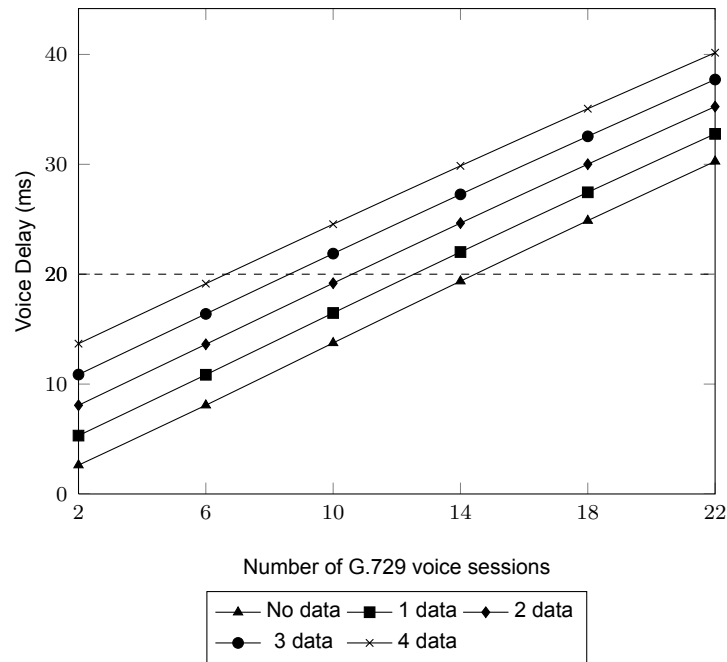


Figure 3.4: Καθυστέρηση φωνής G.729 προς το πλήθος συνεδριών

υπολογίζεται χωρητικότητα 14 G.729 συνεδριών, ένα αποτέλεσμα που συμφωνεί με τα αποτελέσματα των [Amanatiadis et al., 2007], [Cai et al., 2006], [Garg and Kappes, 2003] και [Hole and Tobagi, 2004].

Τα σχήματα 3.6 και 3.6 παρουσιάζουν τη μέση καθυστέρηση και μέση απόκλιση καθυστέρησης φωνής αντίστοιχα, ως προς τον αριθμό των συνεδριών G.723.1 τηλεφωνίας. Εξετάζονται τα ίδια σενάρια μετάδοσης με παραπάνω. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, για κάθε ροή δεδομένων που προστίθεται στο δίκτυο, η χωρητικότητα του δικτύου μειώνεται κατά 2 συνεδρίες φωνής. Χωρίς παράλληλη μετάδοση δεδομένων, υπολογίζουμε μια χωρητικότητα 21 G.723.1 συνεδριών, ένα νούμερο που συμφωνεί με τα αποτελέσματα των [Amanatiadis et al., 2007], [Cai et al., 2006], [Garg and Kappes, 2003] και [Hole and Tobagi, 2004].

Our results suggest that adding data traffic slowly reduces WLAN voice capacity. Voice capacity reduction is essentially independent of the voice codec utilized for voice traffic. In particular, for every data stream (a data station and a TCP-ACK station) added, the network's capacity is reduced by two voice sessions (four voice stations) only. This is not as it may be expected because adding one data session (consisting of a data station transmitting large data packets of 8184 bits and a TCP-ACK station transmitting ACK packets of 416 bits) results in the removal of four voice stations transmitting voice packets of 1600, 480 and 512 bits for G.711, G.729 and G.723.1 codecs respectively. This is explained by the large overheads of voice packets. For example, a G.729 packet consists of 20 bytes of voice payload, 40 bytes of IP/UDP/RTP headers and 24 bytes of MAC headers transmitted at 11Mbps plus a PHY header of 24 bytes transmitted at 1Mbps. For every voice packet a MAC-ACK packet of 38 bytes is also required. The total overhead is 126 bytes, with parts

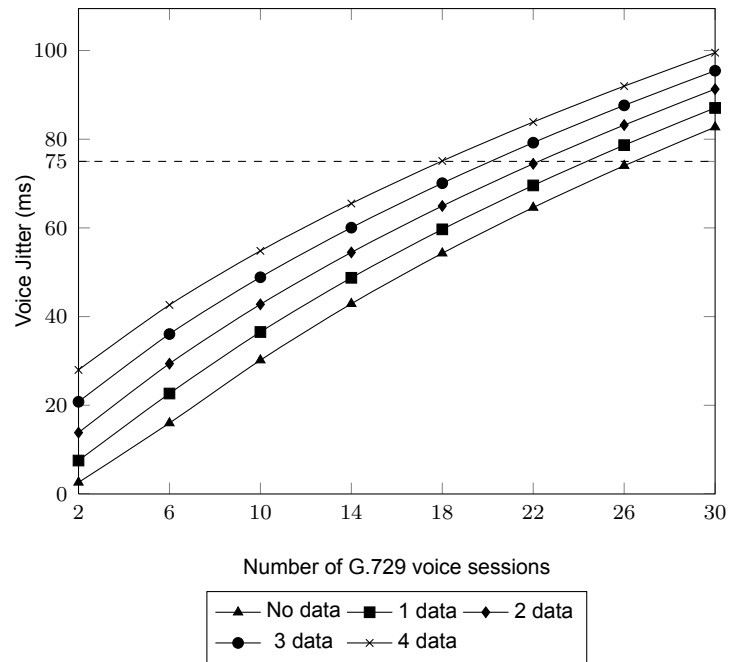


Figure 3.5: Απόκλιση καθυστέρησης φωνής G.729 προς το πλήθος των συνεδριών transmitted at low bit rates, for an effective voice payload of 20 bytes.

The fact that adding large data packets results in the removal of few small voice packets is also due to the usage of the RTS/CTS scheme by the data traffic. As a result, data traffic collides with the small RTS packet. The largest packet that possibly takes part in a collision is the voice packet. Thus, data packets significantly affect traffic only when they are transmitted successfully. When collisions occur, voice packet size most commonly dictates the delay introduced.

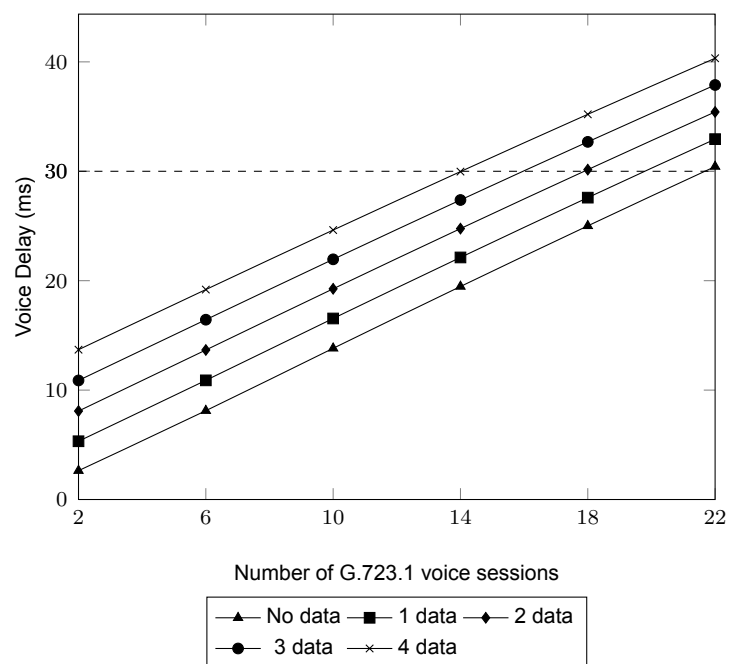


Figure 3.6: Καθυστέρηση φωνής G.723.1 προς το πλήθος των συνεδριών

Table 3.2: Όρια χωρητικότητας λόγο περιορισμού από διαφορετικά μέτρα ποιότητας

Σενάριο	όριο		
	λόγο καθυστέρησης	λόγο jitter	λόγο αππόριψης
G.711			
Μόνο Φωνή	12	21	36
1 Data	10	19	35
2 Data	8	17	34
3 Data	7	16	33
4 Data	5	13	32
G.729			
Μόνο Φωνή	14	26	36
1 Data	12	24	35
2 Data	10	22	34
3 Data	8	20	33
4 Data	6	17	32
G.723.1			
Μόνο Φωνή	21	26	36
1 Data	19	24	35
2 Data	17	22	34
3 Data	15	19	33
4 Data	14	17	32

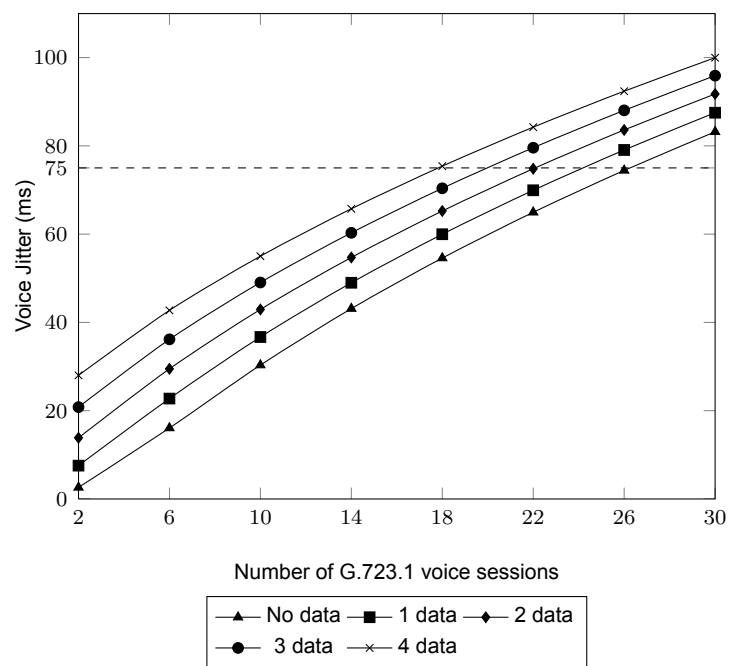


Figure 3.7: Απόκλιση καθυστέρησης φωνής G.723.1 προς το πλήθος των συνεδριών

Βιβλιογραφία

- [802.11, 2007] 802.11, □ (2007). IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2007 (Revision of IEEE Std 802.11-1999)*, pages C1–1184.
- [Amanatiadis et al., 2007] Amanatiadis, D., Vitsas, V., Manitsaris, A., Mavridis, I., Chatzimisios, P., and Boucouvalas, A. C. (2007). Voice capacity analysis of IEEE 802.11 Wireless LANs supporting VoIP. *Mediterranean Journal of Computers and Networks*, 3(4):132–141.
- [Bianchi, 2000] Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):535–547.
- [Cai et al., 2006] Cai, L., Shen, X., Mark, J., Cai, L., and Xiao, Y. (2006). Voice capacity analysis of WLAN with unbalanced traffic. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 55(3):752–761.
- [Caputo, 2000] Caputo, R. (2000). *CISCO Packetized Voice and Data Integration*. McGraw-Hill.
- [Eiger et al., 2005] Eiger, M., Elaoud, M., and Famolari, D. (2005). The effect of packetization on voice capacity in IEEE 802.11b networks. In *Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2005)*, pages 267–271.
- [Garg and Kappes, 2003] Garg, S. and Kappes, M. (2003). Can I add a VoIP call? In *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2003)*, volume 2, pages 779–783.

- [Hole and Tobagi, 2004] Hole, D. and Tobagi, F. (2004). Capacity of an IEEE 802.11b wireless LAN supporting VoIP. In *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2004)*, volume 1, pages 196–201.
- [Raptis et al.,] Raptis, P., Vitsas, V., and Paparrizos, K. Packet Delay Metrics for IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *Mobile Networks and Applications*.
- [Stein et al., 2009] Stein, W. et al. (2009). *Sage Mathematics Software (Version 3.4)*. The Sage Development Team. <http://www.sagemath.org>.
- [Wu et al., 2002] Wu, H., Peng, Y., Long, K., Cheng, S., and Ma, J. (2002). Performance of Reliable Transport Protocol over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and Enhancement. In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, volume 2, pages 599–607.