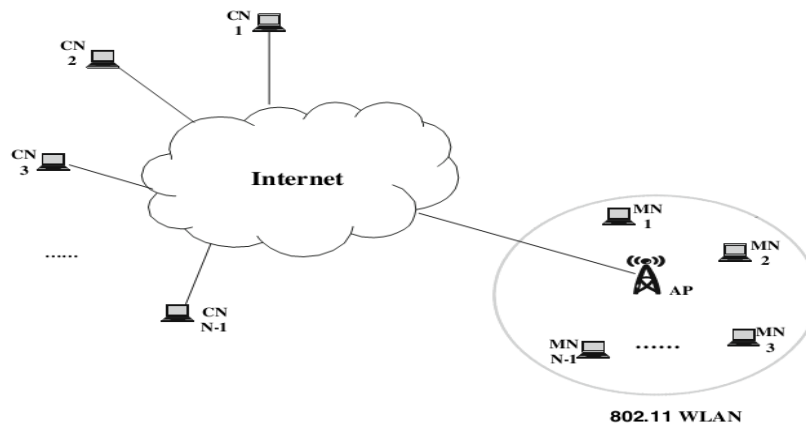




## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη εκπομπής φωνής, video σε ασύρματα τοπικά δίκτυα με  
χρήση μαθηματικών μοντέλων.



Φοιτήτρια  
ΣΠΥΡΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ  
ΑΜ:03/2439

Επιβλέπων Καθηγητής  
Ράπτης Πασχάλης

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	2
Κατάλογος Εικόνων .....	4
1. Εισαγωγή.....	6
2. Τα ασύρματα δίκτυα .....	8
2.1. Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 .....	10
2.1.1. 802.11b .....	14
2.1.2. 802.11g .....	16
2.2. 802.11n.....	18
3. Δικτυακές Εκπομπές φωνής και video .....	24
3.1. Απαιτήσεις δικτυακής εκπομπής εφαρμογών φωνής και video	24
3.1.1. Καθυστέρηση .....	28
Παράμετροι μοντελοποίησης .....	36
3.2. Πρωτόκολλα συμπίεσης/μετάδοσης για εφαρμογές δικτυακής εκπομπής φωνής .....	38
3.2.1. G711 .....	38
3.2.2. Το πρότυπο G.722 .....	39
3.2.3. Το πρότυπο G.723 .....	40
3.2.4. Το πρότυπο G.726 .....	41

3.2.5.	Το πρότυπο G.728 .....	42
3.2.6.	G729 .....	43
3.2.7.	MPEG-1 Audio Layer 3 III .....	44
3.3.	Πρωτόκολλα συμπίεσης/μετάδοσης για εφαρμογές δικτυακής εκπομπής video.....	47
3.3.1.	H263 .....	47
3.3.2.	H.264 .....	49
4.	Μαθηματική Μοντελοποίηση ασύρματων δικτύων .....	51
	Μοντελοποίηση ασύρματου δικτύου.....	56
	Αποτελέσματα του μοντέλου (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009) σε VoIP και Video conference .....	63
5.	Συμπεράσματα .....	72
6.	Βιβλιογραφία .....	74

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Τοπολογία ασύρματου δικτύου με χρήση Ασύρματου σημείου πρόσβασης .....	9
Εικόνα 2: Τοπολογία ασύρματου δικτύου με συνδέσεις ad-hoc ..	9
Εικόνα 3: Διαστρωμάτωση του IEEE802.11 στο OSI.....	12
Εικόνα 4: Ο διαχωρισμός των καναλιών στο πρότυπο 802.11b.	15
Εικόνα 5: Συνάθροιση κατά MSDU στο IEEE 802.11n .....	20
Εικόνα 6: Η κωδικοποίηση MP3 .....	45
Εικόνα 7: Η εξέλιξη των κωδικοποιητών video .....	48
Εικόνα 8: Αλυσίδα Markov για την μοντελοποίηση του εσωτερικού timcounter σύμφωνα με την (Bianchi, March 2000) .	55
Εικόνα 9: Μοντελοποίηση ασύρματου δικτύου .....	56
Εικόνα 10: Κορεσμός καναλιού για G729 codec ως προς τον αριθμό συνδέσεων για διάφορα aggregation σχήματα του 802.11n (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009) .....	63
Εικόνα 11: Η απόδοση του 802.11g.....	65
Εικόνα 12: Απόδοση του IEEE 802.11g σε μετάδοση video (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009).....	67
Εικόνα 13 Αριθμός συνδέσεων για H264 codec ως προς τον MTU για διάφορα aggregation σχήματα του 802.11n (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009).....	68

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ράπτη για το πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου ανέθεσε να αναλύσω και να γράψω αυτήν την πτυχιακή και όλους όσους με βοήθησαν να την τελειώσω.

## 1. Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, τα ασύρματα τοπικά δίκτυο (WLAN) που βασίζονται στην τεχνολογία του προτύπου IEEE 802.11 έχουν αναπτυχθεί ταχύτατα και είναι πλέον ευρύτατα διαδεδομένα, όπως στην ασύρματη πρόσβαση στο Internet από το γραφείο, το σπίτι αλλά και δημόσια ανοιχτά δίκτυα. Από την άλλη πλευρά, οι απαιτήσεις των εφαρμογών πολυμέσων, όπως το Voice over IP (VoIP) και η μετάδοση του βίντεο έχουν διαδοθεί σημαντικά και παρουσιάζουν ιδιαίτερες απαιτήσεις. Για παράδειγμα, η VoIP εφαρμογή απαιτεί σταθερό και μικρό χρόνο καθυστέρησης, ενώ ένα ψηφιακό βίντεο σε ποιότητα επιπέδου DVD μορφή απαιτεί ένα bitrate που ανέρχεται στα 9.8 Mbps. Αν το βίντεο εμπλουτιστεί με δυνατότητες ποιότητας HDTV θα χρειαστεί 20 Mbps ρυθμό bit.

Στην εργασία αυτή θα μελετήσουμε τις επιπτώσεις που έχει η εισαγωγή της νέας τεχνολογίας ασύρματων δικτύων IEEE802.11n σε εφαρμογές μετάδοσης φωνής και βίντεο, με χρήση μαθηματικών μοντέλων. Έπειτα από μια σύντομη εισαγωγή στο πρότυπο IEEE802.11, παρουσιάζεται αναλυτικότερα η τελευταία του έκδοση IEEE802.11n. Στη συνέχεια αναλύονται οι παράμετροι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά τη μετάδοση ήχου και βίντεο

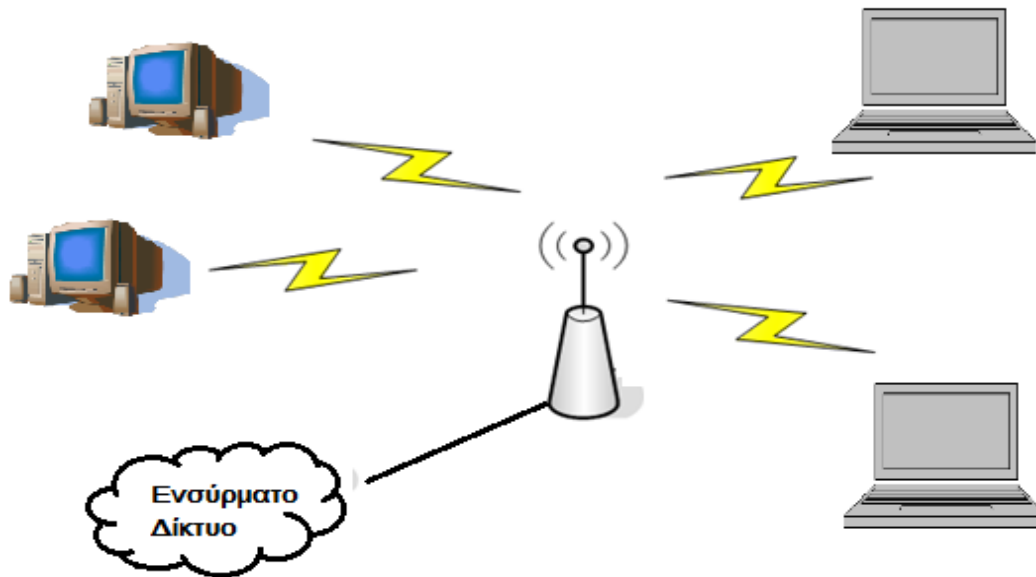
και τα σημαντικότερα πρωτόκολλα που αξιοποιούν οι συγκεκριμένες υπηρεσίες. Έπειτα παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην διεθνή βιβλιογραφία για την προσομοίωση των ασύρματων δικτύων και ή εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματά.

## 2. Τα ασύρματα δίκτυα

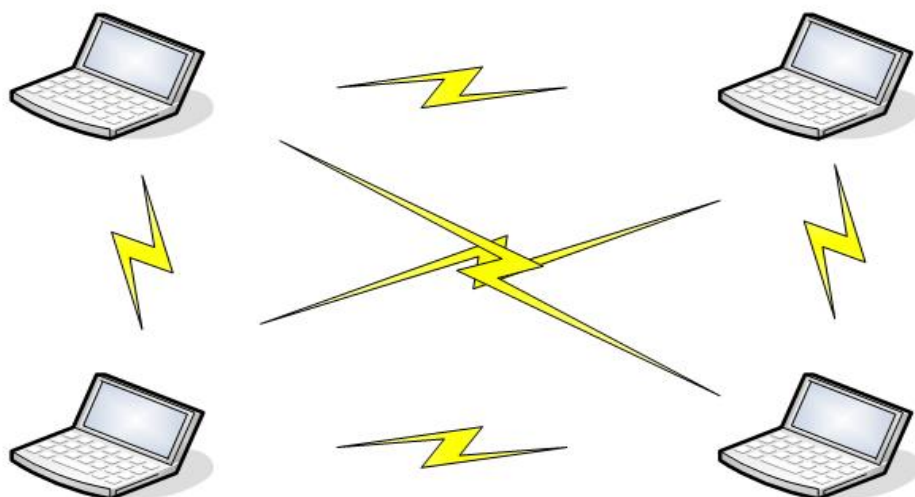
Τα ασύρματα δίκτυα έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο που αντιλαμβάνεται το ευρύ κοινό το δίκτυο στις μέρες μας. Η ασύρματη μετάδοση δεδομένων απελευθερώνει τους χρήστες από τα «δεσμά» των καλωδίων και τους παρέχει τη δυνατότητα να συνδέονται από κάθε απλό υπολογιστή σε ένα δίκτυο με χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο δυτικό κόσμο στις ημέρες μας, θεωρούνται ξεπερασμένες οι εγκαταστάσεις συνάθροισης κοινού (όπως ξενοδοχεία, εστιατόρια, καφέ) που δεν διαθέτουν στους πελάτες τους ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Η ασύρματη πρόσβαση όμως, είναι αποτέλεσμα μιας διαρκούς και επίπονης διαδικασίας που πραγματοποιείται στην IEEE τα τελευταία χρόνια, με συμμετοχές ερευνητών και επιστημόνων από όλον τον κόσμο, για την σύνταξη, την προτυποποίηση και την καθιέρωση των πρωτοκόλλων ασύρματης μετάδοσης, την οικογένεια IEEE 802.11. Η συγκεκριμένη οικογένεια πρωτοκόλλων υποστηρίζει ασύρματη μετάδοση με χρήση είτε ασύρματου σημείου πρόσβασης (Εικόνα 1), είτε ad-hoc (Εικόνα 2).





Εικόνα 1: Τοπολογία ασύρματου δικτύου με χρήση Ασύρματου σημείου πρόσβασης



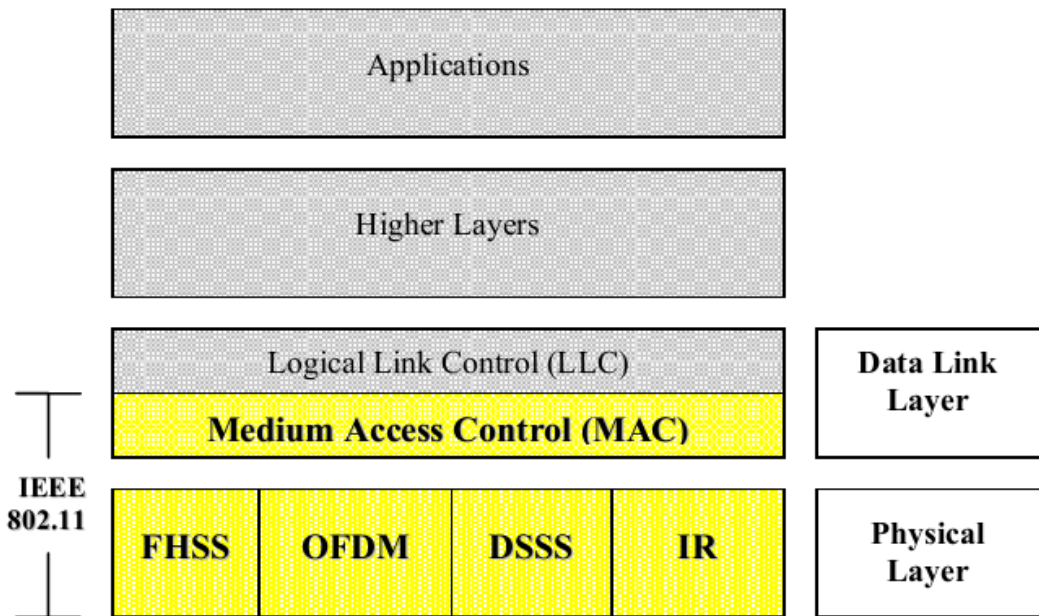
Εικόνα 2: Τοπολογία ασύρματου δικτύου με συνδέσεις ad-hoc

## **2.1.Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11**

Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 αποτελεί ένα σύνολο προτύπων για την υλοποίηση ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Networks - WLAN), και την επικοινωνία των υπολογιστών στις συχνότητες 2.4 GHz, 3.6 GHz και 5 GHz. Κάποια ή όλα από τα προαναφερθέντα φάσματα συχνοτήτων αποτελούν στις περισσότερες χώρες του κόσμου φάσματα ελεύθερα: Δεν καταλαμβάνονται από καμία εφαρμογή και διατίθενται ελεύθερα από τις αρμόδιες εποπτικές αρχές για «πειραματισμό από ραδιοερασιτέχνες» και για εφαρμογές μικρής κλίμακας.

Η οικογένεια των προτύπων έχει δημιουργηθεί και συντηρείται από την ομάδα του αμερικάνικου ινστιτούτου ηλεκτρολόγων & ηλεκτρονικών μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) για τα πρότυπα των τοπικών και μητροπολιτικών δικτύων (IEEE 802). Τα πρότυπα αυτά παρέχουν τη βάση για τα ασύρματα εμπορικά προϊόντα, καθώς καθορίζουν πλήρως όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για μια σωστή δικτυακή επικοινωνία.

Η οικογένεια των προτύπων 802.11 αποτελείται από μια σειρά τεχνικών διαμόρφωσης για ασύρματη μετάδοση που αξιοποιούν το ίδιο βασικό πρωτόκολλο. Τα πιο δημοφιλή πρότυπα στις μέρες μας αποτελούν τα πρωτόκολλα 802.11b και 802.11g, τα οποία είναι τροποποιήσεις στο αρχικό πρότυπο. Παρόλο που το πρότυπο 802.11 - 1997 ήταν το πρώτο πρότυπο ασύρματης δικτύωσης, το πρότυπο 802.11b ήταν το πρώτο που έγινε ευρέως αποδεκτό, ακολουθούμενο από τα 802.11g και 802.11n. Το 802.11n διαθέτει μια νέα τεχνική διαμόρφωσης. Η οικογένεια είναι εξοπλισμένη με επιπλέον πρότυπα, τα οποία αφορούν άλλες, περισσότερο εξειδικευμένες εφαρμογές.



**Εικόνα 3: Διαστρωμάτωση του IEEE802.11 στο OSI**

Ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων των ασύρματων τοπικών δικτύων αξιοποιεί όλες τις αρχές των πρωτοκόλλων τα οποία έχουν δημιουργηθεί κατά το παρελθόν για παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα στο πολύ γνωστό σύστημα διαστρωμάτωσης OSI και εστιάζεται στην ανάπτυξη και την προτυποποίηση μόνο λίγων στρωμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, το πρωτόκολλο IEEE 802.11 χρειάζεται να καθορίσει μόνο το φυσικό επίπεδο (Physical Layer – PHY) καθώς

και το υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control - MAC) το οποίο ανήκει στο ευρύτερο επίπεδο του στρώματος ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer - DLL). Στο επίπεδο αυτό υπάρχει επιπλέον και το υποεπίπεδο ελέγχου λογικής ζεύξης (Logical Link Control - LLC). Η προτυποποίησή του όμως, πραγματοποιείται στο πρότυπο IEEE802.2 και χρησιμοποιείται για να προσαρμόσει ομοιόμορφα και με ενιαίο τρόπο όλα τα διαφορετικά επίπεδα MAC που ορίζονται σε διάφορα πρωτόκολλα, με τα υψηλότερα στρώματα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι απαραίτητη για να λειτουργούν απρόσκοπτα όλες οι εφαρμογές των υψηλότερων επιπέδων, ανεξάρτητα από την προσέγγιση που ακολουθείται στα χαμηλότερα επίπεδα. Η Εικόνα 3 απεικονίζει την διαστρωμάτωση του πρωτοκόλλου IEEE802.11.

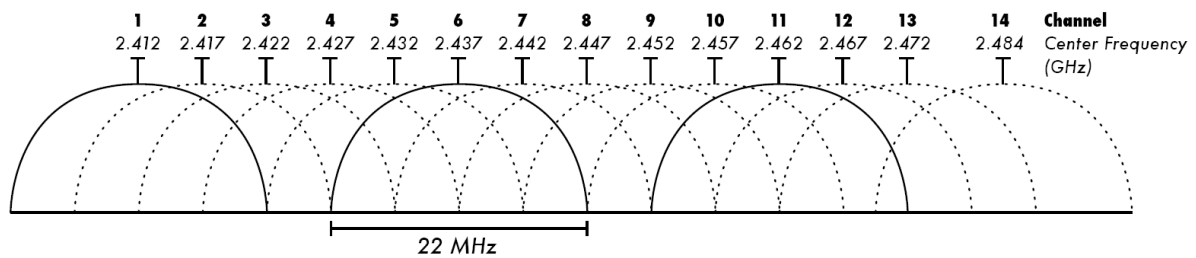
Στη συνέχεια θα εστιάσουμε την μελέτη μας στα πρότυπα 802.11b, 802.11g και 802.11n, καθώς αποτελούν τα πρότυπα που έχουν υιοθετηθεί από το σύνολο σχεδόν των εμπορικών συσκευών και εφαρμογών.

### 2.1.1. 802.11b

Το πρότυπο 802.11b έχει ένα μέγιστο θεωρητικό ρυθμό μετάδοσης περίπου 11 Mbps και αξιοποιεί την ίδια μέθοδο πρόσβασης στο φυσικό επίπεδο με αυτή την οποία ορίζεται στο αρχικό πρότυπο. Τα εμπορικά προϊόντα που είναι σύμφωνα 802.11b εμφανίστηκαν στην αγορά στις αρχές του 2000. Η δραματική αύξηση στην απόδοση του 802.11b (σε σύγκριση με το αρχικό πρότυπο), με παράλληλη σημαντική μείωση των τιμών οδήγησε στην ταχεία αποδοχή του 802.11b ως εξορισμού τεχνολογία για την ασύρματη δικτύωση.

Το πρότυπο 802.11b χωρίζει την μπάντα των 2.4 GHz σε 14 διαφορετικά κανάλια των 22 MHz το καθένα ώστε να είναι εφικτή η συνύπαρξη διαφορετικών δικτύων στον ίδιο χώρο. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου διαχωρισμού φαίνεται στον τρόπο με τον οποίο αυτός έχει προτυποποιηθεί (Εικόνα 4): Τα κανάλια έχουν μεγάλο ποσοστό επικάλυψης, με αποτέλεσμα να είναι δυσχεραίνει σε μεγάλο βαθμό τη συνύπαρξη δύο γειτονικών καναλιών στον ίδιο χώρο. Παρατηρώντας το διαχωρισμό του συγκεκριμένου φάσματος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για απροβλημάτιστη συνύπαρξη

δικτύων στον ίδιο χώρο πρέπει απέχουν τουλάχιστον 3-4 κανάλια μεταξύ τους.



**Εικόνα 4: Ο διαχωρισμός των καναλιών στο πρότυπο 802.11b**

Ένα ακόμη μεγάλο πρόβλημα στις συσκευές συμβατές με το πρότυπο 802.11b αποτελούν οι παρεμβολές που δέχονται από άλλα προϊόντα που λειτουργούν στη ίδια ζώνη συχνοτήτων (2.4 GHz), όπως φούρνοι μικροκυμάτων, συσκευές Bluetooth, συσκευές παρακολούθησης μωρού και ασύρματα τηλέφωνα. Καθώς η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων είναι μια από τις ελάχιστες που έχει αποδοθεί για ελεύθερη χρήση από την πολιτεία, αποτελεί σχεδόν βέβαιο ενδεχόμενο ότι σε ένα χώρο στον οποίο λειτουργεί ασύρματο δίκτυο, θα υπάρχει τουλάχιστον μια συσκευή που θα παρεμβάλλει στην λειτουργία του.

### 2.1.2. 802.11g

Το τρίτο πρότυπο της οικογένειας που έχει προταθεί είναι το πρότυπο 802.11g. Αυτό λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz (όπως 802.11b), αλλά χρησιμοποιεί την διαμόρφωση OFDM με βάση το σύστημα μετάδοσης, όπως και η εκδοχή του προτύπου 802.11a. Ο θεωρητικός μέγιστος ρυθμός μετάδοσης αγγίζει τα 54 Mbps αν εξαιρέσουμε τους κώδικες διόρθωσης λαθών, ή ρυθμοαπόδοση η οποία ανέρχεται περίπου στα 22 Mbps (Friendly, 2007). Το υλικό που είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με τις επιταγές του προτύπου 802.11g είναι πλήρως συμβατό με το υλικό που έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με τα πρότυπα 802.11b.

Όπως και με το πρότυπο 802.11b, οι συσκευές συμβατές με το πρότυπο 802.11g υποφέρουν από παρεμβολές που προέρχονται από άλλα προϊόντα που λειτουργούν στη ζώνη των 2.4 GHz. Επιπλέον, εξακολουθεί να ισχύει ο ίδιος διαχωρισμός του φάσματος σε κανάλια με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η απροβλημάτιστη συνύπαρξη δικτύων που απέχουν τουλάχιστον 3-4 κανάλια μεταξύ τους.



Η ραγδαία αύξηση του θεωρητικού throughput στο πρότυπο 802.11g έδωσε την ευκαιρία και τη δυνατότητα να εκτελούνται ορισμένες εφαρμογές πραγματικού χρόνου με μικρές ανάγκες σε throughput πάνω σε ασύρματα δίκτυα. Μεγάλο και σημαντικό ερευνητικό έργο έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σε σχέση με τις δυνατότητες διάφορων εφαρμογών σε ασύρματα τοπικά δίκτυα σύμφωνα με τα πρότυπα 802.11, όπως οι εργασίες (Bianchi, March 2000) (Brouzioutis, Vitsas, & Chatzimisios, 2010) και (Wu, Peng, Long, & Cheng, 2001 ).

## 2.2.802.11n

Το πρότυπο IEEE 802.11n αποτελεί τροποποίηση του βασικού προτύπου ασύρματης δικτύωσης της IEEE 802.11 – 2007 με απώτερο στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου συγκριτικά με τα πρότυπα 802.11a και 802.11g, με σημαντική αύξηση του ανώτατου ρυθμού μετάδοσης στα 600 Mbps με τη χρήση τεσσάρων τμημάτων σε ένα εύρος καναλιού των 40 MHz (IEEE-SA., 29 October 2009). Μερικές από τις καινοτομίες του προτύπου 802.11n αποτελούν η υποστήριξη ΠΕΠΕ (πολλών εισόδων και πολλών εξόδων), η χρήση μεθοδολογιών συνάθροισης των πακέτων μετάδοσης, καθώς και σημαντικές βελτιώσεις στην ασφάλεια.

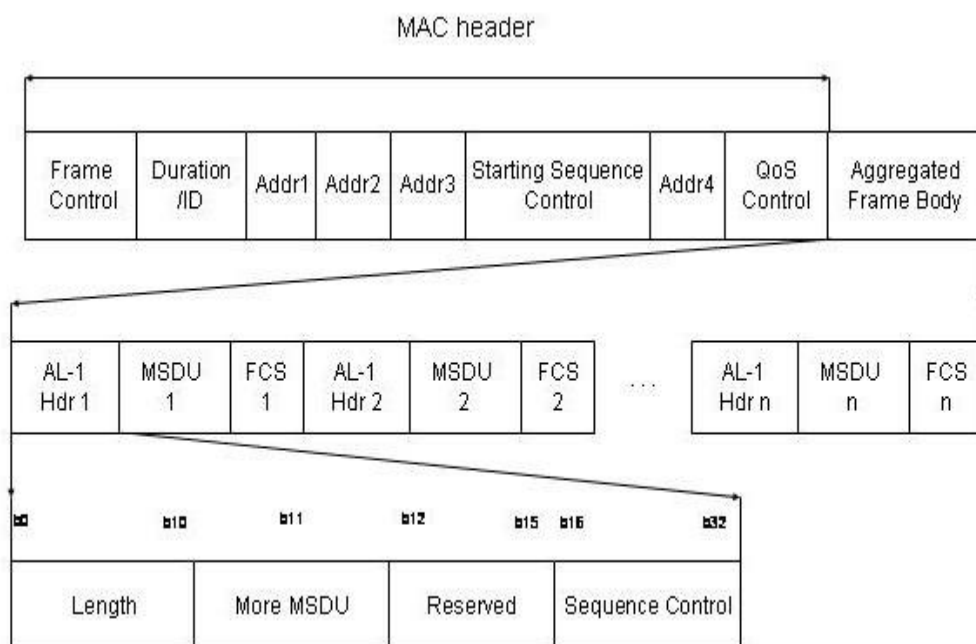
Η τεχνολογία ΠΕΠΕ είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για την ακριβή μετάδοση περισσότερης πληροφορίας συγκριτικά με τη μετάδοση που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μόνο μία κεραία. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με χρήση πολυπλεκτών Spacial Division (SDM). Οι πολυπλέκτες SDM πολυπλέκουν χωρικά πολλαπλές ανεξάρτητες ροές δεδομένων, οι οποίες μεταφέρονται ταυτόχρονα μέσα από κοινό κανάλι και μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το throughput, καθώς ο αριθμός των ανεξάρτητων ροών δεδομένων αυξάνεται. Κάθε χωρική

ροή απαιτεί διαφορετική κεραία τόσο όσον αφορά τον πομπό όσο και τον δέκτη. Τα κανάλια, τα οποία λειτουργούν σε εύρος 40 MHz, είναι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που έχει ενσωματωθεί στο πρότυπο 802.11n, καθώς διπλασιάζεται από τα 20 MHz που χρησιμοποιούσαν τα προγενέστερα πρότυπα της οικογένειας 802.11 στο φυσικό επίπεδο (IEEE-SA., 29 October 2009).

Αν και το 802.11n έχει εισάγει σημαντικές βελτιώσεις στο φυσικό επίπεδο μετάδοσης, το ποσοστό αύξησης της ρυθμοαπόδοσης δεν μπορεί να αυξηθεί δραματικά, λόγω των επιπρόσθετων δεδομένων του πρωτοκόλλου 802.11 (όπως η διαδικασία διεκδίκησης, η απόσταση interframe και τα πλαίσια αναγνώρισης). Το κύριο χαρακτηριστικό που παρέχει σημαντική βελτίωση στη ρυθμοαπόδοση βρίσκεται στο δεύτερο επίπεδο (MAC) και είναι η συνάθροιση των πλαισίων (frame aggregation). Ορίζονται δύο τύποι συνάθροισης, σε επίπεδο υπηρεσίας (MAC Service Data Units – MSDU) και σε επίπεδο πρωτοκόλλου (MAC Protocol Data Units – MPDU)

Η συνάθροιση πλαισίων είναι μια διαδικασία κατά την οποία πολλαπλά MSDUs ή MPDUs ομαδοποιούνται μαζί (συναθροίζονται) και αποστέλλονται μαζί για τη μείωση των επιπρόσθετων δεδομένων

του 802.11, αυξάνοντας έτσι το συνολικό throughput. Μια συνάθροιση – MPDU απαιτεί τη χρήση ενός Μπλοκ Αναγνώρισης (BlockAck), το οποίο έχει εισαχθεί στο 802.11e και έχει βελτιστοποιηθεί στο 802.11n.



**Εικόνα 5: Συνάθροιση κατά MSDU στο IEEE 802.11n**

Πιο συγκεκριμένα, η συνάθροιση κατά MSDU βασίζεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα ασύρματα σημεία πρόσβασης και η πληθώρα των συσκευών χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Ethernet σαν

μορφή πλαισίου. Έτσι, συλλέγονται πολλαπλά πλαίσια Ethernet τα οποία πρέπει να διαβιβαστούν στον ίδιο προορισμό και ομαδοποιούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο 802.11n. Αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό, καθώς οι headers του πρωτοκόλλου Ethernet είναι πολύ μικρότερη από τους αντίστοιχους του 802.11 (Paper, 2011).

Στην MPDU συνάθροιση συλλέγονται επίσης πλαίσια του πρωτοκόλλου Ethernet τα οποία πρέπει να διαβιβαστούν σε έναν προορισμό, αλλά η κεφαλίδα από το επίπεδο MAC 802.11n προστίθεται σε κάθε ένα πακέτο ξεχωριστά. Υπό ιδανικές συνθήκες, η συγκεκριμένη συνάθροιση είναι λιγότερο αποτελεσματική συγκριτικά με την MSDU συνάθροιση, αλλά σε εξαιρετικά ενθόρυβα περιβάλλοντα μπορεί να αποδεχτεί ότι είναι περισσότερο αποτελεσματική. Αυτό οφείλεται στον μηχανισμό αναγνώρισης μπλοκ, ο οποίος επιτρέπει σε κάθε ένα από τα συναθροισμένα πλαίσια να επαληθευτεί ξεχωριστά από τα υπόλοιπα και να αναμεταδοθούν μόνο εκείνα που έχουν μεταδοθεί εσφαλμένα (Paper, 2011).

Από τις παραπάνω περιγραφές των προτύπων 802.11g και 802.11n διαπιστώνουμε τις σημαντικές καινοτομίες που εισάγονται στο πρότυπο 802.11n. Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως το Voice over IP (VoIP) και multimedia streaming, μπορούν να εκμεταλλευτούν τις νέες δυνατότητες της ασύρματης δικτύωσης. Παράλληλα όμως, τεχνικές όπως το frame aggregation αναμένεται να προκαλέσουν μικρή αύξηση του μέσου χρόνου καθυστέρησης μετάδοσης των πακέτων. Για τον λόγο αυτό τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για τα προηγούμενα πρωτόκολλα πρέπει να ανανεωθούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά του προτύπου.

Στον ακόλουθο Πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου 802.11 όπως αυτά δίνονται από την ITU.

Πρωτόκολλο	Συχνότητα Λειτουργίας	Μέθοδοι Μετάδοσης	Μέγιστη Ταχύτητα
802.11	2.4 GHz	IR/FSSS/DSSS	2 Mbps
802.11a	2.4 GHz	OFDM	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	DSSS	11 Mbps
802.11g	2.4 GHz	OFDM /DSSS	54 Mbps
802.11n	2.4 GHz / 5 GHz	OFDM	248 Mbps

Πριν προχωρήσουμε στα μαθηματικά μοντέλα, θα αναφερθούμε στις εφαρμογές δικτυακής εκπομπής φωνής και video, καθώς και στις απαιτήσεις ποιότητας που απαιτούνται.

### **3. Δικτυακές Εκπομπές φωνής και video**

Η δικτυακή εκπομπή φωνής και κινούμενης εικόνας (video) αποτελεί μια νέα δικτυακή πραγματικότητα. Η αύξηση του αριθμού συνδέσεων και της χωρητικότητάς των, έχει καταστήσει εφικτή τη μετάδοση φωνής και video πάνω στο IP επίπεδο. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στις απαιτήσεις που έχουν οι εφαρμογές δικτυακής εκπομπής, καθώς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που έχουν υιοθετηθεί για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

#### **3.1.Απαιτήσεις δικτυακής εκπομπής εφαρμογών φωνής και video**

Οι απαιτήσεις των δικτυακών εκπομπών μετάδοσης φωνής και video μπορούν να συνοψιστούν σε μια «απλή» πρόταση: Η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη πρέπει να παρουσιάζει ελάχιστη καθυστέρηση, χωρίς διακυμάνσεις. Επιπρόσθετα, σε περιπτώσεις αμφίδρομης επικοινωνίας, θα πρέπει να μην αντιλαμβάνονται την φυσική απόσταση η οποία τους χωρίζει και να επικοινωνούν με τον ίδιο τρόπο και την ίδια φυσικότητα, όπως και στην πραγματική ζωή.



Καθώς η παραπάνω απαίτηση είναι εξαιρετικά ασαφής, αυτή θα πρέπει να ικανοποιηθεί χρησιμοποιώντας αντικειμενικές μετρικές καθώς και υποκειμενικές μετρικές, από την πλευρά του χρήστη. Οι αντικειμενικές μετρικές είναι οι ακόλουθες:

- Συνολική καθυστέρηση: Πρόκειται για τον χρόνο που μεσολαβεί από την λήψη των δεδομένων (ήχου ή video) μέχρι την στιγμή που τα δεδομένα αναπαράγονται στην πλευρά του δέκτη. Στην μονόδρομη επικοινωνία, η συγκεκριμένη παράμετρος είναι υποδεέστερης σημαντικότητας, αλλά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση της αμφίδρομης επικοινωνίας. Οι εμπειρικές μελέτες προτείνουν ότι καθυστέρηση δεν υπερβαίνει τα 150msec, αυτή δεν γίνεται αντιληπτή, ενώ όσο μεγαλώνει από την οριακή τιμή των 150msec, ο χρήστης αρχίζει να αντιλαμβάνεται την καθυστέρηση, υποβαθμίζοντας παράλληλα την δικτυακή επικοινωνία.
- Jitter: Το jitter είναι η ανεπιθύμητη απόκλιση από την πραγματική συχνότητα ενός υποθετικού περιοδικού σήματος στο χώρο της ηλεκτρονικής και των τηλεπικοινωνιών, σε σχέση με πηγή ρολοί αναφοράς. Στον τομέα των δικτύων ο

όρος jitter χρησιμοποιείται ως ένα μέτρο της μεταβλητότητας της καθυστέρησης των πακέτων μέσα στο δίκτυο, στην μονάδα του χρόνου. Ένα δίκτυο με σταθερή καθυστέρηση δεν παρουσιάζει απόκλιση (ή jitter). Το jitter των πακέτων εκφράζεται ως ο μέσος όρος της απόκλισης από τη μέση καθυστέρηση που παρουσιάζει το δίκτυο.

- Αριθμός χαμένων πακέτων: Πρόκειται για τον αριθμό πακέτων που αποτυγχάνουν να φθάσουν στον προορισμό τους, καθώς κάποιος από τους ενδιάμεσους δρομολογητές ενδέχεται να αποτύχει να παραδώσει κάποια πακέτα εάν τα δεδομένα τους είναι κατεστραμμένο ή όταν φτάνουν στις «ουρές δρομολόγησης» τις βρίσκουν ήδη γεμάτες.
- Σφάλματα μετάδοσης: Ορισμένες φορές τα πακέτα ενδέχεται να καταστραφούν λόγω σφαλμάτων στο επίπεδο bit εξαιτίας της ύπαρξης θορύβου ή παρεμβολών, ειδικά στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και στα πεπαλαιωμένα σύρματα χαλκού.

- **Ασύμμετρη παράδοση:** Κατά την δρομολόγηση των πακέτων μέσα σε ένα δίκτυο, υπάρχει η πιθανότητα διαφορετικά πακέτα προς τον ίδιο προορισμό μπορούν να δρομολογηθούν από διαφορετικές διαδρομές, με αποτέλεσμα το καθένα να παρουσιάζει διαφορετική καθυστέρηση. Το αποτέλεσμα είναι τα πακέτα να φθάνουν στον λήπτη μια διαφορετική σειρά από αυτή που στάλθηκαν. Το πρόβλημα αυτό απαιτεί τη χρήση ειδικών πρόσθετων πρωτοκόλλων τα οποία είναι υπεύθυνα για την αναδιοργάνωση των πακέτων στην ορθή σειρά τους όταν φτάσουν στον προορισμό τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την μετάδοση βίντεο και VoIP όπου η ποιότητα επηρεάζεται δραματικά τόσο από την διακύμανση στην καθυστέρηση και την έλλειψη ακολουθίας.

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε αναλυτικά τις πιο κρίσιμες παραμέτρους

### 3.1.1. Καθυστέρηση και Jitter

Η καθυστέρηση στα δίκτυα που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα στις μεταδόσεις πακέτων φωνής και βίντεο μέσω αυτών, καθώς υποβαθμίζει την ποιότητα της φωνής και της εικόνας που λαμβάνει ο δέκτης. Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τα επιτρεπτά επίπεδα καθυστέρησης, όπως αυτά καθορίζονται στις συστάσεις ITU.

0 - 150 msec	Αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές
150 - 400 msec	Αποδεκτή, εάν συνυπολογιστούν οι επιπτώσεις στην ποιότητα της φωνής και του χρόνου μετάδοσης λόγω της απόστασης.
> 400 msec	Μη αποδεκτή.

Η καθυστέρηση μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικά τμήματα: την καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay), η οποία οφείλεται στα χαρακτηριστικά του φυσικού μέσου διάδοσης, και την καθυστέρηση ενδιάμεσης επεξεργασίας (handling delay), η οποία αποδίδεται στην καθυστέρηση που εισάγουν διάφορες ενεργές

συσκευές που παραβάλλονται στη διαδρομή μεταξύ των δύο μερών της επικοινωνίας

Την καθυστέρηση επεξεργασίας, η οποία είναι δυνατό ως ένα σημαντικό βαθμό να ελεγχθεί, χωρίζεται σε τρεις επιμέρους υποκατηγορίες, ανάλογα με το σημείο του δικτύου όπου παρουσιάζεται:

(α) στην καθυστέρηση επεξεργασίας στην πλευρά του «πομπού»,

(β) την καθυστέρηση επεξεργασίας μέσα στο δίκτυο

(γ) την καθυστέρηση επεξεργασίας στην πλευρά του δέκτη

Όσον αφορά την καθυστέρηση επεξεργασίας στο πομπό, μπορούμε να τη διαχωρίσουμε σε δύο είδη, την καθυστέρηση του κωδικοποιητή και την καθυστέρηση που προκαλείται από την συνολική δικτυακή κίνηση του συστήματος, το οποίο εμφανίζεται ως μεγαλύτερος χρόνος αναμονής στην ουρά των πακέτων προς αποστολή.

Ο κωδικοποιητής στην πλευρά του πομπού εκτελεί διάφορες πράξεις, από τις οποίες οι ακόλουθες τρεις θεωρούνται οι

σημαντικότερες: η κωδικοποίηση της πληροφορίας της φωνής ή του βίντεο, η συμπίεση της πληροφορίας και η τοποθέτηση των δεδομένων που προέκυψαν σε πακέτα συγκεκριμένου μήκους. Συνολικά, ένας κωδικοποιητής φωνής είναι δυνατό να προκαλέσει καθυστέρηση της τάξεως των 35 msec (ανάλογα με το είδος του).

Για παράδειγμα στην κωδικοποίηση G.729 θεωρείται ότι αποτελεί τον πιο ισορροπημένο αλγόριθμο με βάση την σχέση ποιότητας – απόδοσης. Παράγει δύο δείγματα φωνής των 10 bytes το καθένα κάθε 20 msec, τα οποία οδηγούν στην δημιουργία ενός πακέτου δεδομένων. Συνεπώς, για κάθε πακέτο φωνής που θα αποσταλεί μέσω του δικτύου (ωφέλιμου μεγέθους 20 bytes), η καθυστέρηση θα είναι 20 msec. Στα δεδομένα του πακέτου στη συνέχεια τα υπόλοιπα επίπεδα (IP/UDP/RTP) προσθέτουν τις δικές τους κεφαλίδες (headers) ώστε να δημιουργηθεί το τελικό πακέτο. Αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι ο G729 απαιτεί άλλα 5 msec για look-ahead, μας δημιουργεί συνολικά καθυστέρηση 25 msec για κάθε πακέτο φωνής. Αυτή η καθυστέρηση είναι σταθερή και άρα εύκολο να προϋπολογιστεί.

Η καθυστέρηση που παρατηρούμε στο σημείο εκπομπής και προέρχεται από την συνολική δικτυακή κίνηση του υπολογιστή, μεταφράζεται σαν καθυστέρηση των πακέτων στην ουρά εξόδου (output Queuing Delay) του δρομολογητή, όπως για παράδειγμα στην ουρά εξόδου μιας σειριακής σύνδεσης. Αυτό το είδος καθυστέρησης είναι εξαιρετικά ευμετάβλητο και σχεδόν αδύνατο να προσδιοριστεί ή να προβλεφθεί, καθώς εξαρτάται από μια πληθώρα από παράγοντες, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται στατικά στοιχεία, όπως τεχνικά χαρακτηριστικά και η ταχύτητα του δικτύου, αλλά και δυναμικά τα οποία εξαρτώνται από την δικτυακή χρήση του κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Είναι καλό, γενικά, να διατηρείται σε επίπεδα κάτω των 10msec.

Η καθυστέρηση επεξεργασίας στην πλευρά του δέκτη περιλαμβάνει σχεδόν τα ίδια είδη καθυστέρησης με τον πομπό, εκτός από μια σημαντική διαφοροποίηση. Συνολικά, στο δέκτη παρατηρούμε τρία βασικά είδη καθυστέρησης: την καθυστέρηση λόγω του κωδικοποιητή (codec delay), την καθυστέρηση στην ουρά εισόδου του δρομολογητή (input Queuing Delay) και την καθυστέρηση λόγω του jitter buffer. Τα δύο πρώτα είδη έχουν πολλά κοινά με τις καθυστερήσεις που έχουν αναφερθεί στον πομπό, με μόνη διαφορά ότι στην πλευρά του πομπού αναφέρεται η

καθυστέρηση στην ουρά εξόδου ενώ στον δέκτη στην ουρά εισόδου. Επίσης, η καθυστέρηση του κωδικοποιητή στον δέκτη είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στον πομπό (ανάλογα των κωδικοποιητή η διάρκεια μπορεί να είναι και μικρότερη από το μισό). Οι ίδιες βασικές αρχές ισχύουν και στις δυο περιπτώσεις.

Το jitter αποτελεί ίσων ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα δίκτυα δεδομένων και ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου (θεωρητικού) χρόνου άφιξης ενός πακέτου στο σημείο προορισμού και του πραγματικού χρόνου άφιξης. Έτσι, αν το πομπός παράγει πακέτα φωνής κάθε 20 msec, τότε στον δέκτη, είναι σχεδόν βέβαιο ότι λόγω διαφόρων καθυστερήσεων παρατηρείται άφιξη πακέτων σε τυχαία χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα από 20 msec. Η διαφορά αυτή μεταξύ του τυχαίου διαστήματος και των 20msec αποτελεί το jitter. Η λύση που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος του jitter δίνεται με τη χρήση μιας μνήμης προσωρινής αποθήκευσης (holdback buffering) των πακέτων φωνής στην πλευρά του δέκτη, για χρονικό διάστημα ίσο με τη μέση χρονική καθυστέρηση που εμφανίζει το δίκτυο, έτσι ώστε ο δρομολογητής προορισμού να παράγει με σταθερό ρυθμό τα πακέτα φωνής στον τελικό χρήστη, «κρύβοντας» τη μεταβλητή αυτή καθυστέρηση. Στην ουσία, η διαδικασία αυτή αντικαθιστά τη



μεταβαλλόμενη καθυστέρηση με μία σταθερή, διατηρώντας το φυσικό χρονισμό της επικοινωνίας. Όταν χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη μεθοδολογία του holdback buffering είναι αναγκαίο να χαρακτηριστούν χρονικά τα πακέτων μεταξύ τους, για να εξασφαλισθεί η διατήρηση του χρονισμού στο δέκτη. Στην περίπτωση του VoIP, για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο RTP.

Όσον αφορά την καθυστέρηση επεξεργασίας μέσα στο δίκτυο, αυτή ορίζεται ως ο χρόνος ο οποίος μεσολαβεί από την αποστολή του πακέτου από το δρομολογητή εξόδου του πομπού, μέχρι τη λήψη του πακέτου από τον δρομολογητή εισόδου του δέκτη. Σε αυτό το είδος της καθυστέρησης παίζουν ρόλο τρεις παράγοντες:

- Η ταχύτητα διασύνδεσης του δικτύου στην πλευρά του πομπού (Serialization Up-link Delay).
- Η ταχύτητα διασύνδεσης του δικτύου στην πλευρά του δέκτη (Serialization Down-link Delay).
- Οι εσωτερικές καθυστερήσεις που εισάγονται από το δίκτυο κορμού (General network delay).

Είναι φανερό ότι οι συγκεκριμένες καθυστερήσεις, οι οποίες είναι εσωτερικές στο δίκτυο κορμού, δε είναι δυνατό να ελεγχθούν από τον απλό χρήστη. Είναι ευθύνη του παρόχου των υπηρεσιών, αν πρόκειται για δημόσιο δίκτυο, ή του διαχειριστή (administrator), αν πρόκειται για κάποιο μεγάλο ιδιωτικό δίκτυο. Πρόκειται για μεταβλητό είδος καθυστέρησης και δύσκολα μετρήσιμο. Φυσικά, υπάρχουν πολλοί τρόποι να ελεγχθεί αυτή η καθυστέρηση: εξαρτάται άμεσα από το είδος του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται για το δίκτυο κορμού (IP, ATM, κ.λπ.), καθώς και από τις ίδιες τις δυνατότητες των συσκευών. Είναι το σημείο όπου πρέπει να γίνει η πρόβλεψη ώστε το δίκτυο να μπορεί να εξυπηρετεί όλες τις ανάγκες κίνησης, τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά. Με άλλα λόγια, επιβάλλεται να υλοποιηθεί κάποια μελέτη.

Όσον αφορά όμως τους δύο πρώτους παράγοντες (ταχύτητες των γραμμών πρόσβασης), ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει άμεσα τις καθυστερήσεις αυτές, αφού η ταχύτητα πρόσβασης είναι επιλογή του ιδίου. Αυτό το είδος καθυστέρησης το ονομάζουμε *serialization delay* και δεν είναι τίποτε άλλο από το χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο για να εξυπηρετηθεί από ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης. Το *serialization delay* μπορεί να γίνει πηγή πολύ μεγάλων καθυστερήσεων, αλλά επειδή είναι σταθερό και

προβλέψιμο μπορούμε να το προϋπολογίσουμε. Η καθυστέρηση αυτή είναι συνάρτηση τόσο της ταχύτητας γραμμής όσο και του μεγέθους του πακέτου.

## Παράμετροι μοντελοποίησης

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε όλες εκείνες τις παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση: Αυτές θα είναι αντικειμενικές τιμές όπως ο χρόνος καθυστέρησης, η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) και η απώλεια πακέτων. Επίσης θα γίνει αναφορά σε υποκειμενικές τιμές όπως το Mean Opinion Score και γενικώς στο θέμα του Quality of Service.

- Mean Opinion Score (μέση βαθμολογική γνώμη - MOS): Πρόκειται για ένα τεστ που έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και δεκαετίες σε δίκτυα τηλεφωνίας για να καταγραφούν οι απόψεις των χρηστών για την ποιότητα του δικτύου. Ιστορικά, όπως αφήνει να εννοηθεί η λέξη «γνώμη» (opinion) στο αρκτικόλεξο, το MOS αποτελεί μια υποκειμενική μέτρηση, όπου ο χρήστης θα παρατηρήσει σε ένα «ήσυχο δωμάτιο» και θα βαθμολογήσει την ποιότητα της κλήσης, όπως την αντιλαμβάνονται ο ίδιος. Σύμφωνα με το ITU-T Recommendation P.800, «Ο ομιλητής θα πρέπει να είναι κάθετος σε ένα ήσυχο δωμάτιο με όγκο μεταξύ 30 και 120 m<sup>3</sup> όπου ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι μικρότερος από 500 ms (κατά προτίμηση στην περιοχή 200-300 ms). Ενώ το επίπεδο θορύβου δωμάτιο πρέπει να είναι κάτω από 30 dBA».

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις είναι σημαντικές και πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό των υπηρεσιών σχετικών με την μετάδοση και εκπομπή ήχου και video πάνω σε IP δίκτυο. Έχουν επικρατήσει να αναφέρονται ως παράμετροι Quality of Service και χρησιμοποιούνται ευρέως στην σχετική βιβλιογραφία.

Στην παρούσα εργασία, η κύρια ενασχόληση αφορά την επίδραση του ασύρματου προτύπου μετάδοσης IEEE 802.11n. Ως εκ τούτου, ορισμένες από τις προαναφερθείσες παραμέτρους δεν εμπίπτουν στην συγκεκριμένη μελέτη (όπως το MOS), ενώ οι υπόλοιπες πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα:

- Η συνολική καθυστέρηση θα αντικατασταθεί με την καθυστέρηση που εισάγεται από τη μετάδοση των πακέτων σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.11n
- Το Jitter, ο αριθμός των σφαλμάτων μετάδοσης και ο αριθμός χαμένων πακέτων αφορά μόνο το τμήμα της ασύρματης μετάδοσης
- Η ασύμμετρη μετάδοση και το MOS δεν μπορούν να έχουν εφαρμογή στην περίπτωση αυτή.

## **3.2.Πρωτόκολλα συμπίεσης/μετάδοσης για εφαρμογές δικτυακής εκπομπής φωνής**

Στην υποκεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε συνηθισμένα πρωτόκολλα συμπίεσης και μετάδοσης φωνής για εφαρμογές ήχου, (όπως G711 και G729).

### **3.2.1. G711**

Το G.711 αποτελεί ένα πρότυπο της ITU-T για κωδικοποίηση ήχου, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της τηλεφωνίας. Το πρότυπο είχε αρχικά τεθεί σε χρήση το 1972, υπό την επίσημη ονομασία του Pulse Code Modulation (PCM). Το συγκεκριμένο πρότυπο απαιτείται από πολλές παραγόμενες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα τα πρότυπα H.320 και H.323. Στο πρότυπο G.711 χρησιμοποιείται η συχνότητα δειγματοληψίας των 8kHz (8000 δείγματα ανά δευτερόλεπτο), με μικρή ανοχή. Για την μετατροπή του αναλογικού ήχου σε ψηφιακή μορφή αξιοποιείται μη ομοιόμορφος (λογαριθμικός) κβαντιστής των 8 bit για την αναπαράσταση κάθε δείγματος, με αποτέλεσμα ο απαραίτητος ρυθμός μετάδοσης του προτύπου να είναι 64000 bps.

Στο πρότυπο G.711 αξιοποιούνται δύο αλγόριθμοι κωδικοποίησης ήχου, ο μ-law και ο α-law, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια.

### **3.2.2. Το πρότυπο G.722**

Το G.722 είναι ένα πρότυπο της ITU-T το οποίο λειτουργεί στα 48, 46 και 64 Kbps και στηρίζεται στη διαμόρφωση ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation). Προσφέρει συμπίεση σε χαμηλούς ρυθμούς bit, δειγματοληπτώντας τα ηχητικά δεδομένα στα 16kHz (διπλάσιο από αυτή της παραδοσιακής τηλεφωνίας).

Καθώς το πρότυπο G.722 υποστηρίζει διάφορους ρυθμούς bit το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε VoIP εφαρμογές, όπου το εύρος ζώνης δεν είναι γνωστό και μπορεί να αλλάζει. Σε περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης είναι πιο σταθερό μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποδοτικότερα codecs G.722.1 και G.722.2.

### 3.2.3. Το πρότυπο G.723

Το πρότυπο G.723 αποτελεί μία επέκταση του G.721 στα 24 και 40 Kbits/sec για εξοπλισμό ψηφιακών πολλαπλασιαστικών κυκλωμάτων (Digital circuit multiplication equipment, DCME) και στην πορεία επισκιάστηκε από την ανάπτυξη του προτύπου G.726

#### 3.2.3.1. Το πρότυπο G.723.1

Το πρότυπο G.723.1 κωδικοποιεί τον ήχο σε πλαίσια των 30ms (30ms frames) και μπορεί να λειτουργήσει σε δύο ρυθμούς bit, στα 6.3Kbps (χρησιμοποιώντας πλαίσια 24 bytes) και στα 5.3 Kbps (χρησιμοποιώντας πλαίσια των 20 bytes). Λόγω των χαμηλών του απαιτήσεων σε εύρος ζώνης χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές VoIP.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας 8 KHz/16-bit (240 δείγματα για πλαίσια 30ms)



- Καθορισμένος ρυθμός bit (5.3Kbits/sec με 20 bytes σε πλαίσια 30ms και 6.3Kbits/sec με 24 bytes σε πλαίσια 30 ms)
- Καθορισμένο μέγεθος πλαισίου (frame size) για κάθε ρυθμό bit.
- Καθυστερήση αλγορίθμου 37.5ms ανά πλαίσιο
- Πρόκειται για ένα υβριδικό κωδικοποιητή όπου στους υψηλούς ρυθμούς bit χρησιμοποιεί MP-MLQ (Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization) ενώ στους χαμηλούς ACELP (Algebraic Code Excited Linear Prediction)

#### 3.2.4. Το πρότυπο G.726

Το G.726 είναι ένα πρότυπο συμπίεσης φωνής της ITU-T για μετάδοση σε ρυθμούς 16, 24, 32 και 40Kbps. Το G.726 είναι αυτό που εισήγαγε τα 16Kbits/sec. Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Συχνότητα δειγματοληψίας 8kHz
- Δυνατότητα 16, 24, 32 και 40 Kbps ρυθμών bit

- Δημιουργεί ροή bits και επομένως το μέγεθος πλαισίου καθορίζεται από τη διαδικασία δημιουργίας πακέτων (packetization) (συνήθως 80 δείγματα για μέγεθος πλαισίου 10 ms)
- Τυπική καθυστέρηση αλγορίθμου 0.125ms
- Χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση ADPCM
- Στα 40Kbits/sec μπορεί να υποστηρίξει 12000bits/sec ενώ στα 32Kbits/sec μπορεί να υποστηρίξει 2400bits/sec

### **3.2.5. Το πρότυπο G.728**

Το G.728 είναι ένα πρότυπο της ITU-T το οποίο λειτουργεί στα 16Kbps και χρησιμοποιεί την τεχνολογία LD-CELP (Low Delay Code Excited Linear Prediction, LD-CELP). Η καθυστέρηση του codec είναι μόλις 0.625ms (5 δείγματα).

### 3.2.6. G729

Το πρότυπο G.729 είναι ένας αλγόριθμος συμπίεσης δεδομένων ήχου κατάλληλος για φωνή, ο οποίος διαχωρίζει και συμπιέζει την ψηφιακή φωνή σε πακέτα διάρκειας 10 msec. Η επίσημη περιγραφή του είναι «Κωδικοποίηση της ομιλίας σε 8 kbit / s χρησιμοποιώντας αλγόριθμο σύζευξη δομής με γραμμική πρόβλεψη (CS-ACELP)». Εξαιτίας της απαίτησης του G729 σε χαμηλό εύρος ζώνης, χρησιμοποιείται κυρίως σε Voice over Internet Protocol (VoIP) εφαρμογές όπου το εύρος ζώνης πρέπει να διατηρηθεί χαμηλά.

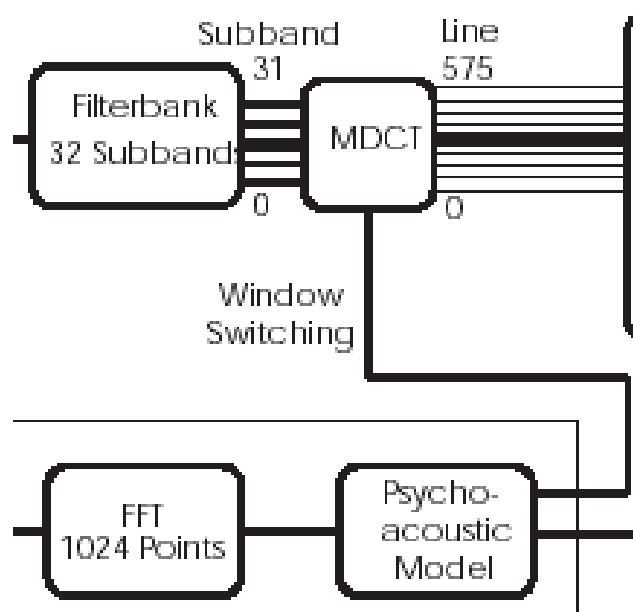
Μια σημαντική συνεισφορά στην μείωση του εύρους ζώνης είναι η κωδικοποίηση της «ησυχίας». Η «ησυχία» ανιχνεύεται όταν το επίπεδο του ήχου είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Στην περίπτωση που ανιχνευθεί «ησυχία» η μετάδοση διακόπτεται με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικού bandwidth.

### 3.2.7. MPEG-1 Audio Layer 3 III

Το MPEG-1 Audio Layer III, το πιο συχνά αναφέρεται για συντομία ως MP3, είναι μια κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (πατέντα) μορφή κωδικοποίησης ψηφιακού ήχου η οποία χρησιμοποιεί μια μορφή συμπίεσης του ήχου με ταυτόχρονη απώλεια πληροφορίας. Πρόκειται για μια συνηθισμένη μορφή ψηφιακού αρχείου για αποθήκευση ήχου, καθώς και ένα de facto πρότυπο της συμπίεσης ψηφιακού ήχου για τη μεταφορά και την αναπαραγωγή μουσικής σε ψηφιακές συσκευές αναπαραγωγής ήχου.

Η χρήση στο πρότυπο MP3 του αλγορίθμου συμπίεσης με απώλειες στοχεύει στη σημαντική μείωση του όγκου των δεδομένων που απαιτούνται για να αναπαρασταθεί ο ψηφιακός ήχος ενώ ταυτόχρονα να εξακολουθεί να ακούγεται σαν πιστή αναπαραγωγή του αρχικού ασυμπίεστου ήχου στην πλειονότητα των ακροατών. Ένα αρχείο MP3, που δημιουργείται χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση των 128 kbps θα οδηγήσει στη δημιουργία αρχείου που είναι περίπου 1/11 του μεγέθους του ασυμπίεστου ήχου. Η συμπίεση επιδρά στον ψηφιακό ήχο μειώνοντας την ακρίβεια ορισμένων τμημάτων του ήχου που θεωρούνται ότι δεν πρόκειται να γίνονται από την ακουστική ικανότητα των ανθρώπινων αισθητήριων οργάνων. Η

μέθοδος αυτή συνήθως αναφέρεται ως αντιληπτική κωδικοποίηση και χρησιμοποιεί ψυχοακουστικά μοντέλα για να απορρίψει ή να μειώσει ακρίβεια των κατάλληλων στοιχείων που δεν γίνονται αντιληπτές από τον ανθρώπινο ακρόαση, και στη συνέχεια συμπιέζει το υπόλοιπο της πληροφορίας με αποδοτικό τρόπο.



**Εικόνα 6: Η κωδικοποίηση MP3**

Πιο συγκεκριμένα, ο ήχος αναλύεται με μια τράπεζα φίλτρων (filter bank) σε 32 διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων, οι οποίες αναλύονται σύμφωνα με μια τροποποιημένη έκδοση του διακριτού μετασχηματισμού συνημίτονου. Κάθε μπάνα κωδικοποιείται με

έναν κατάλληλο κβαντιστή ο οποίος λαμβάνει υπόψη του και το ψυχοακουστικό μοντέλο.

Με μια γρήγορη ματιά, παρατηρούμε ότι ο G729 είναι εξαιρετικά πιο αποδοτικός αλγόριθμος κωδικοποίησης, συγκρινόμενος τόσο με τον G711 και τον MP3. Εδώ όμως πρέπει να τονιστεί ότι οι αλγόριθμοι G711 και G729 προορίζονται για την κωδικοποίηση ανθρώπινης φωνής, ενώ ο MP3 για κωδικοποίηση ήχου γενικότερα. Έτσι, οι G711 και G729 φιλτράρουν τις συχνότητες του ήχου πάνω από τα 4 kHz και κωδικοποιούν την φωνή με ρυθμό 8 kHz. Αντίθετα, ο MP3 φιλτράρει μόνο τις συχνότητες του ήχου που δεν μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αισθητήριο (περίπου 20 kHz) και κωδικοποιεί τον ήχο με ρυθμό 44100 Hz.

### **3.3.Πρωτόκολλα συμπίεσης/μετάδοσης για εφαρμογές δικτυακής εκπομπής video**

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην κωδικοποίηση video και συγκεκριμένα στα πρότυπα H263 & H264, τα οποία αποτελούν τα πιο πρόσφατα στην εξέλιξη των κωδικοποιητών video, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7

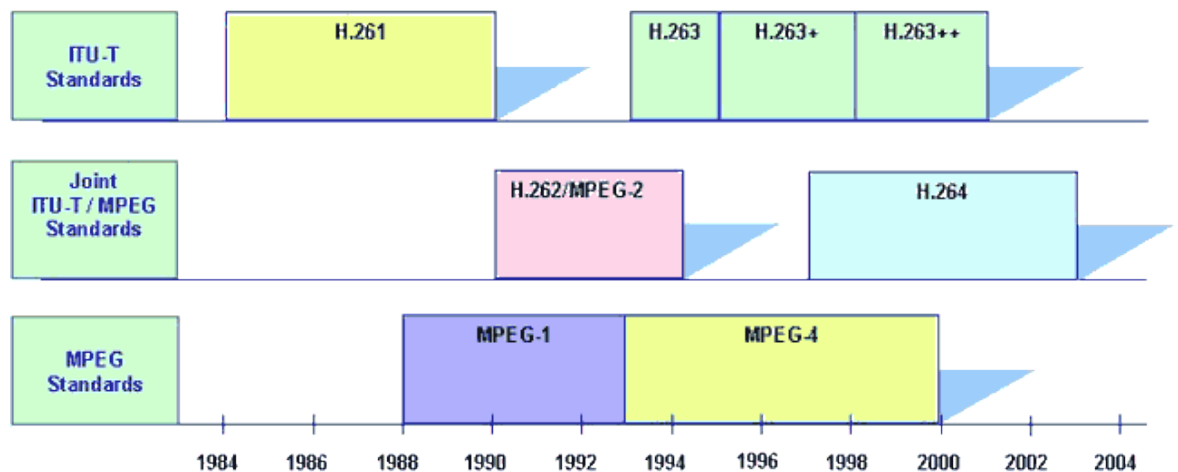
#### **3.3.1. H263**

Το πρότυπο H.263 είναι ένα πρότυπο συμπίεσης βίντεο το οποίο αρχικά είχε σχεδιαστεί ως μια μορφή χαμηλού bitrate συμπίεση κατάλληλη για τηλεδιασκέψεις. Έχει αναπτυχθεί από την ITU-T, και έχει βρεί πολλές εφαρμογές στο διαδίκτυο: το πολύ δημοφιλές Flash Video (όπως χρησιμοποιείται σε δικτυακούς τόπους όπως YouTube, Google Video, και MySpace). Επίσης, η αρχική έκδοση του RealVideo κωδικοποιητή βασίστηκε σε H.263.

Το πρότυπο H.323 καθορίζει λεπτομερώς τέσσερα είδη components τα οποία βρισκόμενα όλα μαζί δικτυωμένα μπορούν

να παράσχουν point-to-point και point-to-multipoint πολυμεσικής επικοινωνίας υπηρεσίες.

Το H.263 αναπτύχθηκε ως μια εξέλιξη και βελτίωση με βάση την εμπειρία από το H.261, το προηγούμενο πρότυπο της ITU-T για τη συμπίεση βίντεο, καθώς και των MPEG-1 και MPEG-2 πρότυπων. Το MPEG-4 είναι συμβατό με το H.263 πρότυπο, υπό την έννοια ότι η βασική H.263 ροή αποκωδικοποιείται σωστά από ένα αποκωδικοποιητή MPEG-4.



Εικόνα 7: Η εξέλιξη των κωδικοποιητών video



### 3.3.2. H.264

Το πρότυπο H.264 ή MPEG-4 part 10, ή AVC (Advanced video coding) είναι ένα πρότυπο για τη συμπίεση βίντεο. Στις μέρες μας αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφοποιήσεις για την καταγραφή, τη συμπίεση και τη διανομή βίντεο υψηλής ευκρίνειας.

Το πρότυπο είναι προσανατολισμένο στην αντιστάθμιση κίνηση με χρήση μπλοκ, βασισμένο στο πρότυπο του κωδικοποιητή που αναπτύχθηκε από την ITU-T, μαζί με το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC), και την ομάδα MPEG. Το H.264 είναι ίσως το πιο γνωστό από το πρότυπα κωδικοποίησης για δίσκους Blu-ray καθώς και τα Blu-ray Disc player, πρέπει να είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσουν το πρότυπο H.264. Επίσης χρησιμοποιείται ευρέως από πηγές εικονοσειρών του διαδικτύου, όπως τα βίντεο από το Vimeo, το YouTube και το iTunes Store, το Adobe Flash Player και το Microsoft Silverlight, καθώς επίσης και διάφορες εκπομπές υψηλής ευκρίνειας μέσω επίγειων ψηφιακών μεταδόσεων (ATSC, SBTVD, DVB-T και DVB-T2), καλωδιακών ψηφιακών μεταδόσεων (DVB-C) και δορυφορικών (DVB-S και DVB-S2).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης του video δεν είναι εν γένει σταθερός, καθώς εξαρτάται από τον μέγεθος του κάθε καρέ. Έτσι, για την παραδοσιακή ψηφιακή τηλεόραση κανονικής ανάλυσης, ο H264 επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης περίπου στα 1500 Kbps. Την ίδια στιγμή, ο MPEG2 αλγόριθμος, απαιτεί περίπου το διπλάσιο (2900 Kbps).

#### 4. Μαθηματική Μοντελοποίηση ασύρματων δικτύων

Πριν προχωρήσουμε στην μοντελοποίηση των ασυρμάτων δικτύων σύμφωνα με το πρότυπο 802.11n κρίνεται σκόπιμο να παρατηρήσουμε τα υπάρχοντα μοντέλα που υπάρχουν για τα δίκτυα 802.11.

Μια πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης πραγματοποιείται στις εργασίες (Bianchi, March 2000) και (Wu, Peng, Long, & Cheng, 2001 ). Η μοντελοποίηση αφορά το επίπεδο MAC και πραγματοποιείται με χρήση αλυσίδων Markov για να υπολογίσει το πραγματικό throughput του πρωτοκόλλου με βάση την διαδικασία DCF. Στην εργασία (Wu, Peng, Long, & Cheng, 2001 ), εντοπίζονται αστοχίες και αδυναμίες της μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκε στη (Bianchi, March 2000). Η σχετική ανάλυση προϋποθέτει ότι οι συνθήκες στο κανάλι είναι ιδανικές (απουσία λαθών στις εκπομπές, δεν υπάρχουν κρυφοί σταθμοί και δεν υπάρχει το φαινόμενο capture - το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν στην συχνότητα υπάρχουν δύο ή και περισσότερα σήματα και ο παραλήπτης έχει την δυνατότητα να επεξεργασθεί το δυνατότερο από τα σήματα και αγνοεί τα ασθενέστερα), ότι ο αριθμός σταθμών  $n$  που ανταγωνίζονται για την κατάληψη

του μέσου είναι σταθερός, ότι κάθε σταθμός πάντα έχει ένα πακέτο για εκπομπή (συνθήκες κορεσμού) και ότι όλα τα πακέτα έχουν ίδιο και σταθερό μέγεθος 1.

Το μαθηματικό μοντέλο υπολογίζει δυο βασικές μετρικές των ασύρματων τοπικών δικτύων την πιθανότητα  $p$  σύγκρουσης των πακέτων και την πιθανότητα εκπομπής ενός πακέτου. Χρησιμοποιώντας τις δύο αυτές πιθανότητες υπολογίζεται ένα βασικό κριτήριο απόδοσης που είναι η ρυθμοαπόδοση της διαδικασίας DCF του πρωτοκόλλου IEEE 802.11.

Έστω  $b(t)$  και  $s(t)$  είναι οι στοχαστικές διαδικασίες (processes) που αντιπροσωπεύουν τον μετρητή του χρόνου οπισθοχώρησης και των βαθμίδων οπισθοχώρησης  $(0, \dots, R)$  αντιστοίχως για έναν δοθέντα σταθμό στον χρόνο  $t$ . Η Μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου των Bianchi (Bianchi, March 2000) και Wu (Wu, Peng, Long, & Cheng, 2001) εισάγεται για να μοντελοποιηθεί η διαδικασία των δύο-διαστάσεων  $\{s(t), b(t)\}$ . Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται το μοντέλο της Μαρκοβιανής αλυσίδας του (Bianchi, March 2000). Η βασική προσέγγιση σε αυτό το μοντέλο είναι ότι κάθε εκπομπή πακέτου συγκρούεται με σταθερή πιθανότητα

$p$  ανεξάρτητη από την βαθμίδα οπισθοχώρησης από την οποία πραγματοποιείται η εκπομπή. Έστω ότι  $b_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = j, b(t) = i\}$  είναι η στατική (stationary) κατανομή της Μαρκοβιανής αλυσίδας όπου  $j \in [0, R]$  και  $i \in [0, W_j - 1]$ . Η πιθανότητα  $\tau$  με την οποία ένας σταθμός εκπέμπει ένα πακέτο σε μια τυχαία επιλεγμένη χρονοθυρίδα μπορεί να εκφραστεί ως

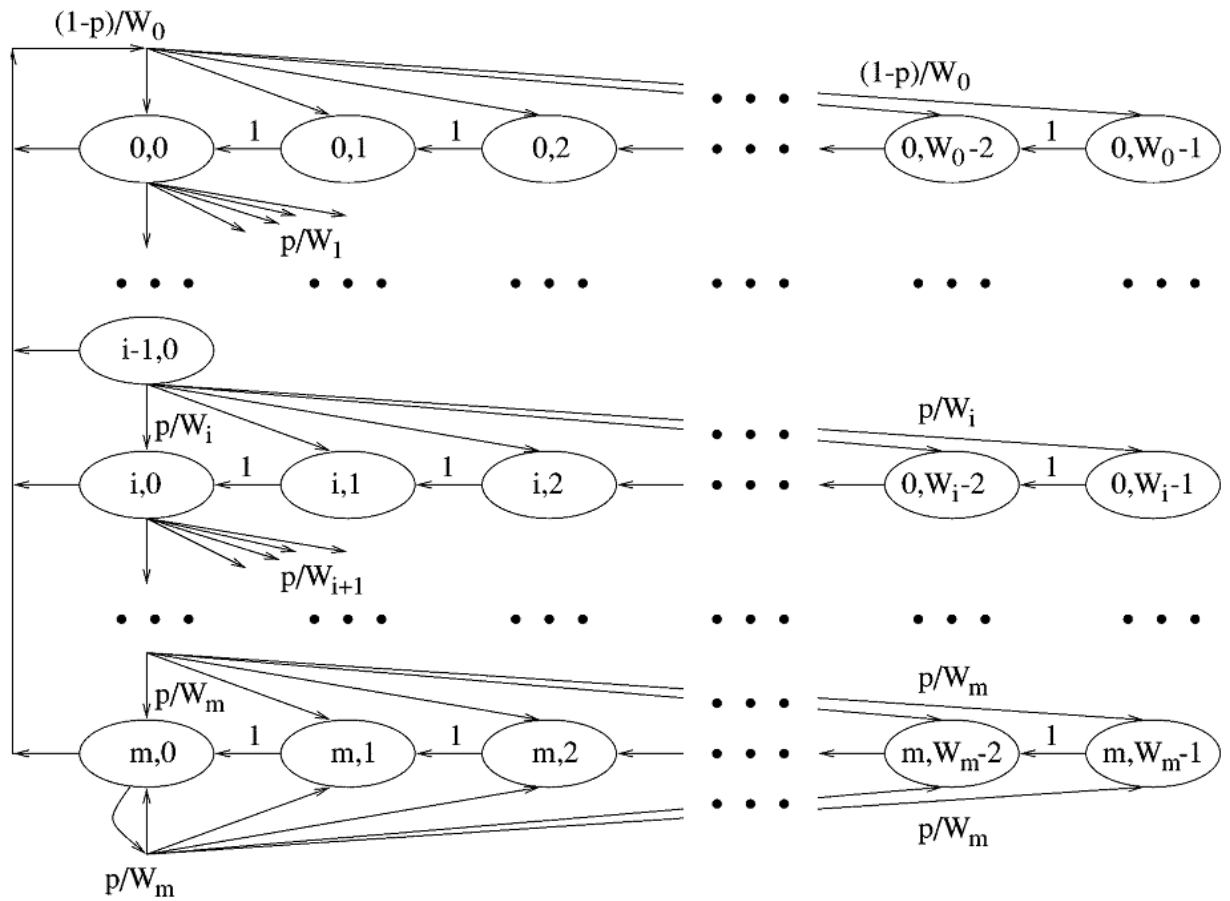
$$\tau = \sum_{j=0}^R b_{j,0} = \frac{1 - p^{R+1}}{1 - p} b_{0,0}$$

Ενώ η πιθανότητα  $p$  με την οποία ένα πακέτο που έχει εκπεμφθεί συγκρούεται με ένα άλλο πακέτο δίδεται από

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

Με την αριθμητική λύση του παραπάνω συστήματος, καταλήγουν οι δύο εργασίες, στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

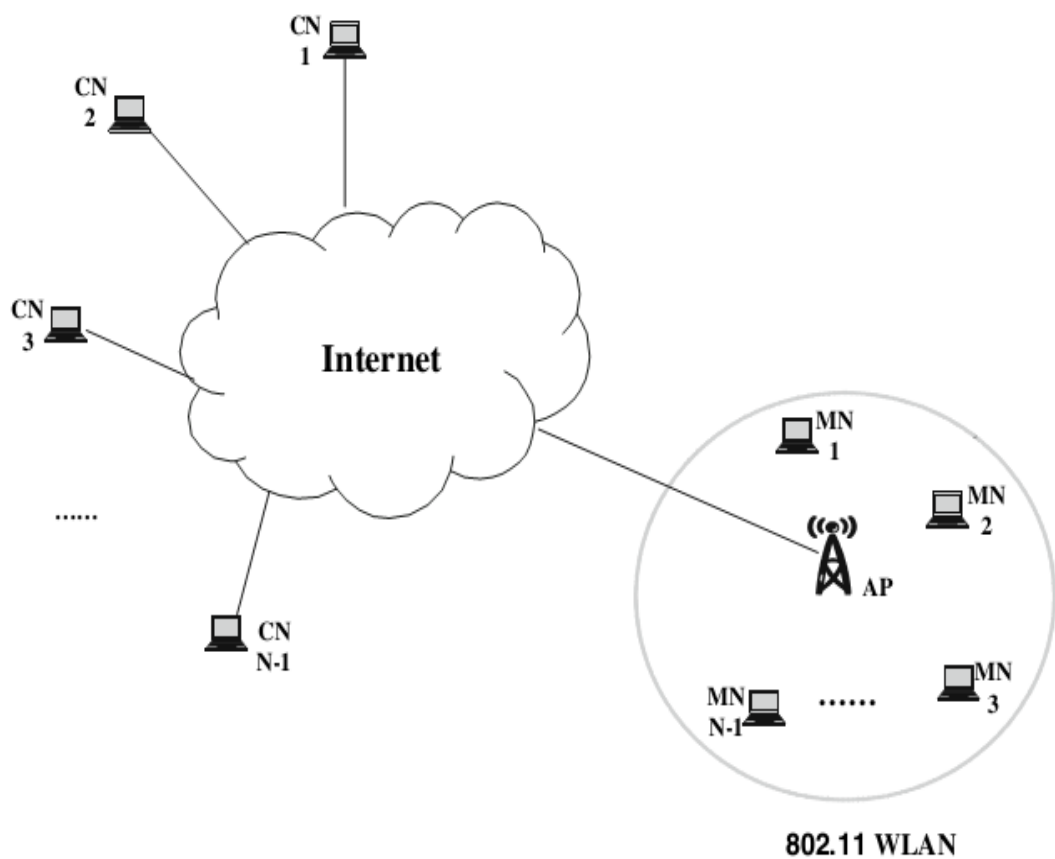
Διαπιστώνουμε από τη βιβλιογραφία ότι για την αποτελεσματική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων για εφαρμογές εκπομπής, το κυρίαρχο μοντέλο που πρέπει να περιγραφεί είναι το μοντέλο της καθυστέρησης. Από το μοντέλο αυτό προκύπτουν άμεσα τόσο η καθυστέρηση που εισάγεται, όσο και η διακύμανσή της, ενώ με κατάλληλη μοντελοποίηση, είναι εφικτό να προσδιοριστούν παράλληλα οι απώλειες πακέτων και η ρυθμαπόδοση.



**Εικόνα 8:** Αλυσίδα Markov για την μοντελοποίηση του εσωτερικού timecounter σύμφωνα με την (Bianchi, March 2000)

## Μοντελοποίηση ασύρματου δικτύου

Στο IEEE 802.11n, αρκετά νέα χαρακτηριστικά έχουν προστεθεί στο MAC επίπεδο για την βελτίωση της ρυθμαπόδοσης, όπως η συγκέντρωση πλαισίων, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την μοντελοποίηση.



Εικόνα 9: Μοντελοποίηση ασύρματου δικτύου



Ένα από τα πιο αποδοτικά μοντέλα που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία είναι το μοντέλο της εργασίας (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009). Στο μοντέλο αυτό, θεωρείται ένα πλήρως συνδεδεμένο ασύρματο δίκτυο με  $N-1$  κόμβους και ένα Ασύρματο σημείο πρόσβασης (Wireless Access Point), το οποίο συνδέεται με το υπόλοιπο δίκτυο (διαδίκτυο). Η σχηματική αναπαράσταση του δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 9. Προφανώς, στη σύγχρονη εποχή των VDSL και οπτικών συνδέσεων, το πιο αργό σημείο της επικοινωνίας αποτελεί κατά κανόνα το τμήμα της ασύρματης μετάδοσης. Για τον λόγο αυτό θα μελετήσουμε αποκλειστικά αυτό το τμήμα. Επίσης, πραγματοποιούνται οι εξής υποθέσεις: όλοι οι σταθμοί μπορούν να αφογκρασθούν το κανάλι και να κατανοήσουν την κατάστασή του, καθώς και το κανάλι είναι απομονωμένο από εξωτερικούς θορύβους.

Αρχικά εξάγεται το μοντέλο για τον παραδοσιακό 802.11 και στη συνέχεια επεκτείνεται στην περίπτωση του frame aggregation. Ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα άφιξης δεδομένων σε ένα σταθμό  $i$ , είναι  $\lambda_i$  και ο ρυθμός άφιξης πλαισίων είναι  $\mu_i$  σε κάθε time slot.

Επιπρόσθετα, ορίζεται  $p_i$  η πιθανότητα σύγκρουσης τουλάχιστον δύο πλαισίων στο φυσικό μέσο λόγω ταυτόχρονης μετάδοσης και  $\tau_i$  η πιθανότητα ο σταθμός να εκκινήσει τη μετάδοση ενός πακέτου μια τυχαία χρονική στιγμή. Έτσι, καθώς η σύγκρουση του πλαισίου που μεταδίδει ο κόμβος  $i$  εξαρτάται από το γεγονός αν ένας άλλος σταθμός  $j \neq i$  μεταδίδει πακέτο στο ίδιο timeslot και η πιθανότητα σύγκρουσης επομένως γράφεται:

$$p_i = 1 - \prod_{j=0, j \neq i}^{N-1} (1 - \rho_j \tau_j)$$

Όπου:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

Επίσης, το εσωτερικό μοντέλο οπισθοχώρησης είναι μια γεωμετρική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή για κάθε σταθμό:

$$E\{W_i\} = \sum_{k=0}^{m-1} p_i^k (1 - p_i) \sum_{j=0}^k \frac{CW_j}{2} + p_i^m \sum_{j=0}^m \frac{CW_j}{2}$$

Όπου  $m$  είναι το όριο επαναπροσπαθειών. Ο αριθμός των προσπαθειών  $A_i$  που επιχειρεί ένας σταθμός μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί ως γεωμετρική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή:

$$E\{A_i\} = \frac{1 - p_i^{m+1}}{1 - p_i}$$

Έτσι, η μέση πιθανότητα μετάδοσης υπολογίζεται ως:

$$E\{\tau_i\} = \frac{E\{A_i\}}{E\{W_i\} + E\{A_i\}}$$

Συνεπώς, η πιθανότητα μετάδοσης του σταθμού  $i$  είναι συνάρτηση της πιθανότητας  $p_i$ . Στο βασικό σενάριο, ισχύει ότι

$$T_S = (P_{OH} + T_{MF}) + SIFS + T_{ACK} + DIFS$$

$$T_C = (P_{OH} + T_{MF}) + ACK_{timeout} + DIFS \cong TS$$

Όπου  $T_S$  είναι χρόνος που απαιτείται για μια επιτυχημένη αποστολή,  $T_c$  ο χρόνος που απαιτείται για μια αποτυχημένη αποστολή,  $P_{OH}$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται να αποσταλούν η επιπλέον πληροφορία που προσθέτει το φυσικό επίπεδο (PHY) και  $T_{MF}$  για το επίπεδο MAC. Ο αριθμός των συγκρούσεων του πλαισίου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια μεταβλητή με γεωμετρική κατανομή, και ο μέσος χρόνος σύγκρουσης ενός πλαισίου που αντιλαμβάνεται ένας σταθμός  $i$  είναι:

$$E\{T_{c_i}\} = \frac{p_i T_c}{1 - p_i}$$

Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $\delta t = \frac{1}{\mu_i}$ , για τον  $i$  σταθμό από τη στιγμή που προσπαθεί να μεταδώσει ένα πλαίσιο μέχρι το πλαίσιο να μεταδοθεί με επιτυχία, ένα από τα ακόλουθα γεγονότα μπορεί να συμβούν: (1) επιτυχής μεταδόσεις γίνονται από τους υπόλοιπους σταθμούς? (2) συγκρούσεις (3) αδρανές κανάλι όταν ο σταθμός  $i$  είναι στα κατάσταση υπαναχώρησης. Ως εκ τούτου, έχουμε:

$$\delta t = T_{S_i} + \delta t \sum_{j=0, j \neq i}^{N-1} \lambda_j T_{S_j} + E\{W_i\} + \frac{1}{2} \left( \delta t \sum_{j=0, j \neq i}^{N-1} \lambda_j T_{C_j} + T_{C_i} \right)$$

Καθώς οι ρυθμοί μετάδοσης  $\lambda_i$  είναι γνωστοί, μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε σε μοναδική λύση για το σύνολο των πιθανοτήτων  $p_i$ , και των ρυθμών  $\mu_i$  και  $\rho_i$ . Ο μέγιστος αριθμός των κυκλοφοριακών ροών που μπορεί να υποστηριχθεί επιτυγχάνεται όταν  $\rho_i \leq 1$

Στο πρότυπο 802.11n χρησιμοποιώντας την τεχνική frame aggregation και υποθέτοντας ομογένεια και συμμετρία, οι πιθανότητες  $p_i$  και το χρονικό διάστημα  $\mu_i$  τροποποιούνται κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ομοιογένεια και ομοιομορφία στην αποστολή πακέτων από τους ασύρματους κόμβους, καθώς επίσης ότι ο σταθμός για  $i=0$  είναι το Access Point, ισχύει ότι:

$$\lambda_i = \begin{cases} (N-1)\lambda_1, & i = 0 \\ \lambda_1, & i \geq 1 \end{cases}$$

Επομένως οι πιθανότητες γράφονται:

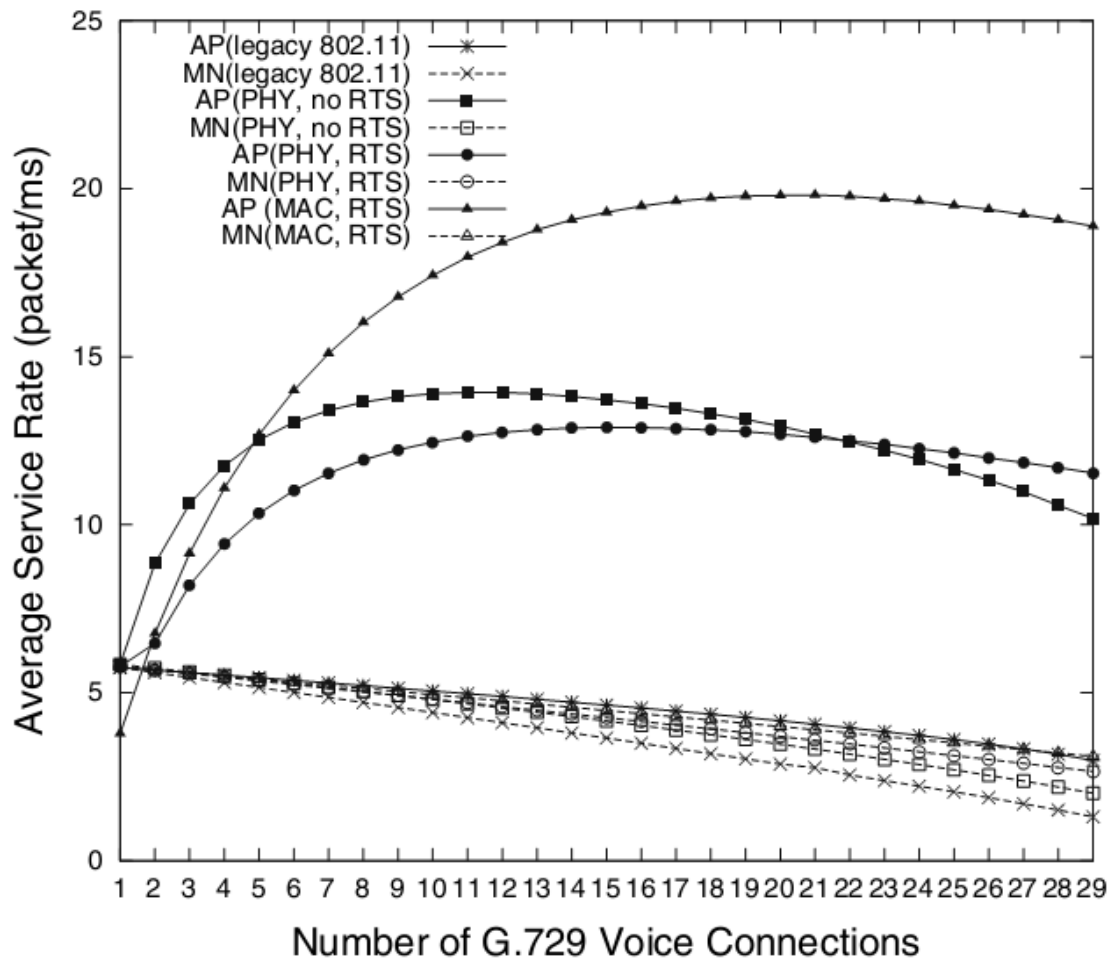
$$p_i = \begin{cases} 1 - (1 - \rho_1 \tau_1)^{N-1}, & i = 0 \\ 1 - (1 - \rho_1 \tau_1)^{N-2} (1 - \rho_0 \tau_0)^1, & i \geq 1 \end{cases}$$

Και

$$\delta\tau_i = \begin{cases} \left( \frac{(N-1)\lambda_1}{\mu_0} + 1 \right) T_s + E\{W_0\} + \frac{1}{2} \left( \frac{(N-1)\lambda_1}{\mu_0} \frac{p_1 T_c}{1-p_1} + \frac{p_0 T_c}{1-p_0} \right), & i = 0 \\ \left( \frac{(N-2)\lambda_1}{\mu_1} + 1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} \right) T_s + E\{W_1\} + \frac{1}{2} \left( \frac{(N-2)\lambda_1}{\mu_1} \frac{p_1 T_c}{1-p_1} + \frac{\lambda_0}{\mu_1} \frac{p_0 T_c}{1-p_0} \right), & i \geq 1 \end{cases}$$

Με βάση αυτό το μοντέλο, διάφορες τροποποιήσεις εφαρμόζονται επιπλέον με βάση τις παραλλαγές του προτύπου IEEE 802.11 (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009)

Αποτελέσματα του μοντέλου (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009) σε VoIP και Video conference



Εικόνα 10: Κορεσμός καναλιού για G729 codec ως προς τον αριθμό συνδέσεων για διάφορα aggregation σχήματα του 802.11n (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009)

Στην εργασία (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009) πραγματοποιούνται διάφορα πειράματα, τα πιο σημαντικά από τα οποία είναι τα εξής:

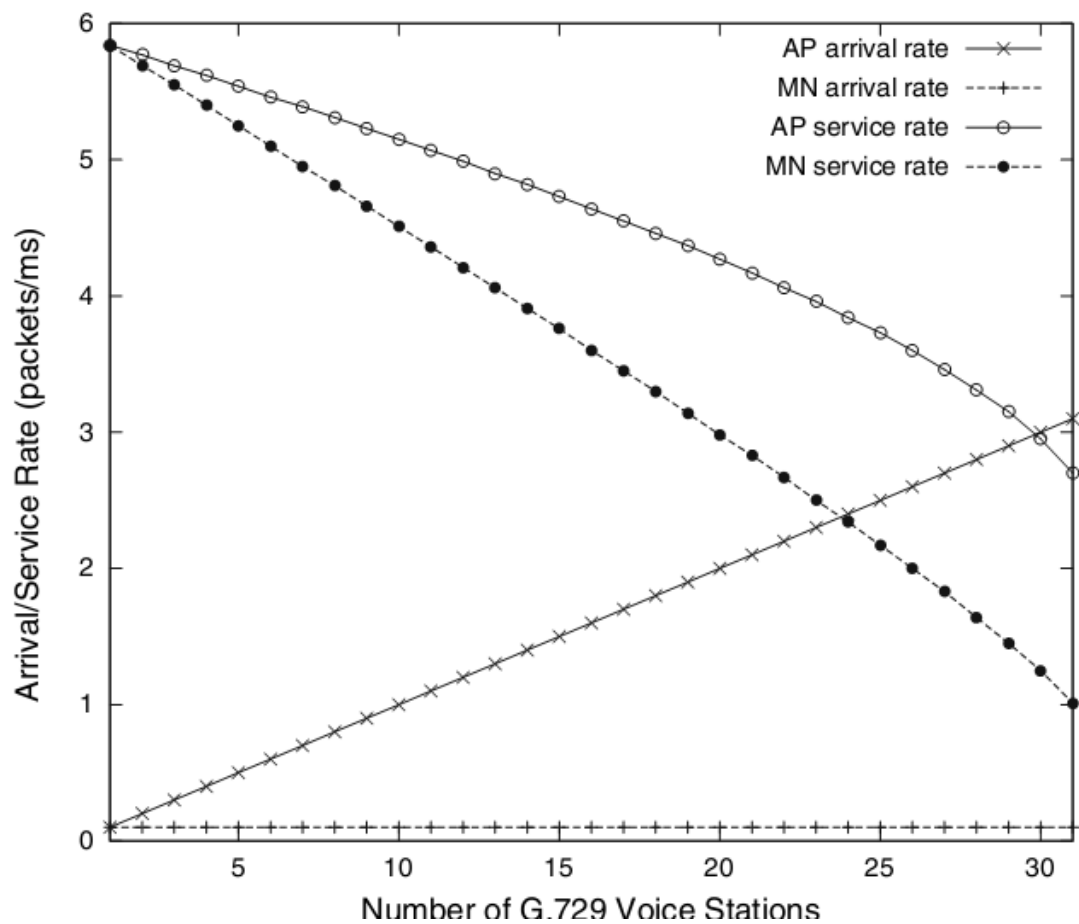
- Χωρητικότητα συνδέσεων VoIP για διάφορους codecs και ρυθμό αποστολής πακέτων
- Χωρητικότητα συνδέσεων video conference συνδέσεων για διάφορους codecs και ρυθμό αποστολής πακέτων

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται το γράφημα της απόδοσης του καναλιού για G729 codec ως προς τον αριθμό συνδέσεων για το πρότυπο IEE 802.1n1 ενώ στη εικόνα 3 παρουσιάζεται η απόδοση του προγενέστερου 802.11g. Παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ αποδοτικότερη χρήση του καναλιού με την εισαγωγή του νέου προτύπου. Πιο συγκεκριμένα:

- Σε καμία περίπτωση στα προγενέστερα πρωτόκολλα, ο ρυθμός των πακέτων δεν ξεπέρασε τα 6, ενώ στο νέο πρότυπο IEEE 802.11n έχουμε σημαντική αύξηση της απόδοσης.
- Το ασύρματο δίκτυο με τα προγενέστερα πρωτόκολλα δεν είχε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσει χωρίς προβλήματα 30 παράλληλες συνδέσεις. Παρατηρούμε στην Εικόνα 3 ότι σε



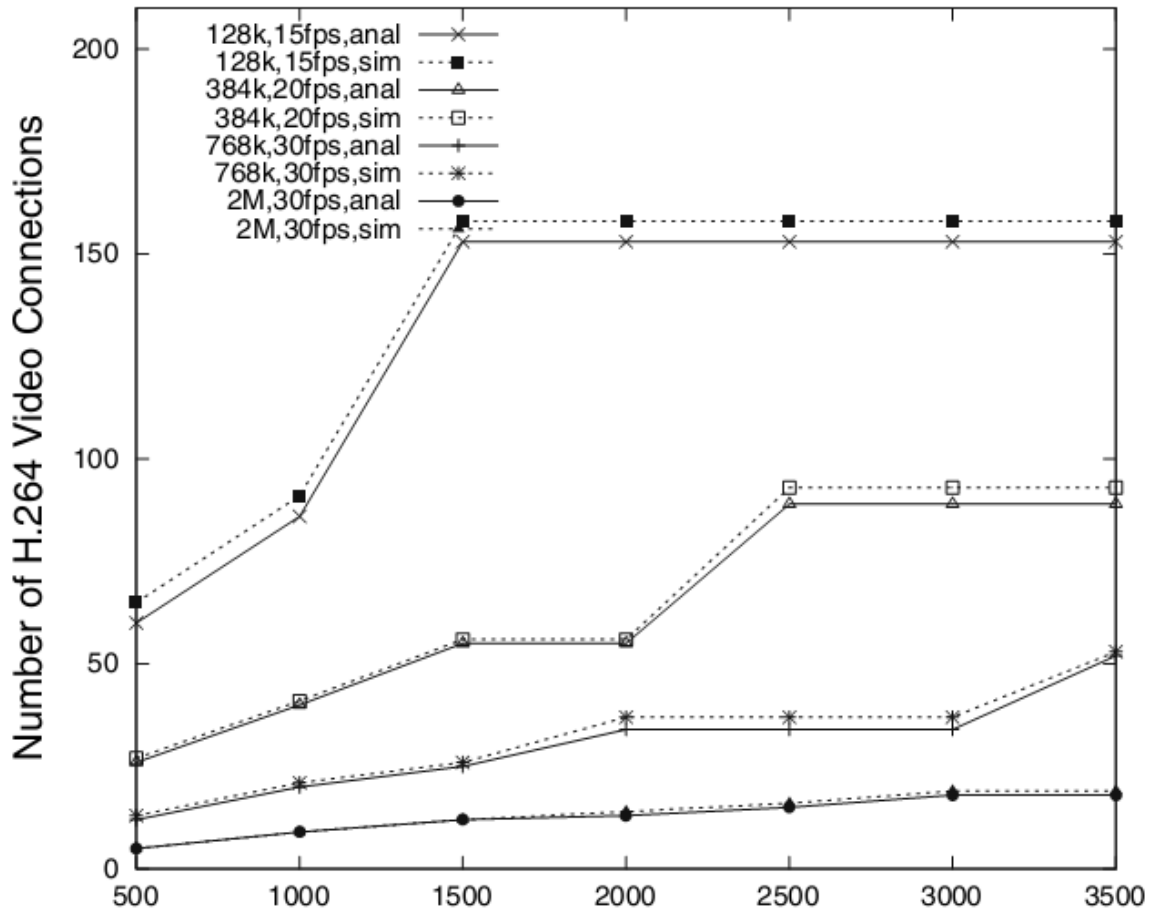
ορισμένες περιπτώσεις, φθάνουν λιγότερα από 1 πακέτα ανά 10 msec, γεγονός που προκαλεί καθυστερήσεις στην μετάδοση του ήχου. Αντίθετα, το IEEE 802.11n, φαίνεται να έχει τη δυναμική να υποστηρίξει πολλαπλάσιο αριθμό συνδέσεων.



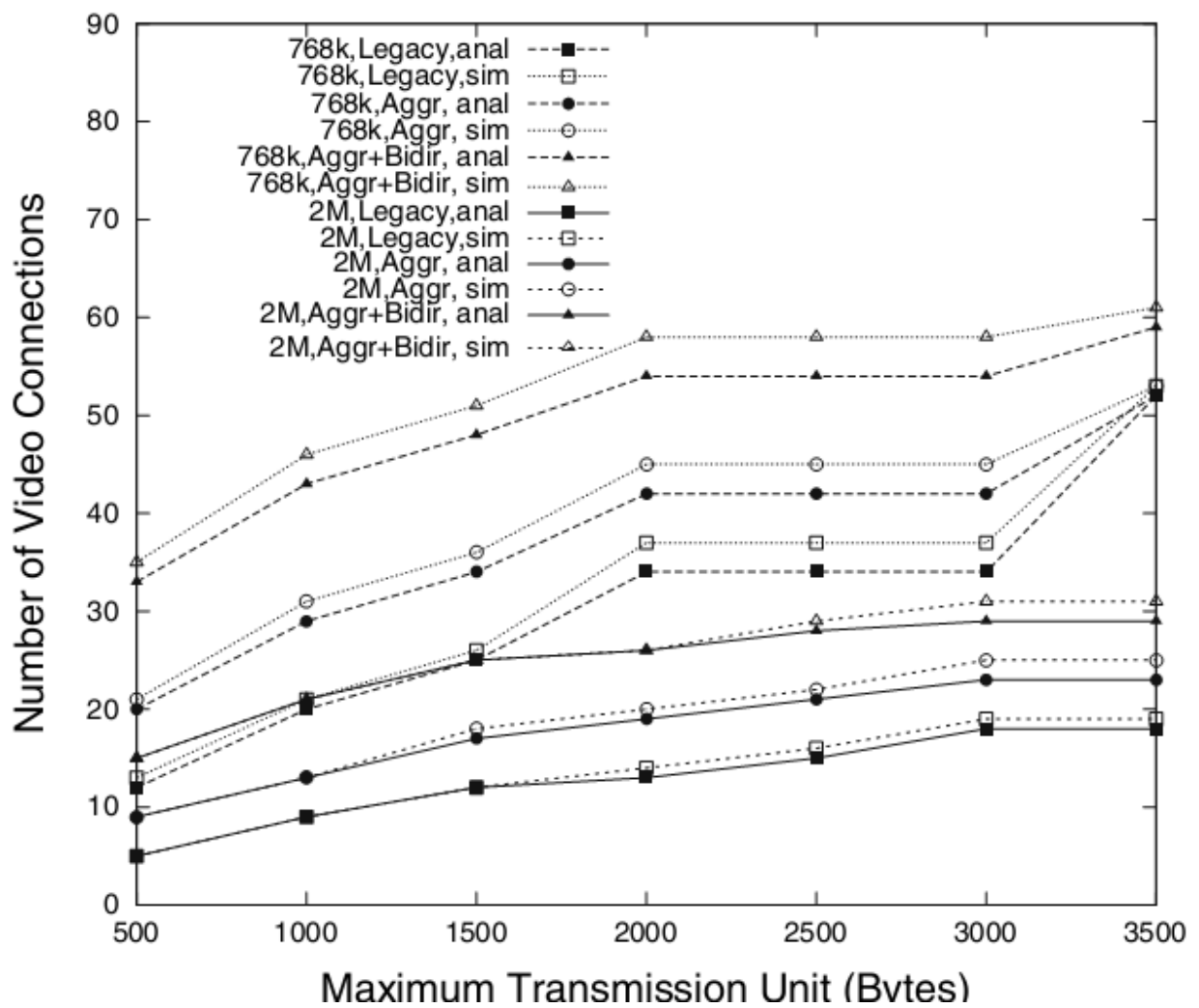
Εικόνα 11: Η απόδοση του 802.11g

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου η μελέτη εστιάζεται σε μετάδοση ψηφιακού video, με χρήση του H264 και ρυθμούς μετάδοσης από 768kbps έως 2Mbps (Εικόνα 5).

Παρατηρούμε ότι το 802.11n να παρουσιάζει σημαντικά αυξημένα χαρακτηριστικά υποστηρίζοντας περισσότερες από 30 παράλληλες ροές των 2Mbps. Αντίθετα, τα προγενέστερα πρωτόκολλα είναι σε θέση να υποστηρίξουν το πολύ 15 ροές της ίδιας μορφής video (Εικόνα 4).



Εικόνα 12: Απόδοση του IEEE 802.11g σε μετάδοση video  
 (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009)



Εικόνα 13 Αριθμός συνδέσεων για H264 codec ως προς τον MTU για διάφορα aggregation σχήματα του 802.11n (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009)

Τα προηγούμενα μαθηματικά μοντέλα, δεν λαμβάνουν υπόψη τη δυνατότητα που προσφέρει τον νέο πρότυπο 802.11n για λειτουργία πολλών εισόδων και πολλών εξόδων, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη λειτουργία απαιτεί ειδικό router και κινητούς κόμβους οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με περισσότερες από μία κεραίες.

Έτσι το παραπάνω μοντέλο, μπορούμε εύκολα να το αναπροσαρμόσουμε στις ακόλουθες περιπτώσεις:

*Το Access Point έχει πολλαπλές κεραίες αλλά όλοι οι κινητοί σταθμοί διαθέτουν μια απλή κεραία.* Αυτό είναι πολύ συνηθισμένο σενάριο, καθώς το Access point θα δέχεται το μεγαλύτερο δικτυακό φόρτο και θα πρέπει να εξυπηρετεί παράλληλα πολλαπλούς κινητούς σταθμούς.

Στην περίπτωση αυτή, τα πειράματα που έχουν εκτελεστεί στην εργασία (Cai, Ling, Shen, Mark, & Cai, 2009) ισχύουν κανονικά για κάθε ξεχωριστό κανάλι επικοινωνίας. Το μεγάλο πλεονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι η ουσιαστική αύξηση της ρυθμαπόδοσης για

όλους τους σταθμούς όταν το δίκτυο διαθέτει περισσότερους από έναν κινητό σταθμό. Στην περίπτωση όπου υπάρχει μόνο ένας κινητός σταθμός, δεν υπάρχει απολύτως καμμία βελτίωση. Έτσι, ο αριθμός των σταθμών των προαναφερθέντων διαγραμμάτων δεν είναι ο συνολικός αριθμός των σταθμών  $(N-1)$  που συνδέονται στο ασύρματο σημείο πρόσβασης, αλλά ο αριθμός των σταθμών που συνδέονται στην κάθε κεραία ξεχωριστά  $N_D = \left\lceil \frac{N-1}{\Delta} \right\rceil$  όπου  $N_D$  είναι ο αναμενόμενος αριθμός κόμβων ανά κεραία. Ασφαλώς, και το Access Point στις περιπτώσεις αυτού του είδους πρέπει να έχει αυξημένες δυνατότητες επικοινωνίας, ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που διαθέτει, και αντίστοιχο μέγεθος από buffers για να ανταπεξέλθουν στην ζήτηση.

Στη δεύτερη περίπτωση, τόσο ο ασύρματος σταθμός πρόσβασης, όσο και οι κινητοί σταθμοί διαθέτουν πολλαπλές κεραιές. Στην περίπτωση αυτή, αν ο αριθμός των ασύρματων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό κεραιών ανά σταθμό, τότε τα διαγράμματα ισχύουν όπως και στην προηγούμενη περίπτωση,  $N_D = \left\lceil \frac{N-1}{\Delta_0} \right\rceil$ , όπου  $\Delta_0$  είναι ο αριθμός των κεραιών του AP. Η σημαντική διαφορά φαίνεται στη ρυθμαπόδοση του συνολικού δικτύου σε λίγους ασύρματους σταθμούς, καθώς η αύξηση της

ρυθμαπόδοσης υπάρχει από τον πρώτο σταθμό. Η αύξηση της ρυθμαπόδοσης είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού των κεραιών που συμμετέχουν στην επικοινωνία. Για την πιο αυστηρή μοντελοποίηση, η προαναφερθείσα μελέτη εφαρμόζεται ξεχωριστά ανά κανάλι επικοινωνίας και τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε ένα ενιαίο διάγραμμα.

## 5. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία για την ανάλυση της λειτουργίας των νέων δικτύων IEEE 802.11n. Αφού μελετήσαμε τις νέες δυνατότητες του IEEE 802.11n και τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την μετάδοση των δεδομένων εικόνας και ήχου, παρουσιάζουμε τα σχετικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία.

Από τη συγκεκριμένη μελέτη έχουμε εντοπίσει ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα αν και είναι πολύ αξιόπιστα, δεν λαμβάνουν όλες τις παραμέτρους υπόψη. Έτσι, σημαντικό βάρος δίνεται στο frame aggregation, ενώ η δυνατότητα παράλληλης μετάδοσης σε πολλαπλά κανάλια από τον ίδιο σταθμό ασύρματης πρόσβασης δεν διερευνάται. Παρόλα αυτά, προτείνουμε ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα μπορούν να έχουν εφαρμογή, και με τις νέες δυνατότητες παράλληλης μετάδοσης, όπου πραγματοποιείται διαχωρισμός της επικοινωνίας σε πολλαπλά κανάλια με χρήση πολυπλεξίας. Αυτό επιτυγχάνεται σε δύο βήματα: αρχικά πραγματοποιείται μοντελοποίηση ανα κανάλι και στη συνέχεια τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται σε ένα.



Σε κάθε περίπτωση, τα υπάρχοντα μοντέλα, μπορεί να θεωρηθούν ότι περιγράφουν το worst case scenario (χειρότερη περίπτωση), όπου η πολυπλεξία απουσιάζει, συνεπώς δείχνουν την τάση ότι το νέο πρότυπο IEEE802.11n παρουσιάζει αυξημένες δυνατότητες επικοινωνίας και με τις τεχνικές frame aggregation επιτυγχάνει σημαντική αύξηση της ρυθμαπόδοσης σε εφαρμογές μετάδοσης ήχου και βίντεο.

Τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν δείχνουν ότι το πρότυπο IEEE802.11n έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει πολλαπλές Standard Definition ροές video (σε απλό κανάλι, χωρίς πολυπλεξία υποστηρίζει από 10 παράλληλα ροές, ενώ στις συνηθισμένες περιπτώσεις υποστηρίζει πάνω από 20)

Τα μοντέλα αυτά απομένει να επαληθευτούν σε πραγματικά περιβάλλοντα, με ύπαρξη θορύβου και άλλων παρεμβολών.

## 6. Βιβλιογραφία

Arif, T. Y., & Sari, R. F. (Jan 2011). Impact of Various VoIP and Video Traffics to Performance of Aggregation with Fragment Retransmission (AFR) in WLAN . *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 11(1).

Bianchi, G. (March 2000). Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*, , 18(3), 535-547.

Brouzioutis, C., Vitsas, V., & Chatzimisios, P. (2010). Studying the Impact of Data Traffic on Voice Capacity in IEEE 802.11 WLANs. *IEEE International Conference on Communications (ICC)* .

Cai, L. X., Ling, X., Shen, X. (., Mark, J. W., & Cai, L. (2009). Supporting voice and video applications over IEEE 802.11n WLANs. *Wireless News*, 15(4), 443-454.

Friendly, H. (2007). *Wireless Networking in the Developing World: A practical guide to planning and building low-cost telecommunications infrastructure*. LLC.

IEEE-SA. (29 October 2009). IEEE 802.11n-2009—Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. . IEEE.

Paper, W. (2011). 802.11n: The Next Generation of Wireless Performance. Cisco.

Wu, H., Peng, Y., Long, K., & Cheng, S. (2001 ). A simple model of IEEE 802.11 Wireless LAN. *International Conferences on Info-tech and Info-net, ICII* . Beijing.