

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Βελτιστοποίηση της Κατανομής Πόρων σε
Ασύρματο Κανάλι Υψηλής Ταχύτητας με
Απαιτητικούς Handoff Χρήστες και Διαφορετική
Ποιότητα Καναλιού ανά Χρήστη*

ΔΡΙΒΑΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ
2006

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Πατεράκη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, όπως και τον επιβλέποντα διδάσκοντα κ. Πολυχρόνη Κουτσάκη για την συμβουλευτική, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας, η οποία μου παρείχε την δυνατότητα να εντρυφήσω στο επιστημονικό κομμάτι των Ασύρματων Δικτύων Υπολογιστών. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω πολύ τους συναδέλφους μου για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου παρείχαν και την οικογένεια μου καθώς και όσους θεωρώ μέλη της για την ηθική εμπύχωση η οποία έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

Δρίβας Θεόδωρος
Απρίλιος 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΑ	ΣΕΛΙΔΑ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	7
1.1 ΕΝΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	7
1.2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	9
1.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΑΤΜ.....	11
1.3.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	12
1.3.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΛΑΘΩΝ.....	13
1.3.3 ΑΛΛΑΓΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ (HANDOVER).....	13
1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	14
1.5 Το ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	20
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
2.2 Το ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	21
2.2.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ.....	21
2.2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΤΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΙ ΦΩΝΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ.....	25
2.2.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	27
2.2.4 ΚΙΝΗΣΗ ΒΙΝΤΕΟ.....	29
2.2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΦΩΝΗΣ.....	32
2.2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	33
2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....	35
2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	37
2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	39
2.5.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	58

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύγχρονα εμπορικά ασύρματα δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης (*bandwidth*). Αυτή είναι η αιτία για την οποία οι εφαρμογές τους αφορούν κυρίως σε μεταδόσεις βίντεο χαμηλής ποιότητας, φωνής και δεδομένων χαμηλού ρυθμού. Οι υπηρεσίες πολυμέσων (*multimedia services*), από την άλλη πλευρά, που γνωρίζουν μεγάλη άνθηση στα ενσύρματα δίκτυα, χαρακτηρίζονται από την ανάγκη για μεγάλο *bandwidth* και υψηλή ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*) προς τον χρήστη.

Ένας τρόπος να αυξηθεί η χωρητικότητα (*capacity*) των συστημάτων αυτών είναι να χρησιμοποιηθεί κυψελοειδής δομή με κυψέλες όσο μικρότερες γίνεται, ώστε να ελαττωθεί η μεταδιδόμενη ισχύς και να αυξηθεί η συχνότητα εκπομπής. Χρησιμοποιώντας μικρότερες κυψέλες ο *round-trip* χρόνος διάδοσης, δηλαδή ο χρόνος διάδοσης από το χρήστη στην κεραία και πάλι πίσω στον χρήστη, είναι σχεδόν αμελητέος, της τάξης ελάχιστων *μs*. Ένας δεύτερος τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα είναι με την σχεδίαση ενός ικανού και αποτελεσματικού πρωτοκόλλου ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης στο μέσο (*Medium Access Control protocol, MAC protocol*) το οποίο θα ικανοποιεί το απαιτούμενο QoS για κάθε πελάτη, όπως αυτό έχει ορισθεί από το συμβόλαιό του, και θα πραγματοποιεί την βέλτιστη κατανομή των πόρων στους χρήστες πολυμέσων που βρίσκονται μέσα στο σύστημα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν σκοπό να παρουσιάσει έναν μηχανισμό βελτιστοποίησης της κατανομής των πόρων ενός ασύρματου δικτύου, επεκτείνοντας σημαντικά μια προηγούμενη ερευνητική δουλειά της ερευνητικής μας ομάδας [10, 11]. Η επέκταση εστιάζει στην μελέτη της περίπτωσης όπου στο ασύρματο δίκτυο εισέρχονται απαιτητικοί χρήστες από άλλη κυψέλη (*handoff users*) καθώς και στο γεγονός ότι κάθε χρήστης έχει διαφορετική ποιότητα άνω ζεύξης (*uplink*, ζεύξη από τα τερματικά προς τον σταθμό βάσης) και κάτω ζεύξης (*downlink*, ζεύξη από τον σταθμό βάσης προς τα τερματικά). Όλες οι διαφορές της παρούσας εργασίας με τα [10, 11], οι οποίες σχετίζονται με την μελέτη ενός όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικού σεναρίου κίνησης σε ένα ασύρματο κανάλι, θα εξηγηθούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Στο ίδιο Κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο παραλλαγές ενός μηχανισμού που εκμεταλλεύεται την κακή κατάσταση στην οποία έχει περιέλθει το *uplink* κανάλι ενός χρήστη, ώστε να εκμεταλλευθεί προσωρινά το *bandwidth* που δεν χρησιμοποιεί ο χρήστης για εξυπηρέτηση άλλων χρηστών. Ο πρώτος μηχανισμός είναι ο

προτεινόμενος στα πλαίσια αυτής της εργασίας, και ο δεύτερος είναι ένας ιδανικός μηχανισμός, ο οποίος χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης του πρώτου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτών των μηχανισμών με την εύρεση της μέγιστης χωρητικότητας χρηστών φωνής για δεδομένο αριθμό χρηστών βίντεο και τα αποτελέσματα του βαθμού χρησιμοποίησης του καναλιού όταν ολοκληρώνονται δύο είδη κίνησης στο ασύρματο κανάλι: κίνηση βίντεο και κίνηση φωνής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΝΣΥΡΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Η συνύπαρξη των ενσύρματων και ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη πως κανένας από τους δύο τύπους δικτύων δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μόνος του όλες τις ανάγκες των σύγχρονων χρηστών. Το βασικό πλεονέκτημα των ασύρματων δικτύων είναι η ικανότητα των χρηστών να κινούνται, ακόμα και κατά την διάρκεια της χρήσης των υπηρεσιών του δικτύου -κάτι που δεν μπορούν να προσφέρουν τα ενσύρματα δίκτυα. Η ικανότητα αυτή των ασύρματων δικτύων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους χρήστες που, είτε εξαιτίας της φύσης της εργασίας τους, είτε για λόγους αναψυχής βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση και, ταυτόχρονα, έχουν την ανάγκη να επικοινωνούν. Από την άλλη πλευρά, τα ενσύρματα δίκτυα προσφέρουν αξιόπιστη και υψηλής ταχύτητας επικοινωνία, προσφέροντας έτσι στους χρήστες την δυνατότητα να χρησιμοποιούν μια μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών. Ιδιαίτερα μετά την εμφάνιση των οπτικών δικτύων (δίκτυα οπτικών ινών), η ταχύτητα μετάδοσης και η αξιοπιστία των ενσύρματων δικτύων έχουν αυξηθεί σημαντικά, με συνέπεια η ποικιλία των υπηρεσιών που προσφέρονται να έχει μεγαλώσει ακόμα περισσότερο (π.χ, βίντεο, εικόνα υψηλής ποιότητας και εφαρμογές ήχου). Αντίθετα, η χρήση του αέρα ως μέσου μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα οδηγεί σε περιορισμένο εύρος ζώνης (*bandwidth*) του καναλιού, πράγμα το οποίο σημαίνει περιορισμένη ταχύτητα μετάδοσης, καθώς και υψηλό ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων στη μετάδοση, πράγμα που δεν είναι αποδεκτό από τις περισσότερες εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, οι εφαρμογές που υποστηρίζονταν μέχρι σήμερα από τα ασύρματα κυψελωτά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αφορούν κυρίως μεταδόσεις φωνής και δεδομένων χαμηλού ρυθμού.

Παρ' όλ' αυτά, οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, ειδικά όσον αφορά στην ταχύτητα και στην ποιότητα της μετάδοσης, έχουν κάνει δυνατή την υποστήριξη πολύ περισσότερων εφαρμογών. Αυτές οι εξελίξεις περιλαμβάνουν:

- Την αύξηση της ταχύτητας (*capacity*) των ασύρματων καναλιών, χάρη στην βελτίωση των τεχνολογιών για τους ασύρματους πομπούς και δέκτες.
- Την αύξηση του αριθμού των χρηστών που μπορούν να υποστηριχθούν ταυτόχρονα ανά γεωγραφική περιοχή εξαιτίας των νέων μεθόδων πολυπλεξίας, συμπίεσης και κωδικοποίησης φωνής.
- Την μείωση της ισχύος μετάδοσης, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη ανεξαρτησία για τα ασύρματα τερματικά.
- Την αύξηση της αξιοπιστίας μετάδοσης με ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.
- Την εξέλιξη των ασύρματων συσκευών σε απλούστερα και πιο εύχρηστα μοντέλα.
- Την ομαλή διασύνδεση με τα ψηφιακά ενσύρματα δημόσια (π.χ., *PSTN*, *ISDN*) ή ιδιωτικά (*Ethernet*) δίκτυα.
- Την ενσωμάτωση μεθόδων κρυπτογραφίας, με άμεσο αποτέλεσμα την ασφάλεια των επικοινωνιών.
- Την μείωση του συνολικού κόστους για την κατασκευή και υποστήριξη ενός ασύρματου δικτύου. [1]

Χάρη στα παραπάνω τεχνολογικά επιτεύγματα, σήμερα επικρατεί η τάση ολοκλήρωσης πολλαπλών εφαρμογών και η ταυτόχρονη παροχή τους στους χρήστες. Χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα δικτύου είναι το *GSM*, το οποίο αν και αρχικά σχεδιάστηκε για την υποστήριξη κινητής τηλεφωνίας, έχει ήδη εξελιχθεί και με την προσθήκη νέων τεχνικών ασύρματης μετάδοσης μέσω του *GPRS* (*General Packet Radio Service*) [2] και του πρωτοκόλλου *WAP* (*Wireless Application Protocol*) είναι σε θέση να υποστηρίξει ταυτόχρονα μετάδοση φωνής και δεδομένων, παρέχοντας ήδη στους χρήστες την δυνατότητα πρόσβασης στο Internet [3]. Μάλιστα, η προοπτική χρήσης της τεχνολογίας *EDGE* (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*) στα *GSM* δίκτυα είναι αρκετά υποσχόμενη και όσον αφορά στην μετάδοση κινούμενων εικόνων και βίντεο, έστω και χαμηλής ποιότητας. Παράλληλα, στον τομέα των *WLANS*

(*Wireless Local Area Networks*, Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα), τα πρότυπα 802.11 [4] και *HIPERLAN* [5] προδιαγράφουν δίκτυα υψηλών ταχυτήτων, επιτρέποντας στους χρήστες να επικοινωνούν με υψηλή ποιότητα, ανταλλάσσοντας ταυτόχρονα δεδομένα, ήχο, φωνή, εικόνα και βίντεο.

Τα παραπάνω τεχνολογικά επιτεύγματα στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες όμως δεν είναι ικανά από μόνα τους για να υποστηρίξουν τις νέες εφαρμογές. Οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές και τα υπάρχοντα πρωτόκολλα έχουν σχεδιασθεί ειδικά για να υποστηρίζουν ικανοποιητικά τις εφαρμογές φωνής και δεδομένων χαμηλού ρυθμού που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται η σχεδίαση ενός νέου δικτύου, τόσο σε επίπεδο αρχιτεκτονικής όσο και σε επίπεδο πρωτοκόλλων. Μ' αυτό τον τρόπο, οι νέες εφαρμογές θα υποστηριχθούν ικανοποιητικά και οι πόροι του δικτύου θα χρησιμοποιούνται αποδοτικά.

Η τεχνική *ATM* μπορεί να λύσει πολλά από τα προβλήματα προς αυτή την κατεύθυνση. Η τεχνική αυτή, η οποία περιγράφεται εν συντομία στο επόμενο υποκεφάλαιο, έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται σε διαφορετικές συνθήκες κίνησης και απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας (*Quality of Service (QoS) requirements*), κι έτσι μπορεί να υποστηρίξει μια μεγάλη ποικιλία από εφαρμογές. Το γεγονός, πάντως, ότι η αρχική σχεδίαση της *ATM* τεχνικής δεν περιελάμβανε την υποστήριξη ασύρματων δικτύων, κάνει απαραίτητη την ύπαρξη κάποιων αλλαγών σε σχέση με την ενσύρματη *ATM* υλοποίηση.

1.2 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τα ασύρματα δίκτυα ποικίλουν ανάλογα με την εμβέλειά τους, την αρχιτεκτονική τους, το είδος τους (δημόσια ή ιδιωτικά), τις εφαρμογές που υποστηρίζουν, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν, το εύρος ζώνης που λειτουργούν, την παρεχόμενη ποιότητα μετάδοσης και την υποστήριξη μετακίνησης των χρηστών. Αρκετές κύριες κατηγορίες ασυρμάτων δικτύων μπορούν να διακριθούν:

- **Δίκτυα Ασύρματης Τηλεφωνίας**

Παρέχουν περιορισμένη εμβέλεια, άρα και μικρή ισχύ εκπομπής των τηλεφώνων, ανέχονται μικρές ταχύτητες στην κίνηση των χρηστών και υποστηρίζουν αποκλειστικά τηλεφωνία (φωνή).

- **Κυψελωτά Δίκτυα Φωνής**

Χαρακτηρίζονται από ευρεία (δημόσια) κάλυψη, επιτρέπουν μεγάλες ταχύτητες στην κίνηση των χρηστών και υποστηρίζουν κυρίως τηλεφωνία (φωνή) ή ανταλλαγή μικρών μηνυμάτων (*Short Message Service, SMS*). Στα κυψελωτά δίκτυα, η γεωγραφική περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε κυψέλες (*cells*), κάθε μια από τις οποίες εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης.

- **Κυψελωτά Δίκτυα Δεδομένων**

Η ταχεία ανάπτυξη και εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων φωνής ανέδειξε, ουσιαστικά, τα πλεονεκτήματα της κυψελωτής μετάδοσης. Η ανάπτυξη, ωστόσο, εύχρηστων φορητών υπολογιστών (φορητοί υπολογιστές, *PDA's, Palmtops* κοκ) και η ανάγκη των μετακινούμενων χρηστών για πρόσβαση στις δημόσιες υποδομές και αργότερα στο *Internet* οριοθέτησε την αναγκαιότητα μεταφοράς δεδομένων από κυψελωτά συστήματα. Στο [14] παρουσιάζεται αναλυτική επισκόπηση των συστημάτων και τεχνολογιών κυψελωτής μετάδοσης δεδομένων.

- **Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα Δεδομένων**

Αν κάποιος έθετε το απλό ερώτημα: «ποιο είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημα και ποιο το σημαντικότερο μειονέκτημα των κυψελωτών συστημάτων μετάδοσης» η απάντηση θα μπορούσε να είναι απλή, τουλάχιστον όσο αφορά τα συστήματα δεύτερης γενιάς. Το ισχυρότερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα που έχουν οι χρήστες να κινούνται και να περιάγονται (*roaming*), ενόσω εξυπηρετούνται από το δίκτυο. Ως σημαντικότερο μειονέκτημα θεωρούνται οι μικρές ταχύτητες μετάδοσης στην ασύρματη ζεύξη, γεγονός που μειώνει σημαντικά το φάσμα των υπηρεσιών που μπορούν να ενεργοποιήσουν οι χρήστες. Αντίστροφα χαρακτηριστικά ισχύουν στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLANs*). Τα *WLANs* δεν έχουν στόχο απλά να αντικαταστήσουν τα ενσύρματα *LANs* ή να ανταγωνιστούν τα κυψελωτά δίκτυα. Αντίθετα, ήρθαν να καλύψουν: (α) τις ανάγκες μετακίνησης χρηστών μέσα σε περιορισμένο, γεωγραφικά, χώρο, όπως κτίρια (π.χ., νοσοκομεία αποθήκες), εμπορικά ή αθλητικά κέντρα, πανεπιστημιοπόλεις, βιομηχανικές ζώνες, λιμάνια, αεροδρόμια, σταθμούς λεωφορείων, (β) να προσφέρουν πρόσβαση σε χρήστες ή ομάδες χρηστών σε σημεία όπου δεν μπορούν να υλοποιηθούν ενσύρματες συνδέσεις, και (γ) να προσφέρουν δυναμικά ασύρματη ζεύξη μεταξύ φορητών συσκευών που χρειάζονται να επικοινωνήσουν.

1.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΤΜ

Ο συνδυασμός των ασύρματων δικτύων και της τεχνολογίας *ΑΤΜ* έχει στόχο να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα της ασύρματης επικοινωνίας και την ελευθερία στην μετακίνηση των χρηστών, με την δυνατότητα εξυπηρέτησης διαφορετικών ειδών κίνησης και την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας που παρέχει το *ΑΤΜ*. Ο συνδυασμός αυτός δεν είναι εύκολος, γιατί το *ΑΤΜ* έχει σχεδιασθεί για περιβάλλοντα πολύ διαφορετικά από τα ασύρματα δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, το *ΑΤΜ* υποθέτει:

- σταθερούς χρήστες,
- άφθονο και σταθερό εύρος ζώνης, το οποίο είναι δυνατόν να κατανομηθεί δυναμικά, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες των διαφόρων συνδέσεων,
- αμφίδρομη (*full duplex*) και σημείου-προς-σημείο (*point-to-point*) μετάδοση,
- πολύ καλή ποιότητα μετάδοσης, και για το λόγο αυτό οι ενσωματωμένες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης των λαθών είναι περιορισμένες, και
- μικρή επιβάρυνση του εύρους ζώνης από το φυσικό επίπεδο (*physical overhead*).

Αντίθετα, στο ασύρματο περιβάλλον,

- η μετακίνηση των χρηστών θεωρείται δεδομένη,
- το διαθέσιμο εύρος ζώνης της ραδιοεπαφής είναι μικρό και μεταβαλλόμενο, ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού,
- η μετάδοση είναι συνήθως ημιαμφίδρομη (*half duplex*), λόγω της έλλειψης διαθέσιμων συχνοτήτων στη ραδιοεπαφή, και σημείου-προς-πολλά σημεία (*point-to-multipoint*), με αποτέλεσμα να απαιτείται ειδικότερη διευθυνσιοδότηση,
- η ποιότητα μετάδοσης είναι κακή, και για τον λόγο αυτό απαιτούνται ανεπτυγμένες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης των λαθών, και
- η επιβάρυνση από το φυσικό επίπεδο είναι μεγάλη, κυρίως λόγω της καθυστέρησης συγχρονισμού πομπού και δέκτη. [20]

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι η απόδοση της ραδιοεπαφής είναι καθοριστική για την συνολική απόδοση ενός ασύρματου *ΑΤΜ* δικτύου. Η αποδοτική λειτουργία όλου του υπόλοιπου δικτύου δεν έχει κανένα νόημα αν η επικοινωνία στη ραδιοεπαφή είναι προβληματική. Είναι λοιπόν απαραίτητος ο σχεδιασμός συγκεκριμένων τεχνικών σε πολλούς τομείς, ώστε να εξασφαλισθεί ποιότητα

υπηρεσίας ανάλογη με αυτή των σταθερών *ATM* δικτύων, σε όλο το μήκος και καθ' όλη τη διάρκεια των *ATM* συνδέσεων. Τρεις βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται σε ένα ασύρματο *ATM* σύστημα είναι:

- 1) αποδοτική υποστήριξη όλων των *ATM* κλάσεων στο ασύρματο κανάλι.
- 2) περιορισμός των επιπτώσεων του μεγάλου ποσοστού λαθών.
- 3) αποφυγή απώλειας μεγάλου αριθμού κελιών κατά τη διαδικασία αλλαγής σταθμού βάσης.

Η πρώτη προϋπόθεση ικανοποιείται κύρια με ένα πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης, ικανό να υπηρετεί όλες αυτές τις κλάσεις. Η δεύτερη προϋπόθεση ικανοποιείται μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου λαθών, προσαρμοσμένου στις ειδικές συνθήκες του ασύρματου *ATM*. Η τρίτη προϋπόθεση ικανοποιείται με μια διαδικασία αλλαγής σταθμού βάσης που θα περιορίζει τις απώλειες.

1.3.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Στα ασύρματα δίκτυα όλα τα κινητά τερματικά μιας κυψέλης μοιράζονται το κοινό μέσο μετάδοσης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός εξελιγμένου πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης, το οποίο θα συνδυάζει υποστήριξη των *ATM* κλάσεων όπως αυτές ορίζονται από τις τυποποιήσεις για το *ATM*, και αποδοτική χρησιμοποίηση του περιορισμένου εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού. Η εξέλιξη των τεχνικών ψηφιακής κωδικοποίησης (*digital coding techniques*) και η συνεχής αύξηση στην πυκνότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν κάνει δυνατή την χρήση τριών ευρύτατα γνωστών τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης, πάνω στις οποίες βασίζονται τα περισσότερα *MAC* πρωτόκολλα:

- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου (*Time Division Multiple Access, TDMA*).
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Συχνότητας (*Frequency Division Multiple Access, FDMA*).
- Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Κώδικα (*Code Division Multiple Access, CDMA*).

Όσον αφορά στα ασύρματα *ATM* δίκτυα, η έλλειψη διαθέσιμων συχνοτήτων και η ανάγκη για δυναμική δέσμευση του εύρους ζώνης, ειδικά όταν πρόκειται να εξυπηρετηθούν και συνδέσεις μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης, κάνει μη αποδοτική την χρήση της *FDMA*. Οι τεχνικές *TDMA* και *CDMA* παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την *FDMA*. Με την τεχνική *TDMA*, το ασύρματο κανάλι

διαιρείται σε χρονοθυρίδες (*time slots*), οι οποίες μπορούν να διανέμονται δυναμικά στους χρήστες, ανάλογα με τις τρέχουσες ανάγκες τους. Η αντιμετώπιση αυτή οδηγεί σε καλύτερη χρήση του καναλιού. Με την τεχνική *CDMA*, μία συχνότητα μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα από πολλούς χρήστες, χάρη στο γεγονός ότι τα διαφορετικά σήματα των χρηστών χωρίζονται με την χρήση διαφορετικών κωδικών διαμόρφωσης (*modulation codes*). Άλλα πλεονεκτήματα των τεχνικών *TDMA* και *CDMA* είναι [21]:

- Πιο ομαλή συνύπαρξη και επικοινωνία του ασύρματου δικτύου με τα ψηφιακά ενσύρματα δίκτυα.
- Δυνατότητα ολοκλήρωσης φωνής και δεδομένων.
- Δυνατότητα για μελλοντική αύξηση της ταχύτητας του ασύρματου καναλιού, με την συνεχή εξέλιξη των κωδικοποιητών φωνής.
- Μικρότερη απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης.
- Μικρότερη πολυπλοκότητα συστήματος.

1.3.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΛΑΘΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ασύρματο κανάλι παρουσιάζει αυξημένο ποσοστό λαθών και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού ελέγχου, ο οποίος θα μειώνει τις επιπτώσεις τους στην απόδοση του συστήματος. Η δημιουργία ενός μηχανισμού ελέγχου λαθών ο οποίος θα εξασφαλίζει χαμηλή πολυπλοκότητα και κατανάλωση εύρους ζώνης, ενώ ταυτόχρονα θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας, δεν είναι εύκολη. Οι δύο σημαντικότερες υποψήφιες τεχνικές είναι η Αυτόματη Αίτηση Επαναμετάδοσης (*Automatic Repeat request, ARQ*), όπου σε περίπτωση λάθους ένας αριθμός κελιών επαναμεταδίδεται, και η Ενσωματωμένη Διόρθωση Λάθους (*Forward Error Correction, FEC*), σύμφωνα με την οποία, σε κάθε κυψελίδα ενσωματώνεται πληροφορία ικανή να οδηγήσει σε διόρθωση του λάθους στον παραλήπτη χωρίς να χρειασθεί επαναμετάδοση [22].

1.3.3 ΑΛΛΑΓΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΣΗΣ (HANDOVER)

Σε ένα κυψελωτό ασύρματο δίκτυο, όπως είναι συνήθως ένα ασύρματο δίκτυο *ATM*, η κίνηση των τερματικών απαιτεί αλλαγή σταθμού βάσης, όταν η ένταση του σήματος από και προς τον συνδεδεμένο σταθμό πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο που φανερώνει ότι η σύνδεση είναι προβληματική. Η αλλαγή σταθμού βάσης προϋποθέτει την αλλαγή της δρομολόγησης των ενεργών συνδέσεων του κινητού

τερματικού μέσου του νέου σταθμού βάσης, κάτι που φυσικά δεν υποστηρίζεται από το τυποποιημένο *ATM*, το οποίο δεν λάμβανε υπ' όψη του τέτοιες απαιτήσεις. Η μόνη λύση, σύμφωνα με τις υπάρχουσες τυποποιήσεις, είναι η κατάργηση όλων των συνδέσεων και η επανεγκατάστασή τους με βάση τη νέα δρομολόγηση. Μια τέτοια όμως ενέργεια θα προκαλούσε απαράδεκτες καθυστερήσεις και απώλειες πακέτων, με αποτέλεσμα την απότομη υποβάθμιση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Ειδικά σε ένα τοπικό ασύρματο δίκτυο, όπου οι κυψέλες είναι μικρές και οι αλλαγές σταθμού βάσης συχνές, οι επιπτώσεις είναι ακόμα μεγαλύτερες.

Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η επέκταση του τυποποιημένου *ATM* ώστε να υποστηρίξει την μετακίνηση των τερματικών σε ένα ασύρματο *ATM* δίκτυο. Η επέκταση αυτή περιλαμβάνει επιπλέον σηματοδότηση, συνήθως μεταξύ των τερματικών και ενός κεντρικού εξυπηρετητή, ο οποίος ρυθμίζει και υλοποιεί την αλλαγή της δρομολόγησης των ενεργών συνδέσεων. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές προτάσεις για υλοποίηση της διαδικασίας αλλαγής σταθμού βάσης, με στόχο κυρίως την μείωση των απωλειών κυψελίδων, ή/και την μείωση του χρόνου που απαιτείται για την αλλαγή [23-25].

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Λόγω των ιδιοτήτων που αναφέραμε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η ραδιοεπαφή είναι το «αδύνατο σημείο» ενός ασύρματου *ATM* δικτύου. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο ένα εξελιγμένο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης, ικανό να παρέχει υποστήριξη σε όλες τις κλάσεις κίνησης του *ATM*, όπως αυτές ορίστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, σε συνδυασμό με αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επιπλέον, το πρωτόκολλο αυτό θα πρέπει να προσαρμόζεται και στις συχνές μεταβολές της ποιότητας του καναλιού.

Τα πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης χωρίζονται γενικά σε πέντε κατηγορίες [26]:

- α. Σταθερής δέσμευσης
- β. Τυχαίας πρόσβασης
- γ. Κεντρικής προσαρμοζόμενης δέσμευσης
- δ. Κατανομημένης προσαρμοζόμενης δέσμευσης
- ε. Μικτής πρόσβασης.

Οι τεχνικές σταθερής δέσμευσης διαθέτουν ένα μόνιμο υποκανάλι σε κάθε σύνδεση, και έχουν πολύ καλή απόδοση για συνδέσεις σταθερού ρυθμού μετάδοσης. Όμως η απόδοσή τους πέφτει δραματικά όταν πρόκειται να υποστηρίξουν συνδέσεις

μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης, τόσο όσον αφορά στην προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας προς τις συνδέσεις, όσο και στη χρησιμοποίηση του καναλιού.

Οι συνδέσεις μεταβλητού ρυθμού εξυπηρετούνται πιο αποδοτικά με την χρήση πρωτοκόλλων τυχαίας πρόσβασης. Τυπικό παράδειγμα είναι το πρωτόκολλο *ALOHA*, το οποίο επιτρέπει στις συνδέσεις την κατά βούληση πρόσβαση στο κανάλι [27]. Σε περίπτωση σύγκρουσης, τα πακέτα πρέπει να επαναμεταδοθούν. Το βασικό πλεονέκτημα του *ALOHA* είναι η απλότητά του, ενώ το βασικό του μειονέκτημα η αστάθεια, ειδικά σε συνθήκες υψηλού φόρτου. Για την αύξηση της μέγιστης απόδοσης (*throughput*) του συστήματος σε κατάσταση ευστάθειας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές επίλυσης των συγκρούσεων.

Οι τεχνικές κεντρικής προσαρμοζόμενης δέσμησης δεσμεύουν μεταβλητό εύρος ζώνης, ανάλογο με τις εκάστοτε απαιτήσεις των συνδέσεων. Αντίθετα όμως με τις τεχνικές τυχαίας πρόσβασης, η διαδικασία μετάδοσης περιλαμβάνει δύο στάδια, την *δέσμηση* και την *μετάδοση* (π.χ., [37]). Στο στάδιο δέσμησης, ο χρήστης ενημερώνει το σύστημα για τις τρέχουσες ανάγκες του σε εύρος ζώνης, συνήθως μέσω κάποιου πρωτοκόλλου τυχαίας πρόσβασης. Στο στάδιο της μετάδοσης γίνεται η πραγματική μετάδοση των δεδομένων του χρήστη χωρίς ανταγωνισμό, με βάση την δέσμηση που έγινε από το σύστημα. Τα πρωτόκολλα προσαρμοζόμενης δέσμησης είναι σχετικά πολύπλοκα αλλά έχουν πολύ καλή απόδοση, παρ' όλο που μέρος του εύρους ζώνης καταναλώνεται στην φάση της δέσμησης.

Στα πρωτόκολλα κατανεμημένης προσαρμοζόμενης δέσμησης ο κάθε χρήστης αποφασίζει για την κίνηση που θα εισάγει στο δίκτυο, με βάση πληροφορίες που είναι γνωστές σε όλους τους χρήστες (π.χ., τον φόρτο του δικτύου).

Οι τεχνικές μεικτής πρόσβασης συνδυάζουν στοιχεία από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν παραπάνω και σχεδιάζονται με στόχο την αποδοτική προσαρμογή σε διαφορετικά είδη κίνησης [22].

Τα περισσότερα προτεινόμενα στη βιβλιογραφία πρωτόκολλα για την ραδιοεπαφή ενός ασύρματου *ATM* δικτύου βασίζονται σε κάποια από τις γνωστές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, *FDMA*, *CDMA* ή *TDMA*, και η πλειοψηφία των πρωτοκόλλων σε αυτό τον ερευνητικό χώρο χρησιμοποιεί ένα προσαρμοζόμενο σχήμα *TDMA*, λόγω της ικανότητάς του να προσαρμόζεται στις ανάγκες κάθε σύνδεσης, δεσμεύοντας περισσότερες ή λιγότερες χρονοθυρίδες. Πέρα από αυτή τη γενική επιλογή, τα προτεινόμενα *TDMA* πρωτόκολλα διαφέρουν στην τεχνική που υλοποιεί αυτή την προσαρμοστικότητα. Οι τρεις βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται, μεμονωμένα ή σε συνδυασμούς, είναι ο *ανταγωνισμός*, η *δέσμηση* και η *σάρωση*.

Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στον ανταγωνισμό (π.χ., [28]) είναι απλά στην υλοποίησή τους, απαιτούν ελάχιστο *time scheduling* (χρονοπρογραμματισμός) και έχουν καλή απόδοση για χαμηλή κίνηση, λόγω των μικρών καθυστερήσεων όταν ο αριθμός των συγκρούσεων είναι περιορισμένος. Παρόλ' αυτά, η απόδοσή τους είναι αβέβαιη σε συνθήκες υψηλού φόρτου, όπου ο μεγάλος αριθμός συγκρούσεων μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε κατάρρευση. Ειδικά σε δίκτυα *ATM*, τα πρωτόκολλα αυτά δεν έχουν τη δυνατότητα διαχωρισμού των διαφορετικών ειδών κίνησης, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να παρέχουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας όπου αυτό χρειάζεται.

Μια άλλη κατηγορία πρωτοκόλλων χρησιμοποιεί τεχνικές δέσμευσης, κύρια μέσω κύκλων αίτησης/δέσμευσης, ώστε να κατανέμει δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης στις διάφορες συνδέσεις, με βάση τις εκάστοτε ανάγκες τους και τον συνολικό φόρτο. Ένα αντιπροσωπευτικό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας περιγράφεται στο [29]. Σύμφωνα με αυτό, ο χρόνος χωρίζεται σε σταθερού μήκους πλαίσια (*time frames*) και κάθε πλαίσιο υποδιαιρείται σε ένα υποπλαίσιο αιτήσεων και ένα υποπλαίσιο δεδομένων. Στο υποπλαίσιο αιτήσεων έχουν πρόσβαση οι κινητοί χρήστες μέσω ενός απλού πρωτοκόλλου *ALOHA*, ώστε να δηλώσουν τις ανάγκες μετάδοσής τους, ενώ το υποπλαίσιο δεδομένων χρησιμοποιείται για μετάδοση πραγματικής πληροφορίας χρήστη. Η δέσμευση χρονοθυρίδων δεδομένων πραγματοποιείται από τον σταθμό βάσης με βάση κάποιον *scheduling* αλγόριθμο ενώ τα κινητά τερματικά ενημερώνονται μέσω μηνυμάτων ελέγχου. Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων είναι πιο πολύπλοκη και εισάγει μερικές επιπλέον καθυστερήσεις, λόγω της απαιτούμενης φάσης δέσμευσης. Από την άλλη όμως, τα πρωτόκολλα αυτά είναι πολύ πιο σταθερά και μπορούν να εγγυηθούν μια προβλέψιμη ποιότητα υπηρεσίας, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στα ασύρματα *ATM* δίκτυα. Η απόδοσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον *scheduling* αλγόριθμο που χρησιμοποιούν για την δέσμευση του εύρους ζώνης. Αρκετοί από τους *scheduling* αλγορίθμους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία (π.χ., [30]), διαχωρίζουν τις συνδέσεις σε πραγματικού χρόνου και μη πραγματικού χρόνου -ένα ελάχιστο εύρος ζώνης δεσμεύεται για τις συνδέσεις μη πραγματικού χρόνου, ενώ με το υπόλοιπο εύρος ζώνης γίνεται προσπάθεια να εξυπηρετηθούν οι συνδέσεις πραγματικού χρόνου όσο το δυνατόν πιο γρήγορα.

Η τρίτη κατηγορία πρωτοκόλλων χρησιμοποιεί την προσαρμοζόμενη σάρωση για να κατανείμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης (π.χ., [31]). Μια χρονοθυρίδα δίνεται περιοδικά σε κάθε σύνδεση, χωρίς προηγούμενη αίτηση, με βάση την αναμενόμενη κίνησή της. Σε σύγκριση με τα πρωτόκολλα δέσμευσης, τα πρωτόκολλα αυτά είναι

απλούστερα, μια και δεν υπάρχει φάση δέσμευσης, αλλά η απόδοσή τους εξαρτάται από τον αλγόριθμο που καθορίζει την περίοδο σάρωσης για κάθε σύνδεση. Περίοδος σάρωσης μικρότερη από την απαιτούμενη έχει σαν αποτέλεσμα πολλές χρονοθυρίδες να μένουν ανεκμετάλλευτες, οδηγώντας σε μικρή χρησιμοποίηση του καναλιού. Αντίθετα, μεγάλη περίοδος σάρωσης έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση των περιεχομένων των καταχωρητών, αυξημένες καθυστερήσεις και μη ικανοποιητική ποιότητα προσφερόμενης υπηρεσίας. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα δύσκολο για συνδέσεις μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης. Αρκετά πρωτόκολλα χρησιμοποιούν έναν προσαρμοζόμενο αλγόριθμο, ο οποίος αποφασίζει για την περίοδο σάρωσης κάθε σύνδεσης με βάση τον συνολικό φόρτο, την αναμενόμενη κίνηση κάθε σύνδεσης, και την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας.

Το TDMA πρωτόκολλο που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής ανήκει στην κατηγορία της κεντρικής προσαρμοζόμενης δέσμευσης.

1.5 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Τα ασύρματα δίκτυα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς έχουν σκοπό να ενσωματώσουν και να υποστηρίξουν λειτουργίες μιας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών πολυμέσων, που απαιτούν αρκετά μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από αυτόν που έχουν επιτευχθεί μέχρι τώρα (π.χ. η ταχύτητα κάτω ζεύξης (*downlink*) για το διαδίκτυο σε κινητές συνδέσεις είναι μεταξύ 9.6Kbps για τα κινητά 2^{ης} γενιάς, περίπου 200Kbps (τυπικά 384Kbps) για *DoCoMo* και *Vodafone* κινητών τηλεφώνων 3^{ης} γενιάς και 2.4 Mbps για την *KDDI/AU CDMA 2000-1x-WIN* υπηρεσία. Βέβαια, στην πράξη οι ρυθμοί μετάδοσης είναι σαφώς μικρότεροι, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη κίνηση φορτίου, πολυπληθείς περιοχές ή όταν το δίκτυο βρίσκεται σε συμφόρηση). Στα κινητά τέταρτης γενιάς η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων θα πλησιάζει τα 20Mbps [38].

Θέματα που αφορούν στο QoS, δηλαδή ο προβλεπόμενος ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση παράδοσης μηνύματος, το υψηλό κόστος του συστήματος, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα ασύρματα δίκτυα τρίτης γενιάς. Η αποδοτική και με χαμηλό κόστος διαδίκτυωση των ασύρματων κινητών δικτύων είτε μεταξύ τους είτε με σταθερά και άλλων τύπων ασύρματα δίκτυα όπως τα δορυφορικά, οδηγεί σε μια νέα γενιά δικτύων.

Ένα αποδοτικό MAC πρωτόκολλο θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των παραπάνω στόχων, εξυπηρετώντας τις διαφορετικές απαιτήσεις σε πρόσβαση και υπηρεσίες που έχουν σήμερα οι χρήστες των ασύρματων δικτύων. Το MAC

πρωτόκολλο ολοκληρώνει διαφορετικούς τύπους κίνησης και, αυξάνοντας την χωρητικότητα του συστήματος, μειώνει το κόστος του.

Σε αυτή την εργασία εξετάζουμε την απόδοση *MAC* πρωτοκόλλων βασισμένων σε πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (*TDMA*), που υποστηρίζουν πρόσβαση σε ασύρματα δίκτυα για εφαρμογές πολυμέσων. Τα *TDMA* πρωτόκολλα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την τεχνική *duplexing*. Παράδειγμα είναι τα *TDMA* με *Time Division Duplex (TDMA-TDD)* ή *TDMA* με *Frequency Division Duplex (TDMA-FDD)* [39].

Ένας μεγάλος αριθμός *TDMA-FDD MAC* πρωτοκόλλων έχει προταθεί στη βιβλιογραφία (π.χ., [40-43]). Ένα από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το *CPRMA* [43]. Η σχεδίασή του βασίστηκε στην ιδέα να παραχωρεί τις μεταδόσεις σε κάθε χρονοθυρίδα στο τερματικό με την πιο επείγουσα ανάγκη να μεταδώσει. Το *CPRMA* βασίζεται στην λογική της αίτησης-πρόσβασης με περιόδους κράτησης βασιζόμενες στον ανταγωνισμό και επεκτείνει την έννοια του *PRMA* [28] στην κίνηση πολυμέσων. Η κίνηση των πολυμέσων προσαρμόζεται στο πρωτόκολλο μέσω μιας διαδικασίας *polling*. Κάθε τερματικό δεσμεύει χρονοθυρίδες με βάση έναν αλγόριθμο, που λαμβάνει υπ' όψη του διαφορετικές παραμέτρους για κάθε χρήστη όπως την επιτρεπτή απώλεια πακέτων, τη μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, τις απαιτήσεις σε *bandwidth* κ.τ.λ. Παρ' όλ' αυτά, η σωστή εκτέλεση του πρωτοκόλλου είναι βασισμένη σε ένα σενάριο «καλής περίπτωσης», στο οποίο οι καθυστερήσεις μετάδοσης είναι πάντα τόσο μικρές, ώστε ο σταθμός βάσης (*base station, BS*) να έχει το χρόνο ώστε να καθορίζει σε κάθε χρονοθυρίδα την καλύτερη στρατηγική μετάδοσης, για να βελτιστοποιήσει την χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης του καναλιού, τις καθυστερήσεις και τις απώλειες πακέτων του συστήματος.

Ένα άλλο γνωστό *TDMA-FDD* πρωτόκολλο είναι το *Dynamic Packet Reservation Multiple Access (DPRMA)*. Αυτό έχει εμπνευστεί από το πρωτόκολλο *PRMA* και περιέχει διάφορες τροποποιήσεις όσον αφορά στο *PRMA*, προκειμένου να ενσωματώσει την κυκλοφορία πολυμέσων σε ένα ασύρματο δίκτυο. Όπως τα *CPRMA*, το *DPRMA* είναι βασισμένο στη λογική της αίτησης-ανάθεσης και χρησιμοποιεί *slotted Aloha* για κρατήσεις στις περιόδους ανταγωνισμού. Οι χρονοθυρίδες στο *DPRMA* θυρίδες ανατίθενται στους χρήστες ανάλογα με το απαιτούμενο *bandwidth* από κάθε χρήστη. Ο χρήστης υποβάλλει αίτημα είτε για κάποιο αρχικό ρυθμό, είτε για αλλαγή ρυθμού τοποθετώντας το κατάλληλο *bit* αίτησης για κράτηση στην επικεφαλίδα του πακέτου αίτησης που στέλνει. Όλοι οι χρήστες μπορούν να υποβάλλουν αιτήσεις για κράτηση, οι αιτήσεις των χρηστών που μεταδίδουν κίνηση πραγματικού χρόνου (*real time*)

έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από τις αιτήσεις των *non-real-time* χρηστών. Παρόλ' αυτά, η χρήση διάφορων ρυθμών μετάδοσης στο *DPRMA* αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος χωρίς να εξασφαλίζει ότι το τερματικό θα αποκτήσει τον μέγιστο δυνατό αριθμό χρονοθυρίδων με βάση τις ανάγκες του. Οι χρήστες *video*, π.χ., χρειάζεται να καταλαμβάνουν άμεσα όλες τις χρονοθυρίδες που απαιτούν καθώς οι απαιτήσεις τους όσον αφορά στην απώλεια πακέτων είναι πολύ αυστηρές, ενώ η χρήση των ρυθμών μετάδοσης στο *DPRMA* εγγυάται μεν ότι το τερματικό θα εξυπηρετηθεί, αλλά μακροπρόθεσμα. Επίσης, στο *DPRMA* η χρήση ολόκληρων των χρονοθυρίδων (αντί για μίνι χρονοθυρίδες) για τις περιόδους ανταγωνισμού ταυτόχρονα με τη χρήση του ασταθούς πρωτοκόλλου πρόσβασης *slotted Aloha* μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη του περιορισμένου εύρους ζώνης στο ασύρματο δίκτυο, και να υποβιβάσει τη γενική απόδοση του συστήματος.

Οι τεχνικές *TDMA-FDD* χρειάζονται δύο ασύρματα κανάλια (σε αντιδιαστολή με τις *TDMA-TDD* τεχνικές που χρειάζονται μόνο ένα) αλλά παρέχουν μια γρηγορότερη μέθοδο για να καθορίσουν αν είναι απαραίτητη η επαναμετάδοση [39]. Για αυτόν τον λόγο, σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήσαμε την τεχνική *TDMA-FDD* στα πρωτόκολλα που εξετάσαμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

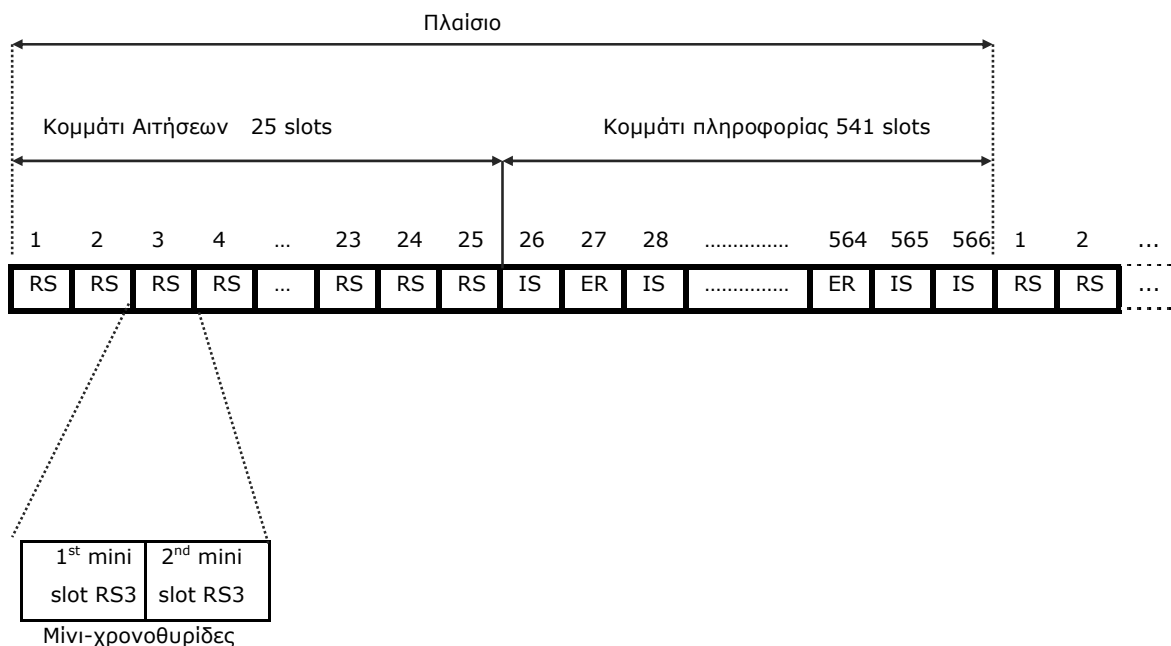
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση, αξιολόγηση και σύγκριση του προτεινόμενου αλγόριθμου κατανομής πόρων με έναν ιδανικό αλγόριθμο (ιδανικό, με την έννοια ότι εκμεταλλεύεται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο την ποιότητα του καναλιού κάθε χρήστη, σαν να γνωρίζει εκ των προτέρων ποια θα είναι αυτή). Τα αποτελέσματα της εργασίας μας οδηγούν στην πρόταση ενός MAC πρωτοκόλλου ικανού να επιτύχει απόδοση που θα προσεγγίζει την βέλτιστη, σε ένα ασύρματο TDMA δίκτυο 4^{ης} γενιάς, ενώ παράλληλα θα παρέχει το επιθυμητό QoS σε όλους τους χρήστες (συνδρομητές) πολυμέσων του δικτύου. Οι μετρικές απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η πιθανότητα απώλειας πακέτων βίντεο και φωνής, η μέση καθυστέρηση πακέτων βίντεο και φωνής, και η απόδοση (throughput) του δικτύου.

2.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου MAC πρωτοκόλλου όπως η δομή του πλαισίου του ασύρματου καναλιού (*channel frame*), οι ενέργειες των τερματικών βίντεο και φωνής, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού (*scheduling*) που εκτελεί ο σταθμός βάσης και οι αλγόριθμοι επίλυσης των συγκρούσεων ανάμεσα στα τερματικά. Έμφαση θα δοθεί στις δύο εκδόσεις των μηχανισμών κατανομής πόρων (προτεινόμενος, ιδανικός) που εκμεταλλεύονται την κατάσταση του καναλιού κάθε χρήστη.

2.2.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

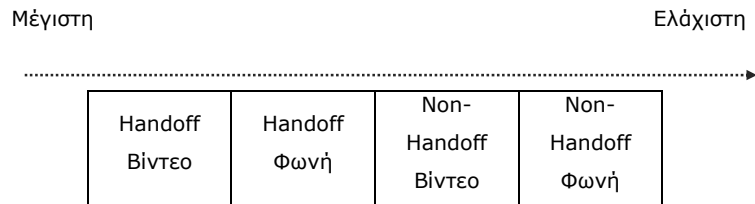
Ο χρόνος του καναλιού στις ζεύξεις διαιρείται σε πλαίσια χρόνου (*time frames*) ίσου μήκους. Η διάρκεια του πλαισίου επιλέγεται έτσι ώστε ένα τερματικό φωνής το οποίο βρίσκεται σε ομιλία (ενεργή κατάσταση, *talkspurt*) να γεννάει ακριβώς ένα πακέτο σε κάθε πλαίσιο χρόνου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το οποίο αναπαριστά ένα παράδειγμα της δομής των πλαισίων χρόνου του καναλιού, κάθε πλαίσιο χρόνου αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το *κομμάτι αιτήσεων* (*voice request interval*) και το δεύτερο μέρος είναι το *κομμάτι μετάδοσης της πληροφορίας* (*information interval*).



-Σχήμα 1. Παράδειγμα δομής πλαισίου.-

Η πρώτη σημαντική συνεισφορά της παρούσας εργασίας στα πλαίσια της επέκτασης των [10, 11] είναι η εισαγωγή *handoff* χρηστών στο σύστημα.

Οι πρώτες είκοσι πέντε χρονοθυρίδες του πλαισίου αποτελούν το κομμάτι των αιτήσεων και η καθεμία περιλαμβάνει δύο μίνι-χρονοθυρίδες αιτήσεων. Τα τερματικά που είναι χρήστες *handoff* (τερματικά που εισέρχονται στην παρούσα κυψέλη έχοντας εξέλθει από άλλη ενώ βρίσκονταν σε λειτουργία) έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα μετάδοσης από τους χρήστες που δεν είναι *handoff* (*non-handoff* χρήστες). Η επιμέρους σειρά προτεραιότητας μετάδοσης φαίνεται στο Σχήμα 2, και έχει επιλεγεί βάσει της αυστηρότητας του QoS για κάθε είδος κίνησης (π.χ., οι χρήστες βίντεο έχουν τις υψηλότερες απαιτήσεις σε QoS, με συνέπεια να έχουν πρώτη προτεραιότητα στην μετάδοση αιτήσεων). Ο λόγος που τα τερματικά *handoff* έχουν υψηλότερη προτεραιότητα είναι ότι η δυσaréσκεια ενός συνδρομητή του οποίου η κλήση τερματίζεται απότομα (*call termination*) ενώ κινείται από μια κυψέλη 1 σε μια κυψέλη 2 (λόγω έλλειψης πόρων του δικτύου στην κυψέλη 2) είναι σαφώς μεγαλύτερη από την δυσaréσκεια ενός χρήστη ο οποίος βρίσκεται στην κυψέλη 2 και επιχειρεί να καλέσει για πρώτη φορά (*call blocking*) [12, 13].



-Σχήμα 2. Προτεραιότητα Αιτήσεων ανά είδος Χρηστών.-

Απόλυτη προτεραιότητα πρόσβασης μέσα στις μίνι-χρονοθυρίδες του κομματιού αιτήσεων έχουν τα *handoff* τερματικά βίντεο, λόγω του πολύ υψηλού απαιτούμενου QoS που έχει η κίνηση βίντεο. Τα *handoff* τερματικά φωνής, που ακολουθούν στην ιεραρχία, αποκτούν πρόσβαση σε αυτές μόνο όταν τελειώσει ο ανταγωνισμός των *handoff* χρηστών βίντεο και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να αποκτήσουν πρόσβαση τα τελευταία σε ιεραρχία τερματικά που είναι τα *non-handoff* τερματικά φωνής, ή όταν τελειώσουν οι χρονοθυρίδες του κομματιού αιτήσεων στο πλαίσιο.

Μέσα στο κομμάτι μετάδοσης της πληροφορίας, κάθε χρονοθυρίδα (slot) «φιλοξενεί» ένα ακριβώς πακέτο σταθερού -ίδιου- μεγέθους, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορία βίντεο ή φωνής, και μια επικεφαλίδα.

Στο κομμάτι αιτήσεων, οι χρονοθυρίδες χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα, τις μίνι-χρονοθυρίδες (mini-slots). Κάθε μίνι-χρονοθυρίδα «φιλοξενεί» ένα ακριβώς μίνι-πακέτο σταθερού μεγέθους. Το μίνι-πακέτο είναι το πακέτο αίτησης που στέλνουν τα τερματικά όταν θέλουν να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι, και πρέπει για όλα τα τερματικά να περιλαμβάνει την ταυτότητα του τερματικού που ζητάει πρόσβαση. Για τα τερματικά βίντεο, η αίτηση πρέπει να περιλαμβάνει ακόμα το μέγεθος του μηνύματός τους σε πακέτα.

Καθώς κάνουμε την υπόθεση ότι όλες οι αλλαγές κατάστασης των τερματικών φωνής (ομιλία προς σιωπή και το αντίστροφο) συμβαίνουν στην αρχή κάθε πλαισίου, θέτουμε όλες τις χρονοθυρίδες του κομματιού αιτήσεων φωνής στην αρχή του πλαισίου για να ελαχιστοποιήσουμε την καθυστέρηση των πακέτων φωνής.

Με την χρήση περισσότερων της μίας μίνι-χρονοθυρίδων ανά χρονοθυρίδα αίτησης, γίνεται δυνατή η πιο αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για τις αιτήσεις. Υιοθετούμε την ιδέα που προτάθηκε στο [17] ότι *ορισμένες χρονοθυρίδες αιτήσεων μπορούν να μοιράζονται ανάμεσα σε τερματικά που μεταδίδουν διαφορετικά είδη κίνησης*. Έτσι, στην παρούσα εργασία, οι χρονοθυρίδες αιτήσεων μοιράζονται ανάμεσα σε τερματικά βίντεο και τερματικά φωνής (με απόλυτη προτεραιότητα στα τερματικά βίντεο, και συγκεκριμένα *handoff*, και μετά την επίλυση των συγκρούσεών τους θα ξεκινούν οι μεταδόσεις των επόμενων τερματικών σε ιεραρχία). Με το

μοίρασμα αυτό η χρήση του εύρους ζώνης γίνεται κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, καθώς εύρος ζώνης το οποίο ίσως χανόταν στην περίπτωση της γρήγορης επίλυσης του ανταγωνισμού των τερματικών βίντεο γίνεται εκμεταλλεύσιμο για τα τερματικά φωνής. *Η χρήση χρονοθυρίδων για ανταγωνισμό ανάμεσα στους χρήστες βίντεο αποτελεί την δεύτερη σημαντική διαφοροποίηση της παρούσας εργασίας σε σχέση με τα [10, 11], όπου το σύστημα εξεταζόταν σε ένα «στιγμιότυπο» όπου οι χρήστες βίντεο είχαν ήδη εισέλθει στο σύστημα, οπότε δεν συμμετείχαν στον ανταγωνισμό.*

Η προσέγγιση της διαφύλαξης ενός μικρού ποσοστού του εύρους ζώνης για να γίνονται κρατήσεις από το σύνολο των τερματικών βίντεο και φωνής βοηθάει στην διατήρηση της καθυστέρησης πρόσβασης των τερματικών στο κανάλι σε χαμηλά επίπεδα και προσφέρει αποδοτικότερη χρήση του καναλιού τόσο σε σχέση με τον PRMA αλγόριθμο [28] όσο και σε σχέση με αλγόριθμους που ακολουθούν την λογική του PRMA (π.χ., [40, 50]) -σε αυτούς τους αλγόριθμους, η απουσία χρονοθυρίδων αιτήσεων οδηγεί σε συνεχώς μειούμενη πιθανότητα εύρεσης διαθέσιμων χρονοθυρίδων πληροφορίας καθώς αυξάνεται η κίνηση, με συνέπεια να προκύπτουν μεγαλύτερες καθυστερήσεις πρόσβασης στο κανάλι για όλα τα τερματικά.

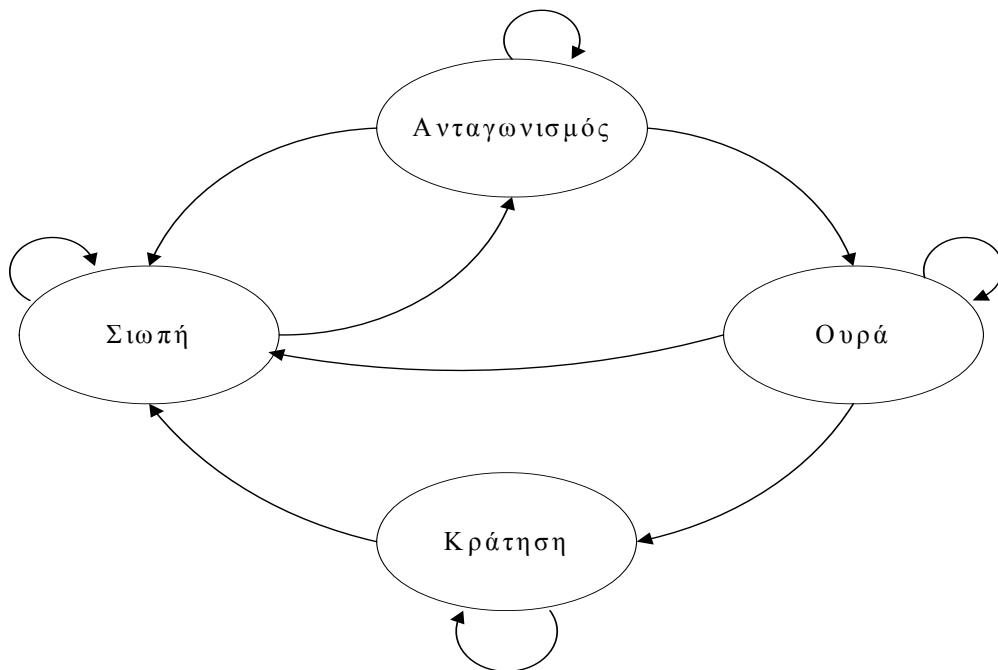
Τα τερματικά φωνής δεν εξαντλούν τις προσπάθειές τους για να κάνουν κράτηση μέσα στα κομμάτια αιτήσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω. *Κάθε άλλη χρονοθυρίδα που ανήκει στο κομμάτι μετάδοσης της πληροφορίας και η οποία στο τρέχον πλαίσιο δεν χρησιμοποιείται από κανένα τερματικό για την μετάδοση πακέτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσωρινά σαν μία επιπλέον χρονοθυρίδα αίτησης (extra request slot, ER slot) για τα τερματικά φωνής. Κάθε μία από τις επιπλέον χρονοθυρίδες αίτησης διαιρείται με τη σειρά της σε μίνι-χρονοθυρίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να «φιλοξενήσει» ένα ακριβώς πακέτο αίτησης, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις μόνιμες χρονοθυρίδες αίτησης (request slots). Στο τέλος του τρέχοντος πλαισίου, η επιπλέον χρονοθυρίδα αίτησης σταματάει να επιτελεί τον ρόλο αυτό και στο επόμενο πλαίσιο αποτελεί ξανά χρονοθυρίδα πληροφορίας. Η προσέγγιση αυτή προτάθηκε στο [32] και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στα [17, 33, 37].*

2.2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΤΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΙ ΦΩΝΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΣΗΣ

Τα τερματικά βίντεο και φωνής που έχουν πακέτα προς μετάδοση αλλά δεν έχουν κάνει κράτηση, ανταγωνίζονται για τους πόρους του καναλιού χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης (*random access protocol*) ώστε να μεταδώσουν τα πακέτα αιτήσεών τους κατά την διάρκεια των κομματιών αιτήσεων. Ο σταθμός βάσης μεταδίδει προς όλους (*broadcast*) ένα σύντομο δυαδικό σήμα ανάδρασης (*feedback*) στο τέλος κάθε μίνι-χρονοθυρίδας, ενημερώνοντας έτσι τα τερματικά για την παρουσία ή την απουσία σύγκρουσης στην συγκεκριμένη μίνι-χρονοθυρίδα (δυαδική ανάδραση, σύγκρουση ή μη-σύγκρουση, *collision versus non-collision*). Με δεδομένο το μικρό μέγεθος του σήματος ανάδρασης (λίγα *bits*) και το γεγονός ότι η καθυστέρηση διάδοσης μέσα σε μια μικροκυψέλη είναι αμελητέα, υποθέτουμε ότι η πληροφορία ανάδρασης είναι άμεσα διαθέσιμη στα τερματικά (δηλαδή, πριν την αρχή της επόμενης μίνι-χρονοθυρίδας). Ένα τερματικό το οποίο μεταδίδει επιτυχημένα το πακέτο αίτησής του, περιμένει μέχρι το τέλος του τρέχοντος κομματιού αιτήσεων για να μάθει ποια ή ποιες χρονοθυρίδες πληροφορίας θα του διατεθούν. Ένα τερματικό το οποίο δεν κατόρθωσε να μεταδώσει επιτυχημένα το πακέτο αίτησής του μέσα στα κομμάτια αιτήσεων του τρέχοντος πλαισίου, επιχειρεί να το επαναμεταδώσει στα κομμάτια αιτήσεων του επόμενου πλαισίου. Ένα τερματικό που έχει κάνει κράτηση χρονοθυρίδας πληροφορίας μεταδίδει ελεύθερα στη χρονοθυρίδα του σε συνεχόμενα πλαίσια, μέχρι να αποστείλει όλη την πληροφορία που επιθυμεί, εκτός βέβαια και αν χάσει την ή τις χρονοθυρίδες πληροφορίας λόγω κακού καναλιού, όσον αφορά στα τερματικά βίντεο. Επίσης, ένα τερματικό που αποτυγχάνει να μεταδώσει την αίτησή του επιχειρεί συνέχεια να την μεταδώσει ξανά σε συνεχόμενα πλαίσια, μέχρι να επιτύχει στην μετάδοση. Όμως, όταν τα πακέτα βίντεο και φωνής δεν μεταδοθούν πριν ξεπεράσει η καθυστέρησή τους το μέγιστο αποδεκτό όριο καθυστέρησης, απορρίπτονται (*video packet dropping* και *voice packet dropping* αντίστοιχα).

Για να εκχωρήσει τους πόρους του καναλιού, ο σταθμός βάσης διατηρεί έναν δυναμικό πίνακα από τα ενεργά τερματικά που βρίσκονται μέσα στην μικροκυψέλη. Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται μέσα στον πίνακα μπορεί να περιλαμβάνουν την ταυτότητα του τερματικού, το πλήθος των πόρων που έχουν διατεθεί στο συγκεκριμένο τερματικό, τις απαιτήσεις του τερματικού όσον αφορά στην ποιότητα της υπηρεσίας που του παρέχεται από το σύστημα. Όταν ένα πακέτο αίτησης

μεταδοθεί επιτυχημένα, ο σταθμός βάσης στέλνει μια επιβεβαίωση για την σωστή λήψη και τοποθετεί την αίτηση σε μια ουρά. Ο σταθμός βάσης εκχωρεί τους πόρους του καναλιού στο τέλος του εκάστοτε κομματιού αιτήσεων, εάν φυσικά οι πόροι που ζητούνται από την αίτηση είναι διαθέσιμοι. Αν οι πόροι δεν είναι διαθέσιμοι, η αίτηση παραμένει στην ουρά ή γίνεται μερική εκχώρηση πόρων όσον αναφορά τα τερματικά βίντεο. Τα τερματικά των οποίων οι αιτήσεις βρίσκονται σε αναμονή στην ουρά πρέπει να παρακολουθούν συνέχεια την κάτω ζεύξη (*downlink*), δηλαδή το κανάλι στο οποίο μεταδίδει ο σταθμός βάσης προς τα τερματικά. Όταν μια κλήση βίντεο ή φωνής τελειώσει ή όταν ένα ενεργό τερματικό εξέλθει από την μικροκυψέλη, τότε ο σταθμός βάσης διαγράφει τα στοιχεία της συγκεκριμένης σύνδεσης από τον πίνακα που διατηρεί, έπειτα από μια δεδομένη χρονική περίοδο. Οι μεταβολές καταστάσεων για ένα τερματικό φωνής παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.

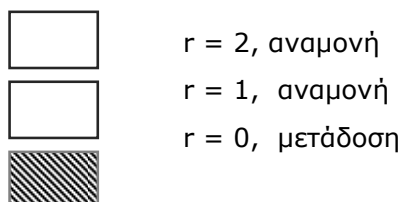


-Σχήμα 3. Διάγραμμα μεταβολής καταστάσεων για ένα ενεργό τερματικό φωνής. -

Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης πάντοτε εκχωρεί την πρώτη ελεύθερη χρονοθυρίδα μέσα στο πλαίσιο, και ότι η κίνηση ακολουθεί την προτεραιότητα που αναλύθηκε προηγουμένως. Έτσι, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί κάθε αίτηση *handoff* βίντεο που εκκρεμεί πριν αρχίσει την εξυπηρέτηση των αιτήσεων *handoff* φωνής και ούτε καθεξής -κατ' αυτό τον τρόπο έχουμε την δημιουργία τεσσάρων κλάσεων εξυπηρέτησης. Μέσα σε κάθε κλάση, η εξυπηρέτηση γίνεται με την μέθοδο FCFS (*First Come First Served*).

2.2.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Για την επίλυση των συγκρούσεων των τερματικών φωνής χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος *three-cell stack* [34, 44]. Ο *three-cell stack* είναι ένας αλγόριθμος τύπου παραθύρου, με εξυπηρέτηση παρόμοια με την FCFS (First Come First Served). Μπορεί να οπτικοποιηθεί με τη χρήση μιας στοίβας τριών κελιών (Σχήμα 4).



-Σχήμα 4. Οπτικοποίηση του αλγορίθμου *three-cell stack*.-

Ένα σύνολο από τερματικά φωνής που έχουν ανάγκη να μεταδώσουν, χωρίζεται πιθανοτικά σε τρία ισοπίθανα υποσύνολα (μετάδοση-αναμονή) στην αρχή του κάθε πλαισίου, πριν δηλαδή από την αρχή του ανταγωνισμού για την φωνή (η επιλογή αυτή έχει αποδειχθεί μέσω προσομοιώσεων να οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στον μέγιστο αριθμό τερματικών φωνής που μπορούν να εισέλθουν στο σύστημα) [44].

Τα τερματικά που έχουν ανάγκη να μεταδώσουν, ανταγωνίζονται για μια δεδομένη μίνι-χρονοθυρίδα αίτησης. Αν μετά τον πιθανοτικό χωρισμό του συνόλου βρεθεί στην μίνι-χρονοθυρίδα μόνο ένα τερματικό, λαμβάνει σήμα ανάδρασης μη-σύγκρουσης (non-collision) και μεταδίδει. Αν όμως βρεθούν περισσότερα, τότε ο σταθμός βάσης επιστρέφει σήμα σύγκρουσης (collision). Τα τερματικά που συγκρούστηκαν επιχειρώντας να μεταδώσουν στη μίνι χρονοθυρίδα χωρίζονται εκ νέου στα κελιά της στοίβας. Κάθε τερματικό έχει και πάλι ίση πιθανότητα ($1/3$) να εισέλθει σε ένα από τα τρία κελιά. Όσα βρέθηκαν στο κάτω κελί μπορούν να μεταδώσουν στην επόμενη χρονοθυρίδα. Τα υπόλοιπα πρέπει να περιμένουν να αδειάσει το κάτω κελί για να μπορέσουν να μεταδώσουν. Αν το σήμα ανάδρασης στην επόμενη μίνι χρονοθυρίδα είναι ξανά σήμα collision τότε τα τερματικά του κάτω κελιού, μοιράζονται εκ νέου με ίση πιθανότητα σε όλη τη στοίβα, ενώ τα τερματικά των πάνω κελιών δεν μετακινούνται. Αν ο σταθμός βάσης επιστρέψει σήμα non-collision, σημαίνει ότι το κάτω κελί είναι άδειο (είτε επειδή κάποιος χρήστης απ' όσους συμμετείχαν στην αρχική σύγκρουση μετέδωσε, είτε επειδή κανείς δεν εισήλθε στο κάτω κελί όταν οι

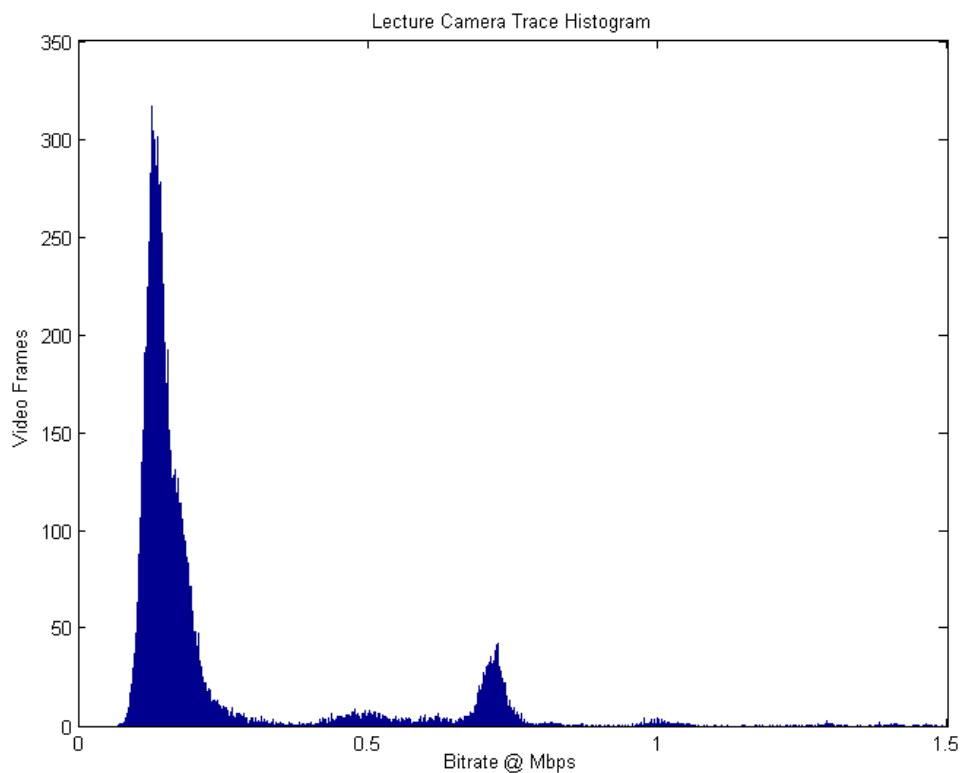
χρήστες «τράβηξαν νόμισμα»). Σε αυτή την περίπτωση, τα τερματικά των δύο πάνω κελιών μετακινούνται κατά μία θέση προς τα κάτω. Το τέλος του ανταγωνισμού των τερματικών για τις μίνι-χρονοθυρίδες αιτήσεων ορίζεται μοναδικά από την εμφάνιση τριών συνεχόμενων non-collision [27, 45].

Η υλοποίηση και χρήση του αλγόριθμου three-cell stack αποτελεί την τρίτη σημαντική διαφοροποίηση της παρούσας εργασίας σε σχέση με τα [10, 11], όπου προτιμήθηκε η χρήση του αλγόριθμου two-cell stack [46], ο οποίος διαφέρει από τον three-cell stack μονάχα στον αριθμό των κελιών της στοίβας (2 αντί για 3). Ο three-cell stack προτιμάται στην παρούσα εργασία λόγω του ότι αποδίδει καλύτερα όταν υπάρχει υψηλό φορτίο στο κανάλι, που είναι η περίπτωση στην οποία εστιάζει η ερευνητική μας δουλειά.

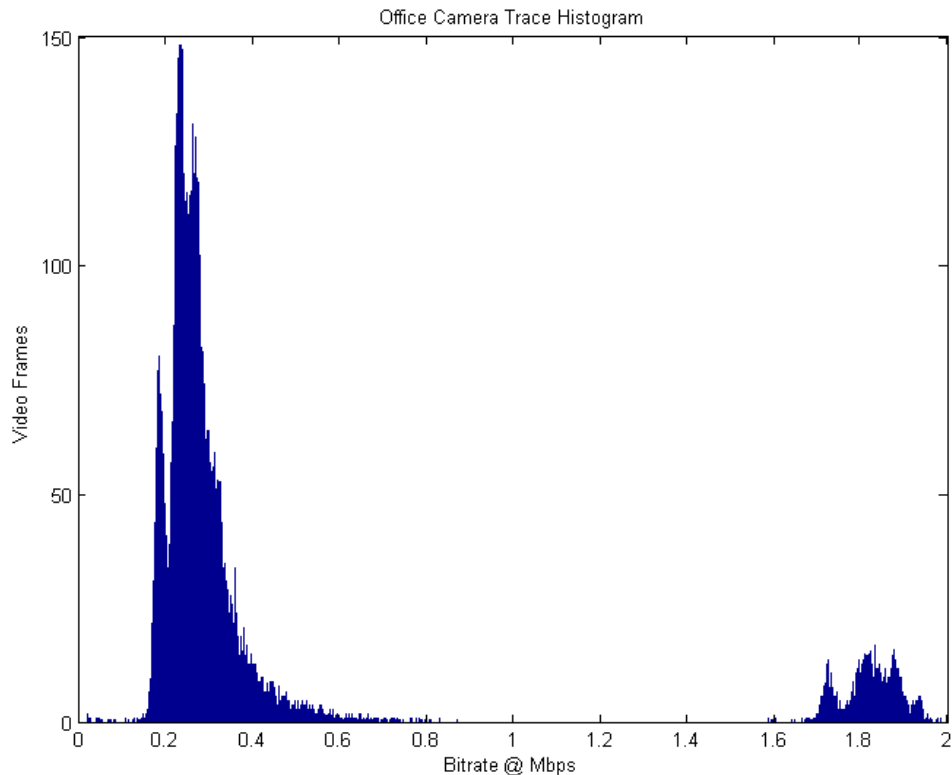
2.2.3 ΚΙΝΗΣΗ ΒΙΝΤΕΟ

Χρησιμοποιούμε στατιστικά στοιχεία από ανάλυση πραγματικών ταινιών βιντεοδιάσκεψης (videoconference), από τα [6, 7]. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε τα στατιστικά στοιχεία (αριθμός bytes/video frame) από δύο MPEG-4 ταινίες υψηλής ποιότητας κωδικοποίησης. Η πρώτη ταινία παρουσιάζει μία διάλεξη, ενώ η δεύτερη δείχνει την δραστηριότητα μέσα σε ένα γραφείο.

Τα ιστογράμματα των δύο ταινιών ακολουθούν, στα Σχήματα 5, 6.



-Σχήμα 5. Το ιστόγραμμα για την κάμερα της διάλεξης.-



-Σχήμα 6. Το ιστόγραμμα για την κάμερα της διάλεξης.-

Ο μέγιστος ο μέσος ρυθμός μετάδοσης για κάθε ταινία παρατίθενται παρακάτω.

Όνομα Ταινίας	Μέσος ρυθμός μετάδοσης (kbps)	Τυπική Απόκλιση (kbps)	Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης kbps)
Office camera	397	434	1982
Lecture camera	210	182	1489

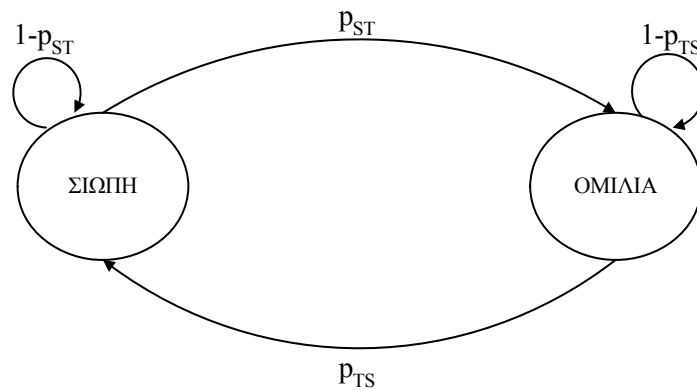
Κάθε καινούργιο *video frame* της *MPEG-4* ταινίας έρχεται ανά 40ms (25 *video frames* ανά δευτερόλεπτο). Κάθε βίντεο χρήστης επιλέγει μία από τις δύο ταινίες για μετάδοση με πιθανότητα 50%. Η διάρκεια της κάθε μετάδοσης θεωρήσαμε πως δίνεται από μία εκθετική κατανομή με μέση τιμή 5 λεπτών. Αυτή η επιλογή αποτελεί την τέταρτη σημαντική διαφοροποίηση της παρούσας δουλειάς σε σχέση με τα [10, 11],

όπου κάθε βίντεο χρήστης ο οποίος γινόταν δεκτός στο σύστημα παρέμενε ενεργός καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (60 λεπτά). Ο λόγος για την επιλογή αυτή στα [10, 11] ήταν η εξέταση του συστήματος κάτω από ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες (καθώς οι απαιτητικοί χρήστες βίντεο δεν εξέρχονταν ποτέ). Στην παρούσα εργασία, όπου επιχειρούμε να εξετάσουμε ένα περισσότερο ρεαλιστικό σενάριο κίνησης σε ασύρματο δίκτυο, και όπου προσθέτουμε την ύπαρξη *handoff* χρηστών και ανταγωνισμού για τους βίντεο χρήστες, προτιμήθηκε η μελέτη των κλήσεων βίντεο να γίνει βάσει περιορισμένης διάρκειας, με δυνατότητα του βίντεο χρήστη να ξαναπροσπαθεί να καλέσει βάσει συγκεκριμένων πιθανοτικών κατανομών.

2.2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΦΩΝΗΣ

Οι βασικές μας υποθέσεις για το μοντέλο της κίνησης της φωνής είναι οι εξής:

1. Τα τερματικά φωνής είναι εφοδιασμένα με έναν ανιχνευτή δραστηριότητας φωνής [28, 47]. Οι πηγές φωνής ακολουθούν ένα σχήμα μεταβάσεων μεταξύ περιόδων ομιλίας (talkspurt) και σιωπής (silence), δηλαδή ένα σχήμα on-off. Η έξοδος του ανιχνευτή δραστηριότητας φωνής μοντελοποιείται από μια Μαρκοβιανή αλυσίδα διακριτού χρόνου και δύο καταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



-Σχήμα 7. Το Μαρκοβιανό μοντέλο για την δραστηριότητα των πηγών φωνής.-

Ο πίνακας μεταβάσεων για το μοντέλο Μαρκοβ της φωνής ακολουθεί (Πίνακας 1). Από αυτές τις πιθανότητες μπορούμε να εξαγάγουμε την μέση διάρκεια περιόδου ομιλίας και σιωπής.

Τελική \ Αρχική	Ομιλία	Σιωπή
Ομιλία	$p_{TT}=0.988$	$p_{TS}=0.012$
Σιωπή	$p_{ST}=0.00889$	$p_{SS}=0.99111$

-Πίνακας 1. Πίνακας μεταβάσεων για το Μαρκοβιανό μοντέλο φωνής.-

Από τις πιθανότητες αυτές συμπεραίνουμε ότι η μέση διάρκεια ομιλίας είναι $\frac{1}{p_{TS}} = 83.33 \text{ frames}$ ή αλλιώς 1 sec. Αντίστοιχα για την μέση διάρκεια σιωπής έχουμε

$\frac{1}{p_{ST}} = 112.5 \text{ frames}$ ή αλλιώς 1.35 sec.

Όλες οι μεταβολές κατάστασης των πηγών φωνής (π.χ., από ομιλία σε σιωπή) λαμβάνουν χώρα στα όρια μεταξύ του τέλους ενός πλαισίου και της αρχής του επόμενου. Η υπόθεση αυτή είναι σχετικά ακριβής, αν λάβουμε υπ' όψιν μας ότι η διάρκεια ενός πλαισίου είναι ίση με μόλις 12 ms, ενώ η μέση διάρκεια των περιόδων ομιλίας είναι 1 δευτερόλεπτο και σιωπής το 1.35 δευτερόλεπτα.

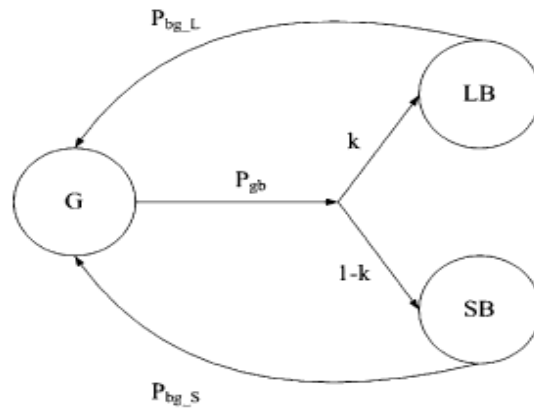
Οι δεσμευμένες χρονοθυρίδες ελευθερώνονται αυτόματα. Αυτό σημαίνει ότι ένα τερματικό φωνής το οποίο έχει δεσμεύσει μια χρονοθυρίδα ενημερώνει τον σταθμό βάσης αμέσως μετά το τέλος της περιόδου ομιλίας του.

2.2.5 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Το πλέον χρησιμοποιημένο στην βιβλιογραφία μοντέλο για την προσομοίωση σφαλμάτων ενός ασύρματου καναλιού είναι το *Gilbert-Elliot* μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιεί μία αλυσίδα *Markov* δύο καταστάσεων [8, 9]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, σε κάθε χρονική στιγμή το κανάλι βρίσκεται σε μία από δύο καταστάσεις. Η πρώτη κατάσταση, η λεγόμενη «καλή» κατάσταση, σημαίνει ότι οι μεταδόσεις στο κανάλι είναι χωρίς λάθη και η άλλη κατάσταση, η λεγόμενη «κακή», ότι κατά την διάρκειά της λαμβάνουν χώρα σφάλματα στην μετάδοση. Πολλές μελέτες γύρω από αυτό το μοντέλο απέδειξαν τα τελευταία χρόνια πως το *Gilbert-Elliot* μοντέλο αποτυγχάνει να προβλέψει την μακροπρόθεσμη συσχέτιση των λαθών [15] ενώ παράλληλα οδηγεί σε μια ιδιαίτερα συντηρητική στρατηγική κατανομής των πόρων στα τερματικά που είναι στο σύστημα [16].

Με βάση τα παραπάνω, επιλέξαμε στην παρούσα εργασία να υιοθετήσουμε ένα καινούργιο στην βιβλιογραφία μοντέλο σφαλμάτων, από το [18]. Το μοντέλο αυτό (Σχήμα 8) διαφέρει από το προηγούμενο στο γεγονός ότι διαχωρίζει την «κακή» κατάσταση σε δύο καταστάσεις, στην μακρά «κακή» κατάσταση (*long error burst, LB*) και στην σύντομη «κακή» κατάσταση (*short error burst, SB*) που μαζί με την «καλή» κατάσταση (*G*) αποτελούν τις τρεις καταστάσεις της αλυσίδας στις οποίες μπορεί να βρεθεί το κανάλι. Το μοντέλο αυτό κατορθώνει να προβλέψει καλύτερα από το

Gilbert-Elliot μοντέλο την μακροπρόθεσμη συσχέτιση των λαθών στο ασύρματο κανάλι.



-Σχήμα 8. Μοντέλο Σφαλμάτων του καναλιού.-

Μία μετάδοση θεωρείται επιτυχής μόνο αν το κανάλι βρίσκεται σε «καλή» κατάσταση, αλλιώς η μετάδοση είναι ανεπιτυχής. Οι πιθανότητες μετάβασης από την μία κατάσταση στην άλλη εμφανίζονται στον Πίνακα 2. Αρχικά θεωρούμε ότι το κανάλι για κάθε χρήστη και στο *downlink* και στο *uplink* βρίσκεται σε καλή κατάσταση. Η θεώρηση αυτή δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα εφόσον χρησιμοποιείται περίοδος *warm-up* πριν από την έναρξη παρακολούθησης του συστήματος σε πραγματική λειτουργία και η κατάσταση του καναλιού στην λήξη αυτής της περιόδου (και ουσιαστική έναρξη της προσομοίωσής μας) θα είναι τυχαία.

Όπως προαναφέρθηκε, η προσομοίωσή μας αφορά την κατάσταση του καναλιού για κάθε χρήστη ξεχωριστά.

Πιθανότητα	Τιμή	Περιγραφή
P_{GB}	0.0000163	Πιθανότητα μετάβασης από «καλή» κατάσταση σε «κακή» κατάσταση
P_{BG_S}	0.3597	Πιθανότητα μετάβασης από SB κατάσταση σε «καλή» κατάσταση
P_{BG_L}	0.01439	Πιθανότητα μετάβασης από LB κατάσταση σε «καλή» κατάσταση.
k	0.05	

-Πίνακας 2. Παράμετροι Μοντέλου Σφαλμάτων.-

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

Ο μηχανισμός κατανομής πόρων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας -και αποτελεί την βασικότερη ερευνητική συνεισφορά της- βασίζεται στην λογική της εκμετάλλευσης των χρονοθυρίδων πληροφορίας που χάνονται όταν η άνω ζεύξη ενός τερματικού βίντεο βρίσκεται σε κακή κατάσταση. Όταν συμβαίνει αυτό, τα πακέτα των τερματικών βίντεο απορρίπτονται, αυξάνεται η μέση πιθανότητα απώλειας πακέτων και πέφτει η απόδοση του συστήματος. Ο προτεινόμενος μηχανισμός επιχειρεί την κατανομή αυτών των χρονοθυρίδων πληροφορίας σε άλλα τερματικά βίντεο, ώστε να επιταχυνθεί η ολοκλήρωση της μετάδοσής τους. Η επιλογή μας να μην χορηγούνται οι πόροι αυτοί σε τερματικά φωνής οφείλεται στο γεγονός ότι ένας χρήστης φωνής ο οποίος εισέρχεται στο σύστημα θα παραμείνει ενεργός (όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.2.4) κατά μέσο όρο για 1 sec, δηλαδή θα κρατήσει την χρονοθυρίδα στην οποία μετέδωσε για πάνω από 80 πλαίσια χρόνου, εμποδίζοντας την πρόσβαση σε αυτήν στους χρήστες βίντεο, οι οποίοι έχουν πιο αυστηρές απαιτήσεις QoS.

Υλοποιήθηκαν δύο μηχανισμοί. Ο πρώτος αφορά σε ένα ιδανικό σενάριο, όπου όταν η άνω ζεύξη ενός ενεργού τερματικού βίντεο μπει σε κακή κατάσταση (είτε LB είτε SB) ο σταθμός βάσης το μαθαίνει αμέσως με κάποιο «μαγικό» τρόπο και φροντίζει ώστε οι χρονοθυρίδες πληροφορίας που είχε δεσμεύσει ο εν λόγω χρήστης να χορηγηθούν προσωρινά σε άλλα τερματικά βίντεο (*handoff* και *non-handoff*, με αυτή την προτεραιότητα). Μόλις επανέλθει η ζεύξη του χρήστη σε καλή κατάσταση, οι χρονοθυρίδες πληροφορίας που του ανήκαν πριν μπει σε κακή κατάσταση του επιστρέφονται από τον σταθμό βάσης για να συνεχίσει την μετάδοση.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο προτεινόμενος για ασύρματα TDMA δίκτυα 4^{ης} γενιάς, και η λειτουργία του μοιάζει με αυτήν του ιδανικού μηχανισμού, με την διαφορά ότι δεν μπορεί να γνωρίζει με πλήρη βεβαιότητα πότε ένα τερματικό περνάει από καλή σε κακή κατάσταση καναλιού. Όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, στην ανάλυση του μοντέλου σφαλμάτων του καναλιού, η άνω ζεύξη ενός τερματικού βίντεο όταν μπει σε «κακή» κατάσταση βρίσκεται είτε σε LB είτε σε SB κατάσταση. Η μέση διάρκεια του SB είναι 2.78 χρονοθυρίδες πληροφορίας και η μέση διάρκεια του LB είναι 69.5 χρονοθυρίδες πληροφορίας. Όταν, λοιπόν, ένα τερματικό βίντεο μπει σε κακή κατάσταση, ο σταθμός βάσης δεν γνωρίζει αν βρίσκεται σε LB ή SB. Η δυνατότητα που του παρέχεται είναι να κάνει μια εκτίμηση της κατάστασης της ζεύξης παρακολουθώντας αν το τερματικό βίντεο μεταδίδει πακέτα σε χρονοθυρίδες πληροφορίας που του έχουν αντιστοιχηθεί. Αν το σύνολο των συνεχόμενων αποτυχημένων μεταδόσεων πακέτων ανέλθει σε έναν συγκεκριμένο αριθμό τότε ο

σταθμός βάσης «αποφασίζει» ότι το τερματικό βρίσκεται σε LB κατάσταση, καθώς η πιθανότητα να βρίσκεται σε SB κατάσταση και να υπερβεί το μέγεθος του σφάλματος αυτόν τον αριθμό είναι πολύ μικρή. Στον προτεινόμενο μηχανισμό, το όριο για να λάβει ο σταθμός βάσης αυτή την απόφαση είναι οι 6 συνεχόμενες αποτυχίες μετάδοσης, καθώς μετά από εκτεταμένες προσομοιώσεις υπολογίστηκε ότι η πιθανότητα λάθους στην εκτίμησή μας (η πιθανότητα δηλαδή να βρίσκεται το τερματικό σε SB) είναι μικρότερη του 7%.

Εφόσον εκτιμηθεί ότι η ζεύξη του τερματικού βίντεο βρίσκεται σε LB και το τερματικό έχει δεσμευμένες κι άλλες χρονοθυρίδες πληροφορίας στο τρέχον πλαίσιο, τότε ο σταθμός βάσης αποδεσμεύει τις υπόλοιπες χρονοθυρίδες. Η πρώτη από τις αποδεσμευμένες χρονοθυρίδες πληροφορίας μένει κενή και χρησιμοποιείται στο downlink κανάλι για να ενημερώσει ο σταθμός βάσης τα τερματικά βίντεο που αναμένουν στην ουρά ποιες νέες χρονοθυρίδες τους χορηγούνται (με προτεραιότητα στους χρήστες *handoff*).

Όταν η ζεύξη του τερματικού βίντεο από το οποίο αφαιρέθηκαν οι χρονοθυρίδες επανέλθει σε καλή κατάσταση, το τερματικό ενημερώνει σχετικά τον σταθμό βάσης στέλνοντας νέα αίτηση για πόρους, εφόσον έχει ακόμα πακέτα προς αποστολή, *στο κομμάτι αιτήσεων για τους handoff βίντεο χρήστες ανεξαρτήτως αν το εν λόγω τερματικό ήταν αρχικά handoff ή όχι*. Ο λόγος της (ενδεχόμενης) αναβάθμισης του συγκεκριμένου τερματικού στην ιεραρχία των ανταγωνιζόμενων τερματικών είναι ότι αποτελεί ζήτημα υψηλής προτεραιότητας η επανείσοδος του στο σύστημα για να συνεχίσει την μετάδοση που είχε ξεκινήσει πριν το κανάλι του μπει σε LB κατάσταση. Παράλληλα, ένας επιπλέον λόγος που χρειάζεται να στείλει το τερματικό εκ νέου αίτηση είναι η πιθανότητα, στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε, να έχει εκπνεύσει το χρονικό όριο της αποστολής των πακέτων του από το προηγούμενο video frame και να είναι διαφορετικές οι καινούργιες ανάγκες του σε αριθμό χρονοθυρίδων (το θέμα αυτό λύνεται και πάλι «αυτόματα» στον ιδανικό μηχανισμό).

Και στους δύο μηχανισμούς (προτεινόμενο και ιδανικό), στην υποπερίπτωση (συναντάται σπάνια) όπου οι χρονοθυρίδες ενός τερματικού βίντεο A που μπαίνει σε κακή κατάσταση χορηγηθούν σε ένα τερματικό βίντεο B, το οποίο με τη σειρά του έπειτα από λίγο μπει σε κακή κατάσταση, τότε οι χρονοθυρίδες μένουν ανενεργές και επιστρέφουν στην «δικαιοδοσία» του τερματικού βίντεο A, ώστε να μην αυξάνεται η πολυπλοκότητα του συστήματος με διαδοχικούς «δανεισμούς» των ίδιων χρονοθυρίδων μεταξύ πολλών τερματικών.

2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η μελέτη της απόδοσης του προτεινόμενου MAC πρωτοκόλλου έγινε με την βοήθεια προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με την χρήση των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3. Το σύνολο των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που παρουσιάζεται είναι αποτέλεσμα ενός μέσου όρου από 3 ανεξάρτητα runs, κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει 105.000 πλαίσια χρόνου. Τα πρώτα 5.000 πλαίσια χρησιμοποιούνται ως περίοδος για «ζέσταμα» του συστήματος (*warm-up*) έτσι ώστε όταν αρχίζει η προσομοίωση για τα υπόλοιπα 100.000 πλαίσια, να μην είναι αρχικά όλα τα τερματικά ανενεργά. Η προσομοίωση αποτελεί ένα στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος για διάρκεια είκοσι λεπτών.

Παράμετρος	Τιμή
Ταχύτητα Καναλιού (Mbps)	20
Ρυθμός Κωδικοποίησης Φωνής (Kbps)	32
Διάρκεια πλαισίου (ms)	12
Χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο	566
Διάρκεια χρονοθυρίδας (μs)	21.2
Χρονοθυρίδες αίτησης ανά πλαίσιο	25
Μίνι-χρονοθυρίδες ανά χρονοθυρίδα αίτησης	2
Μέγεθος πακέτου (bytes)	53
Μέση διάρκεια ομιλίας (sec)	1
Μέση διάρκεια σιωπής (sec)	1.35
Αριθμός συνεχόμενων αποτυχημένων μεταδόσεων για αποδέσμευση των πόρων ενός τερματικού βίντεο	6

-Πίνακας 3. Παράμετροι του Συστήματος.-

Ένα πλαίσιο περιλαμβάνει 566 χρονοθυρίδες στα 12 ms της διάρκειας του, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα. Από τις 566 χρονοθυρίδες οι 25 χρησιμοποιούνται ως χρονοθυρίδες αιτήσεων [19]. Το bandwidth αυτό αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό 4.42% του συνολικού bandwidth του καναλιού, κατά συνέπεια το ποσοστό του καναλιού που «χάνεται» (δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση πληροφορίας) με σκοπό να υποστηρίξει τις αιτήσεις των χρηστών είναι μικρό, ενώ παράλληλα, τα κέρδη από την κατάτμηση των χρονοθυρίδων σε μίνι-χρονοθυρίδες για κρατήσεις και αποφυγή συγκρούσεων στις χρονοθυρίδες πληροφορίας είναι σημαντικά.

Θεωρήσαμε τις εξής απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας [17, 40]:

α. Ένα πακέτο βίντεο πρέπει να μεταδοθεί μέσα σε 40 ms (όλα τα πακέτα ενός video frame δηλαδή πρέπει να μεταδοθούν πριν την άφιξη του επόμενου video frame) αλλιώς το πακέτο απορρίπτεται. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο για την μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής είναι 0.01%.

β. Ένα πακέτο φωνής πρέπει να μεταδοθεί μέσα σε 24 ms (2 channel frames) αλλιώς το πακέτο απορρίπτεται. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο για την μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής είναι 1%.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την σχεδίαση του συστήματος επιλέξαμε τον αριθμό των μίνι-χρονοθυρίδων ανά κομμάτι αιτήσεων να είναι ίσος με δύο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον χρόνο που απαιτείται για συγχρονισμό και για καθυστέρηση διάδοσης μέσα στην μικροκυψέλη.

2.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.5.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκαν, όπως ήδη αναφέρθηκε, δύο μηχανισμοί κατανομής πόρων που εκμεταλλεύονται την «κακή» κατάσταση στην οποία μπορεί να έχει περιέλθει ένας χρήστης βίντεο. Ο πρώτος μηχανισμός πραγματεύεται ένα ιδανικό σενάριο κατά το οποίο εκμεταλλευόμαστε όλες τις χρονοθυρίδες του χρήστη βίντεο που είναι σε «κακή» κατάσταση και ο δεύτερος μηχανισμός ένα σενάριο κατά το οποίο επιχειρούμε να εκτιμήσουμε ότι ο χρήστης βρίσκεται σε *LB* και, αφού γίνει δυνατή μια τέτοια εκτίμηση, να εκμεταλλευτούμε τις υπόλοιπες χρονοθυρίδες που είχε στην κατοχή του ο χρήστης για μετάδοση.

Οι δύο μηχανισμοί συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς την μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής που μπορεί να αντέξει το σύστημα δεδομένου ενός σταθερού αριθμού χρηστών βίντεο. Η σύγκριση έγινε για τρία διαφορετικά σενάρια ποσοστού *handoff χρηστών* (0%, 5% και 10%) επί του συνόλου των χρηστών του συστήματος. Η μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής είναι ο μέγιστος αριθμός χρηστών φωνής για τον οποίο ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας τόσο των χρηστών φωνής όσο και των χρηστών βίντεο που βρίσκονται παρόντες στο σύστημα. Τα αποτελέσματα για την χωρητικότητα και το *throughput* του ιδανικού και του προτεινόμενου μηχανισμού ακολουθούν στους Πίνακες 5, 6.

Video users	Handoff					
	0%		5%		10%	
Voice users and Throughput						
0	1162	86,96	1223	90,39	1281	94,64
1	1061	80,97	1090	82,92	1103	83,70
2	958	75,41	985	76,78	1012	79,27
5	828	70,79	878	74,14	920	76,12
8	740	68,97	768	71,32	779	72,90
10	682	67,59	704	70,53	755	73,42
12	630	65,68	648	68,59	675	70,74
15	484	61,14	526	63,79	536	65,31
18	349	56,76	389	61,01	402	62,76
20	287	55,15	333	58,83	367	61,43
22	169	51,89	219	54,03	245	55,53
24	108	47,37	144	52,15	161	53,14
25	45	43,91	81	48,41	120	50,97
26	17	43,63	45	44,96	97	49,45
27	x	-	x	-	18	45,05

-Πίνακας 5. Αποτελέσματα για *voice capacity* και *throughput* για τον ιδανικό μηχανισμό.-

Video users	Handoff					
	0%		5%		10%	
Voice users and Throughput						
0	1162	86,96	1223	90,39	1281	94,64
1	1039	79,35	1041	79,61	1104	83,77
2	904	72,12	982	76,98	990	77,77
5	784	67,2	837	70,77	870	73,41
8	647	63,51	677	64,09	703	66,88
10	589	60,58	603	62,09	644	66,25
12	546	59,77	575	61,35	605	66,03
15	427	56,52	453	59,73	482	62,15
18	320	53,69	345	57,09	381	58,78
20	198	49,6	269	54,14	291	55,21
22	124	47,93	167	48,97	197	51,74
24	37	43,12	49	45,97	90	48,21
25	7	40,24	22	44,33	54	45,79

-Πίνακας 6. Αποτελέσματα για *voice capacity* και *throughput* για τον προτεινόμενο μηχανισμό.-

Παρατηρείται, πρώτον, ότι για τον ίδιο αριθμό βίντεο χρηστών και μεγαλύτερο ποσοστό *handoff* κίνησης αυξάνεται η χωρητικότητα των χρηστών φωνής που μπορεί να αντέξει το σύστημα καθώς και το *throughput*, σαν απόρροια του γεγονότος ότι το αυξημένο ποσοστό *handoff* που εισέρχεται στο σύστημα εξυπηρετείται γρήγορα στο κομμάτι που έχει δεσμευτεί για τις αιτήσεις *handoff*. Γίνεται δηλαδή ένας καλύτερος

επιμερισμός της επίλυσης συγκρούσεων αφού τα δύο σύνολα χρηστών φωνής και βίντεο χωρίζονται σε δύο υποσύνολα το καθένα, τα *handoff* και τα *non-handoff*, και τα μέλη αυτών των μικρότερων σε πληθυσμό υποσυνόλων συναγωνίζονται μεταξύ τους όταν θέλουν να αιτηθούν για πόρους· όσο πιο ομοιόμορφα είναι τα δύο υποσύνολα (όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό *handoff* δηλαδή), τόσο πιο εύκολο είναι για το σύστημα να αντιμετωπίσει μέσα σε κάθε υποσύνολο το μικρότερο πλήθος συγκρούσεων που προκύπτει (σε σχέση με την περίπτωση όπου π.χ. όλοι σχεδόν οι χρήστες είναι *non-handoff* και οι συγκρούσεις είναι πολύ περισσότερες). Για τον ιδανικό μηχανισμό και για 5% *handoff* χρήστες επί του συνολικού αριθμού χρηστών, έχουμε κατά μέσο όρο 2,77% μεγαλύτερη αξιοποίηση του καναλιού και κατά 37 χρήστες φωνής μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με την περίπτωση της απουσίας *handoff* χρηστών (τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν στα σενάρια που εξετάστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5). Για 10% *handoff* χρήστες επί του συνολικού αριθμού χρηστών, έχουμε αντίστοιχα κατά μέσο όρο 4,88% μεγαλύτερη αξιοποίηση του καναλιού και κατά 63 χρήστες φωνής μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με την περίπτωση της απουσίας *handoff* χρηστών. Τα αντίστοιχα νούμερα για τον πραγματικό μηχανισμό (με βάση τον Πίνακα 6) είναι 2,67% - 35 χρήστες φωνής περισσότεροι κατά μέσο όρο για 5% *handoff* κίνηση, και 5,38% - 70 χρήστες φωνής περισσότεροι κατά μέσο όρο για 10% *handoff* κίνηση.

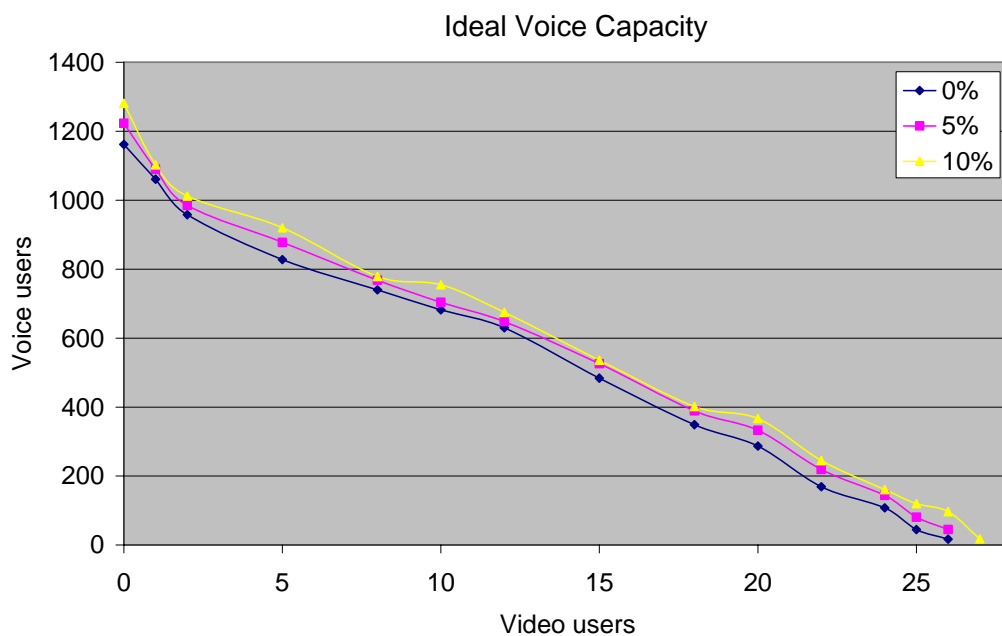
Σαν δεύτερη παρατήρηση βλέπουμε ότι για μεγαλύτερο αριθμό χρηστών βίντεο στο σύστημα έχουμε μικρότερη συνολική χρησιμοποίηση του καναλιού (*throughput*). Αυτό οφείλεται, στο γεγονός ότι ο μεγαλύτερος αριθμός βίντεο μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης και μεγάλης εκρηκτικότητας αναγκάζει το σύστημα, για να ικανοποιεί το *QoS* για τους χρήστες βίντεο, να αφήνει αρκετό *bandwidth* ελεύθερο ώστε να υπάρχει δυνατότητα άμεσης εκχώρησής του όταν απαιτηθεί απότομη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης για έναν χρήστη βίντεο.

Μία τρίτη παρατήρηση είναι ότι ο ιδανικός μηχανισμός, όπως αναμενόταν άλλωστε, αξιοποιεί καλύτερα το κανάλι απ' ότι πράττει ο προτεινόμενος μηχανισμός κατανομής των πόρων. Ο πρώτος λόγος είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός αξιοποιεί μόνο τις δεσμευμένες χρονοθυρίδες ενός βίντεο που είναι σε *LB* σε αντίθεση με τον ιδανικό ο οποίος αξιοποιεί και τις χρονοθυρίδες που είναι σε *SB*. Επιπλέον ο προτεινόμενος μηχανισμός αφιερώνει έξι συν μία χρονοθυρίδες για να προβλέψει την *LB* κατάσταση και να την διακρίνει από την *SB* κατάσταση. Παράλληλα, όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, η εκτίμηση ότι ο βίντεο χρήστης βρίσκεται σε *LB* και όχι σε *SB* είναι λανθασμένη κατά ένα ποσοστό 7% όπως υπολογίστηκε μετά από έναν μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων.

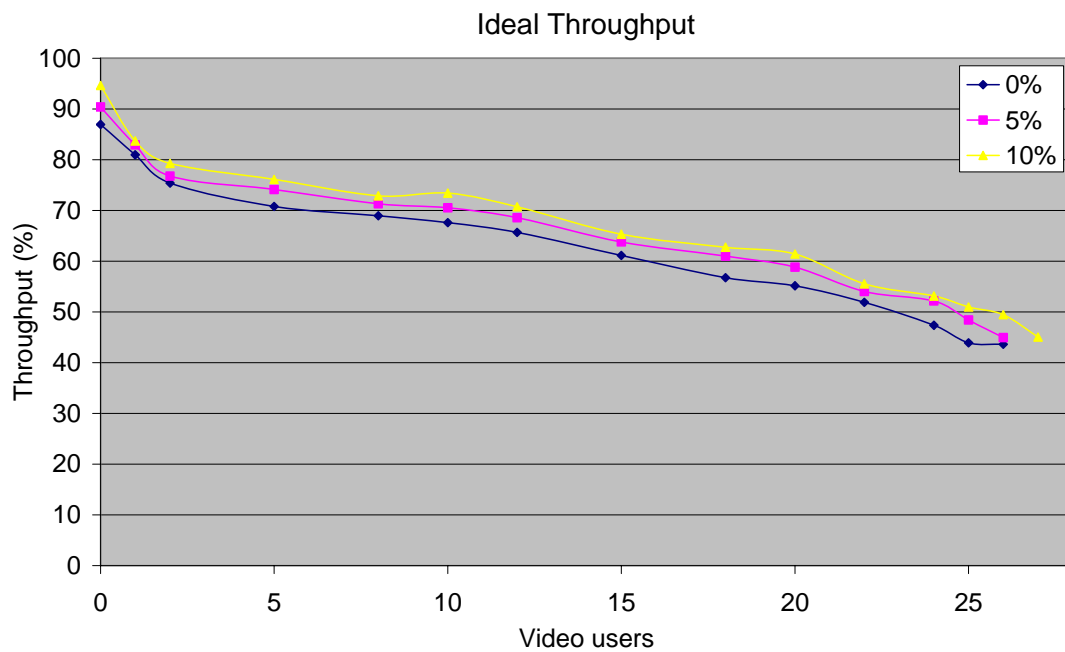
Μία λανθασμένη εκτίμηση έχει σαν αποτέλεσμα τον εξαναγκασμό του χρήστη που εκτιμήθηκε ότι βρίσκεται σε *LB* να συμμετέχει εκ νέου στον ανταγωνισμό, με συνέπεια την αύξηση των συγκρούσεων.

Ως επαλήθευση των παραπάνω, παρατηρούμε ότι κατά την απουσία βίντεο χρηστών από το σύστημα λαμβάνουμε ίδιες επιδόσεις και για τους δύο μηχανισμούς, τόσο ως προς την μέγιστη χωρητικότητα όσο και ως προς την αξιοποίηση του καναλιού.

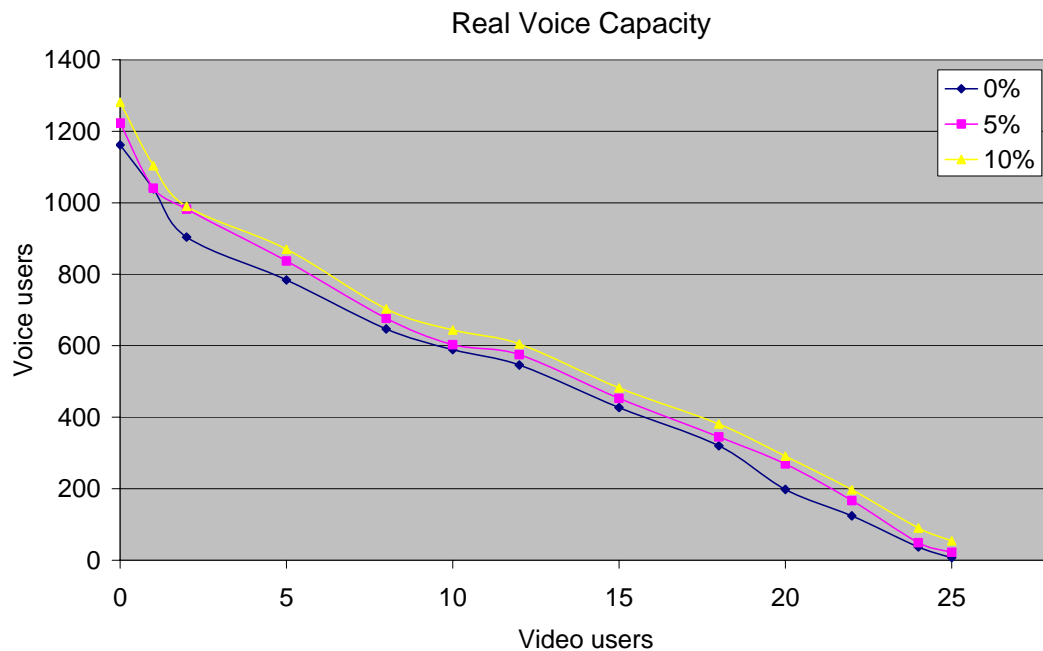
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 5, 6 παρουσιάζονται και στα Σχήματα 9-12 με την μορφή διαγραμμάτων, για την πληρέστερη απεικόνιση των παραπάνω παρατηρήσεων.



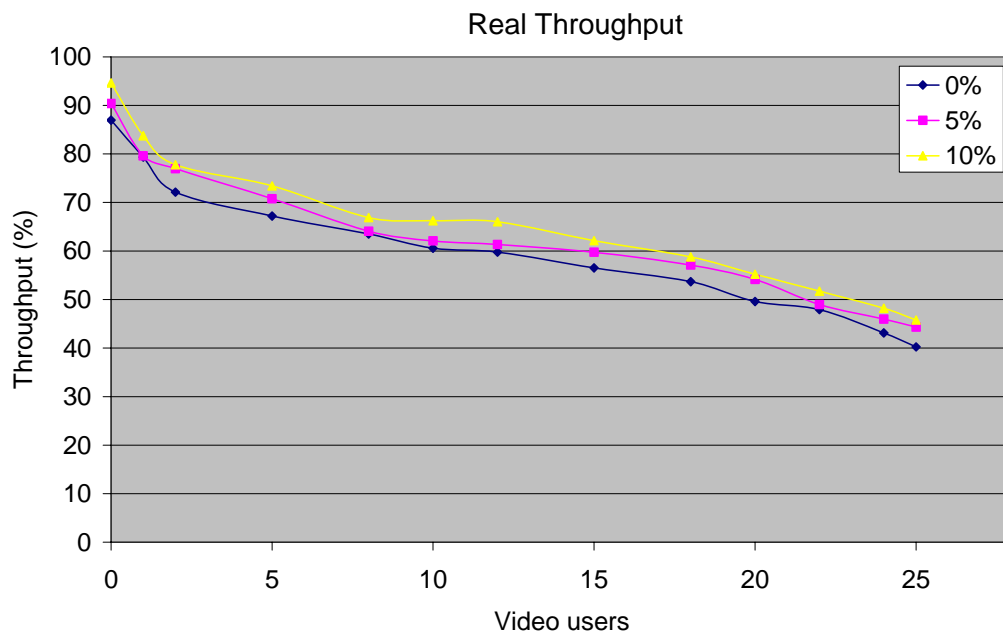
Σχήμα 9. Μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής με δεδομένο αριθμό χρηστών βίντεο στο σύστημα για τον ιδανικό μηχανισμό.



Σχήμα 10. Απόδοση συστήματος για δεδομένο αριθμό χρηστών βίντεο, για τον ιδανικό μηχανισμό.



Σχήμα 11. Μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής με δεδομένο αριθμό χρηστών βίντεο στο σύστημα για τον προτεινόμενο μηχανισμό.

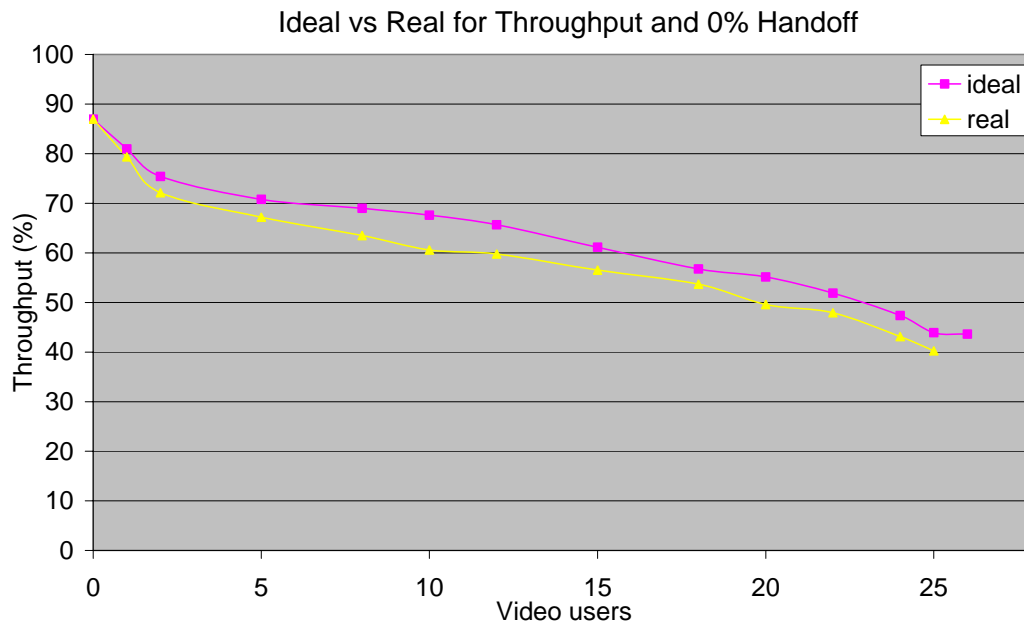


Σχήμα 12. Απόδοση συστήματος με δεδομένο αριθμό χρηστών βίντεο, για τον προτεινόμενο μηχανισμό.

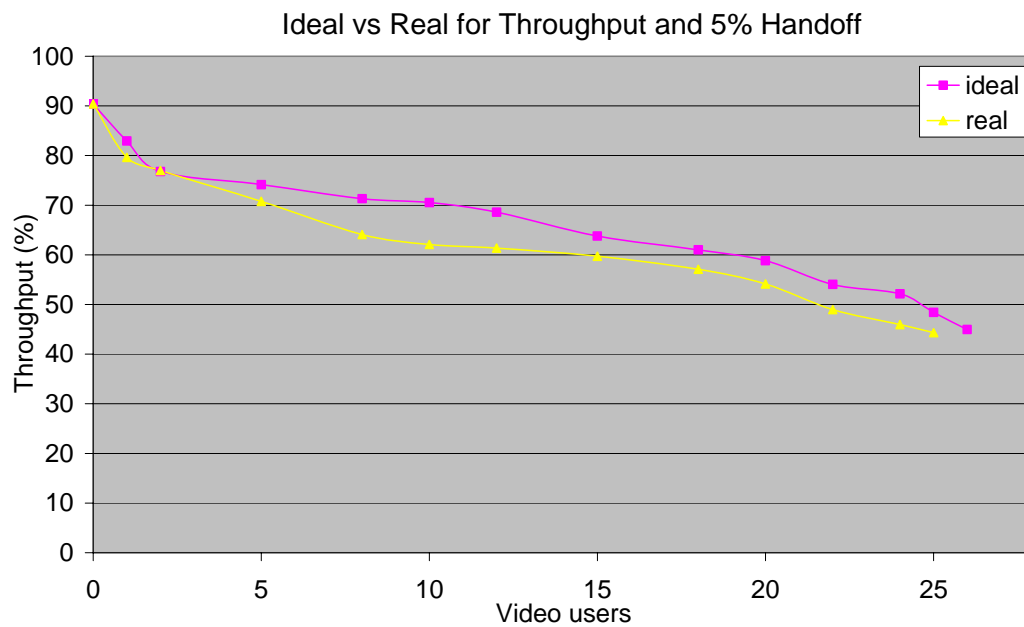
Ένα άλλο σημείο που χρήζει παρατήρησης και ερμηνείας είναι ότι η απόδοση του συστήματος, τόσο για τον πραγματικό όσο και για τον ιδανικό μηχανισμό κατανομής πόρων, με την απουσία χρηστών βίντεο και με υψηλό ποσοστό (10%) *handoff* κίνησης ξεπερνάει οριακά το 94,5%, δηλαδή φθάνει στη μέγιστη απόδοση που μπορεί να φθάσει, καθώς γνωρίζουμε πως οι χρονοθυρίδες στις οποίες δεν μεταδίδεται πληροφορία (χρονοθυρίδες αιτήσεων) καταλαμβάνουν το 4,42% (25/566) περίπου του συνόλου των χρονοθυρίδων. Αν αναλογιστούμε ότι σε σενάρια υψηλής κίνησης το ποσοστό αποτυχημένων μεταδόσεων φωνής πλησιάζει το 1% τότε προκύπτει ότι η μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος είναι περίπου $(100\% - 4,42\% - 1\%) = 94,58\%$. Συγκρίνοντας τις αποδόσεις των δύο σεναρίων παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός κατανομής πόρων υπολείπεται του ιδανικού κατά 50 χρήστες φωνής (ή 9,6%) κατά μέσο όρο για όλα τα σενάρια (και για όλα τα ποσοστά κίνησης *handoff*) που εξετάστηκαν, όσον αφορά στην μέγιστη χωρητικότητα. Αντίστοιχα, ο προτεινόμενος μηχανισμός υπολείπεται μόλις κατά 4,1% του ιδανικού μηχανισμού κατά μέσο όρο όσον αφορά στην μέγιστη απόδοση του συστήματος.

Τα Σχήματα 13-15 παρουσιάζουν τα σχετικά αποτελέσματα που αφορούν την μέγιστη απόδοση του συστήματος για κάθε μηχανισμό, και για ποσοστό *handoff* ίσο με 0%, 5% και 10%. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα αποτελέσματα, η διαφορά των

μόλις 4,1 ποσοστιαίων μονάδων του προτεινόμενου μηχανισμού από τον ιδανικό αποτελεί μία ισχυρή επιβεβαίωση της αποδοτικότητας του μηχανισμού αυτού.

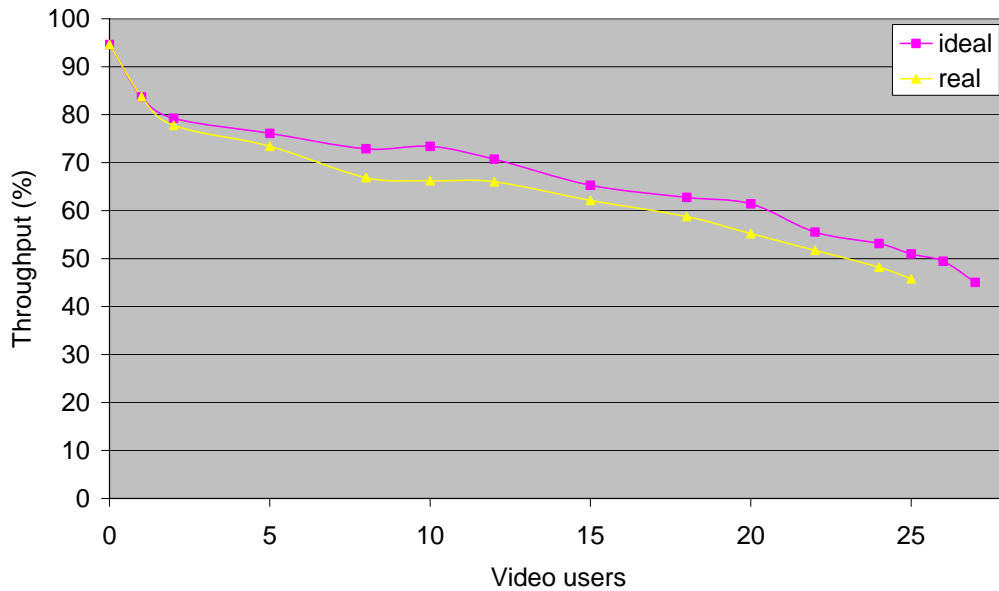


Σχήμα 13. Σύγκριση της μέγιστης απόδοσης του συστήματος για τους δύο μηχανισμούς με 0% handoff.



Σχήμα 14. Σύγκριση της μέγιστης απόδοσης του συστήματος για τους δύο μηχανισμούς με 5% handoff.

Ideal vs Real for Throughput and 10% Handoff



Σχήμα 15. Σύγκριση της μέγιστης απόδοσης του συστήματος για τους δύο μηχανισμούς με 10% handoff.

Στην συνέχεια προχωρούμε σε προσομοιώσεις για δύο μετρικές: την μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων φωνής και βίντεο και την μέση πιθανότητα απόρριψης των πακέτων αυτών (packet dropping). Επιλέξαμε δύο σενάρια κίνησης για κάθε μηχανισμό. Το πρώτο με έναν σταθερό αριθμό 10 χρηστών βίντεο και ποσοστό *handoff* κίνησης 5% και το δεύτερο με ένα σταθερό αριθμό 15 χρηστών βίντεο και 10% ποσοστό *handoff* κίνησης. Ο λόγος που επιλέγεται σταθερός αριθμός χρηστών βίντεο είναι γιατί θέλουμε να εξετάσουμε με ποιο τρόπο η αύξηση του αριθμού χρηστών φωνής στο σύστημα επηρεάζει τις παραπάνω μετρικές. Οι συγκεκριμένοι αριθμοί χρηστών βίντεο επελέγησαν ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος κάτω από μεσαίο και μεγάλο φορτίο κίνησης βίντεο και *handoff*. Οι Πίνακες 8-11 και τα Σχήματα 16-23, που ακολουθούν, παρουσιάζουν τα σχετικά αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας, τα οποία θα σχολιασθούν στη συνέχεια.

Voice users	Video drop. probability	Voice drop. probability	Video delay(ms)	Voice delay(ms)
605	0,0047	0,0110	8,5723	7,760
615	0,0052	0,0113	8,6503	7,843
625	0,0055	0,0110	8,6210	7,873
635	0,0058	0,0110	8,6573	7,960
645	0,0063	0,0113	8,6903	8,200
655	0,0066	0,0117	8,8290	8,277
665	0,0068	0,0113	9,1323	8,603
675	0,0070	0,0120	9,1997	8,820
685	0,0071	0,0123	9,4477	9,010
695	0,0085	0,0123	9,4510	9,147
704	0,0097	0,0123	9,6300	9,220

Πίνακας 8. Αποτελέσματα για τον ιδανικό μηχανισμό με 10 βίντεο χρήστες και 5% handoff.

Voice users	Video drop. probability	Voice drop. probability	Video delay(ms)	Voice delay(ms)
435	0,0055	0,0110	9,7990	7,363
445	0,0057	0,0110	9,7933	7,366
455	0,0058	0,0110	9,9317	7,556
465	0,0059	0,0113	9,9223	7,683
475	0,0060	0,0110	9,9647	7,696
485	0,0062	0,0113	10,0983	7,856
495	0,0064	0,0113	10,2360	8,086
505	0,0065	0,0117	10,3363	8,193
515	0,0066	0,0113	10,4927	8,433
525	0,0071	0,0120	10,5407	8,553
536	0,0097	0,0120	10,7100	8,810

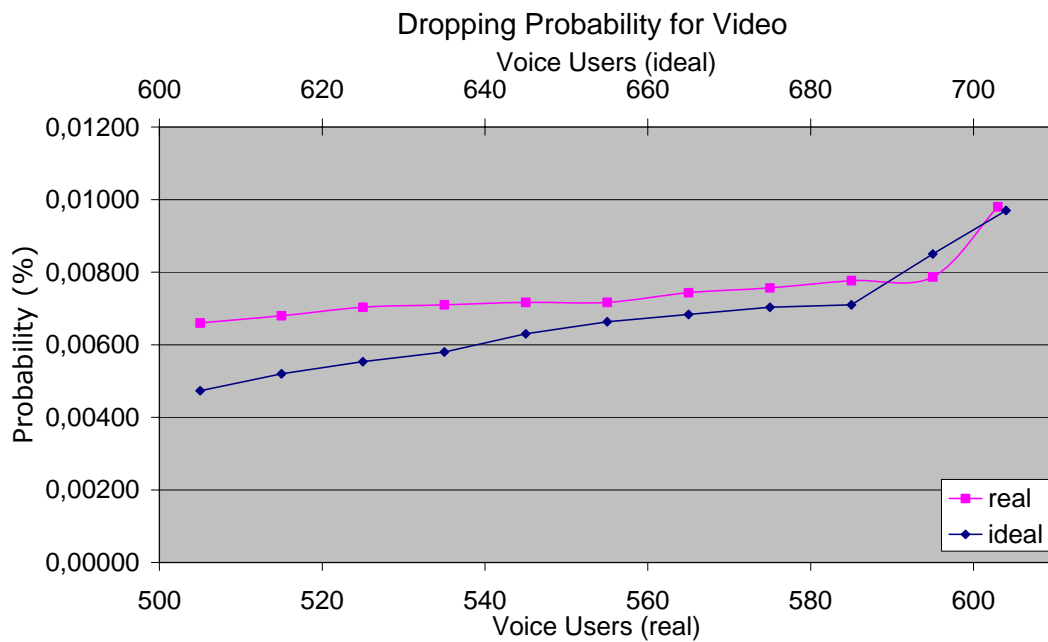
Πίνακας 9. Αποτελέσματα για τον ιδανικό μηχανισμό με 15 βίντεο χρήστες και 10% handoff.

Voice users	Video drop. probability	Voice drop. probability	Video delay(ms)	Voice delay(ms)
505	0,0066	0,0103	7,8993	6,963
515	0,0068	0,0103	8,0310	6,993
525	0,0070	0,0103	8,0850	7,123
535	0,0071	0,0107	8,1160	7,140
545	0,0072	0,0107	8,1720	7,206
555	0,0072	0,0103	8,2277	7,286
565	0,0074	0,0107	8,2363	7,410
575	0,0076	0,0110	8,4147	7,446
585	0,0078	0,0107	8,4470	7,496
595	0,0079	0,0107	8,5596	7,546
603	0,0098	0,0110	8,6310	7,560

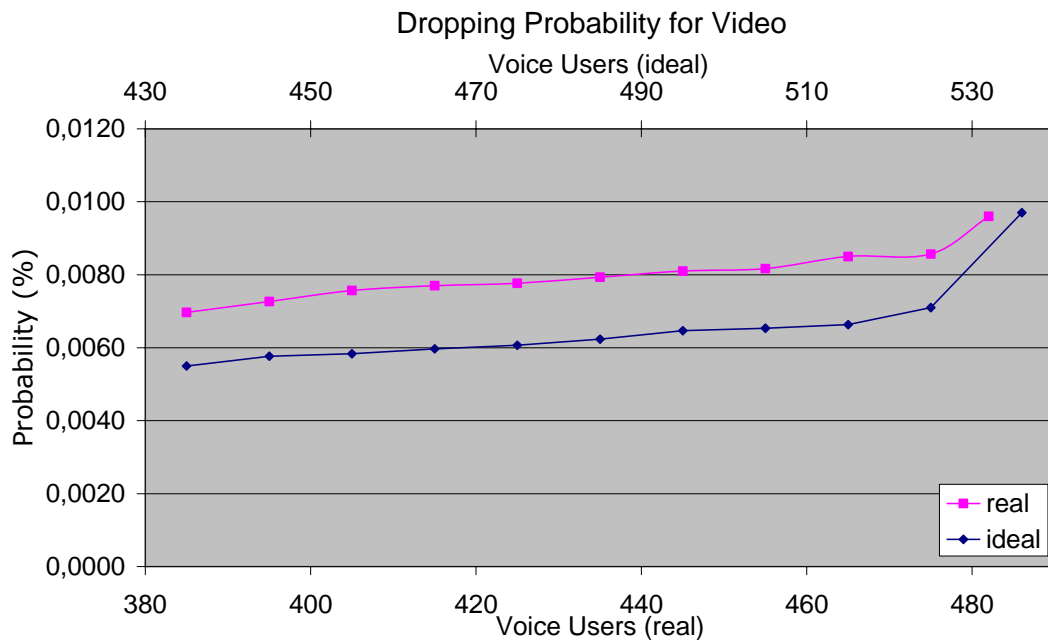
Πίνακας 10. Αποτελέσματα για τον προτεινόμενο μηχανισμό με 10 βίντεο χρήστες και 5% handoff.

Voice users	Video drop. probability	Voice drop. probability	Video delay(ms)	Voice delay(ms)
385	0,0070	0,0103	9,4610	6,773
395	0,0073	0,0103	9,6690	6,803
405	0,0076	0,0103	9,7440	6,973
415	0,0077	0,0107	9,8023	6,987
425	0,0078	0,0110	9,8763	7,020
435	0,0079	0,0113	9,8800	7,040
445	0,0081	0,0110	9,9077	7,087
455	0,0082	0,0107	9,9773	7,160
465	0,0085	0,0110	10,0620	7,203
475	0,0086	0,0110	10,1303	7,287
482	0,0096	0,0110	10,1930	7,340

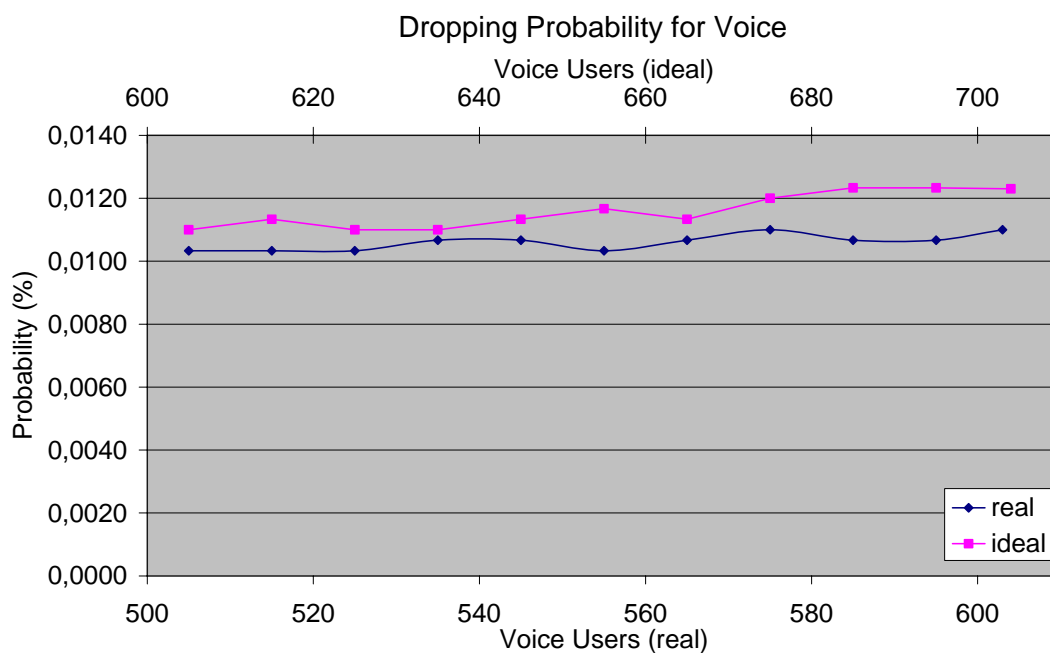
Πίνακας 11. Αποτελέσματα για τον προτεινόμενο μηχανισμό με 15 βίντεο χρήστες και 10% handoff.



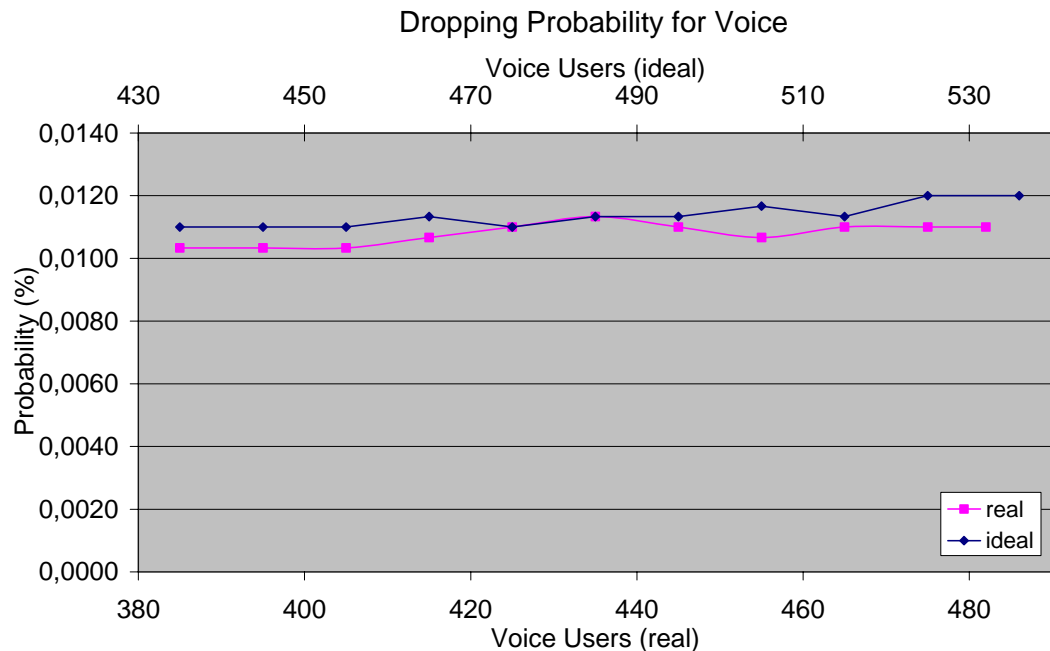
Σχήμα 16.Πιθανότητα απόρριψης πακέτων βίντεο με 10 χρήστες βίντεο και 5% handoff.



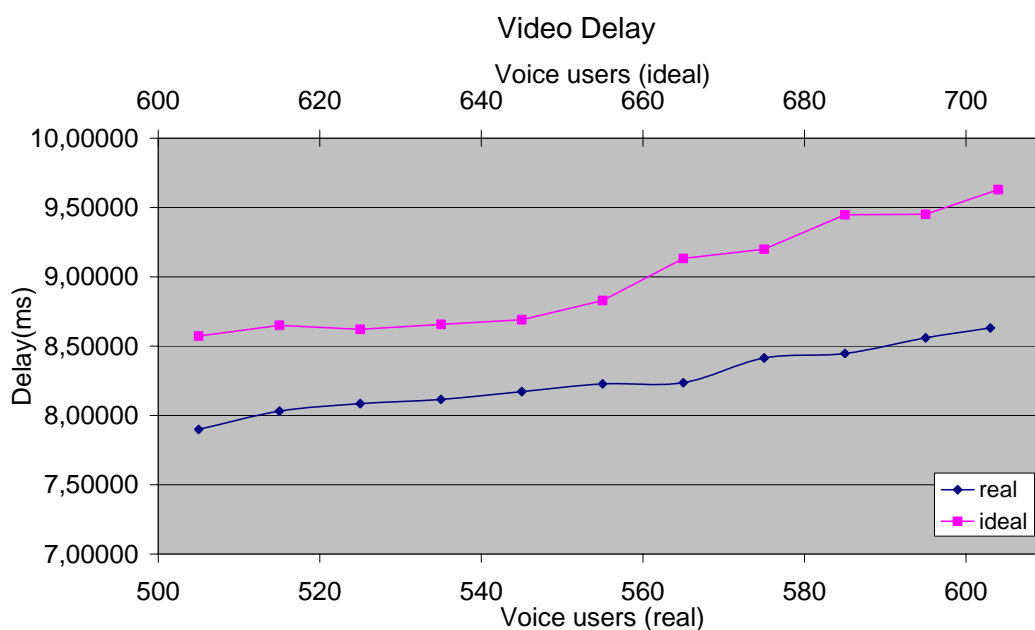
Σχήμα 17.Πιθανότητα απόρριψης πακέτων βίντεο με 15 χρήστες βίντεο και 10% handoff.



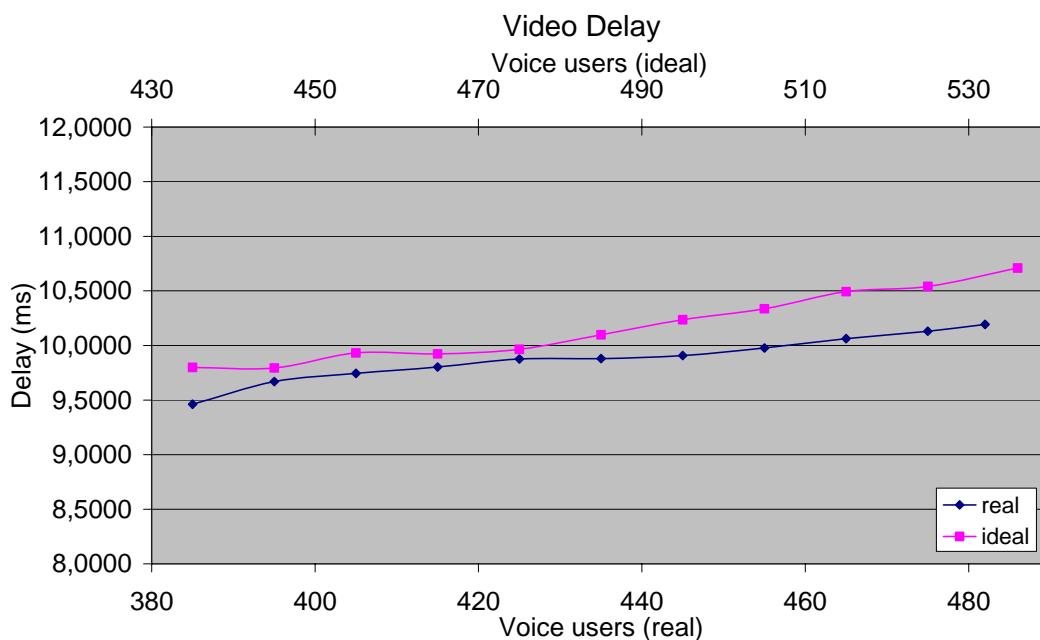
Σχήμα 18. Πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής με 10 χρήστες βίντεο και 5% handoff.



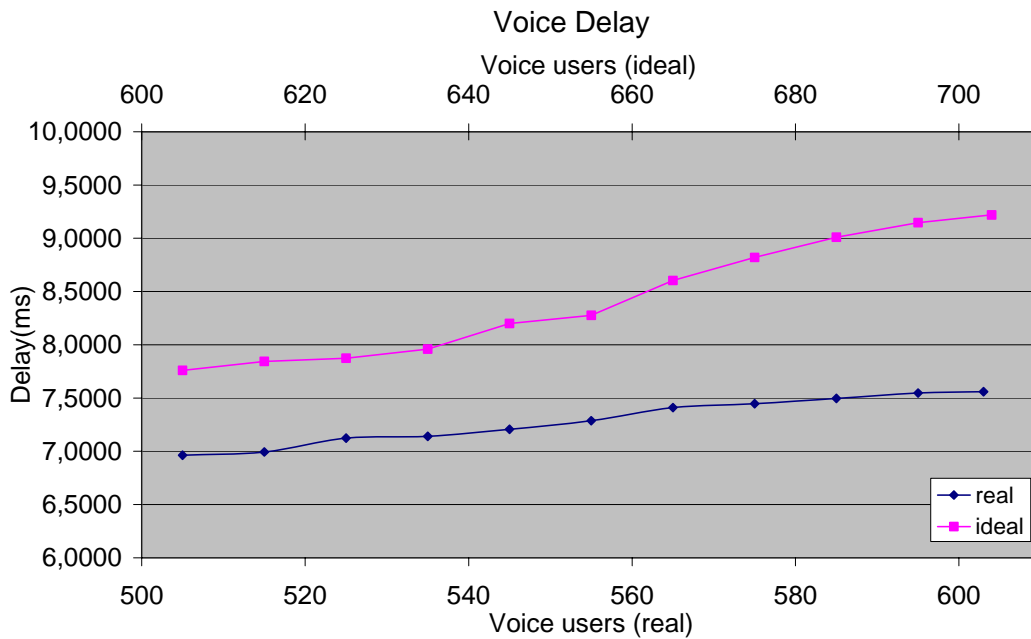
Σχήμα 19. Πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής με 15 χρήστες βίντεο και 10% handoff.



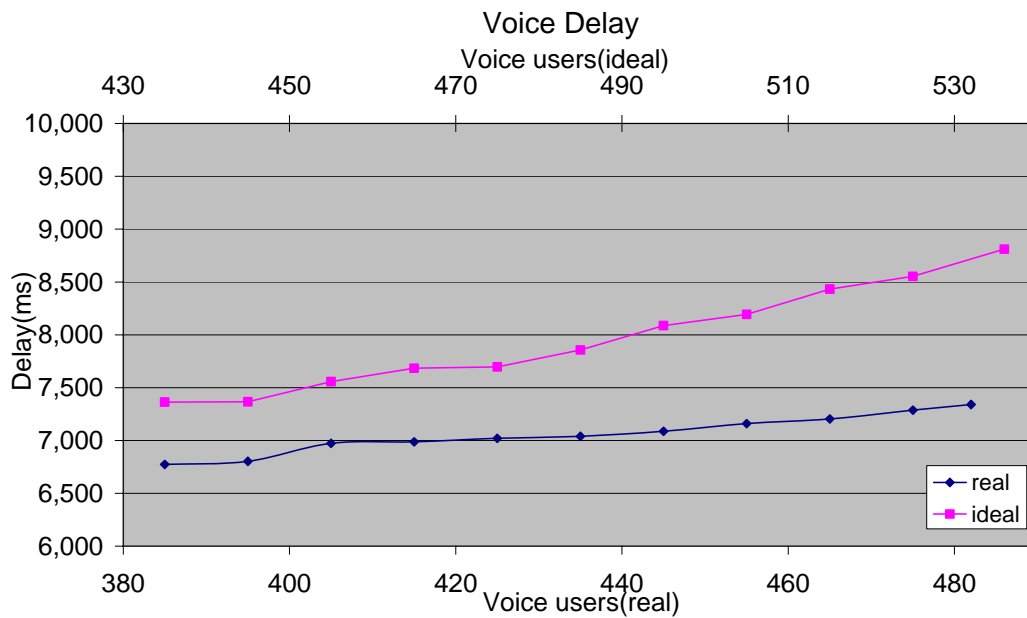
Σχήμα 20. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων βίντεο με 10 χρήστες βίντεο και 5% handoff.



Σχήμα 21. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων βίντεο με 15 χρήστες βίντεο και 10% handoff.



Σχήμα 22. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων φωνής με 10 χρήστες βίντεο και 5% *handoff*.



Σχήμα 23. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων φωνής με 15 χρήστες βίντεο και 10% *handoff*.

Το πρώτο σχόλιο που χρειάζεται να γίνει για τις μετρικές που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 16-23 είναι ότι, αυξανόμενου του αριθμού των χρηστών φωνής που υπάρχουν μέσα στο σύστημα και για τους δύο μηχανισμούς κατανομής πόρων αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και η πιθανότητα απόρριψης πακέτων βίντεο. Όταν ο αριθμός αυτός πλησιάζει την μέγιστη χωρητικότητα για τους χρήστες φωνής, εμφανίζει μία εκθετική αύξηση που έχει σαν αποτέλεσμα μετά την μέγιστη χωρητικότητα η πιθανότητα απόρριψης να υπερβαίνει το 0,01% και να μην ικανοποιούνται τα QoS για την μετάδοση του βίντεο – το γεγονός αυτό δείχνει ότι η κίνηση βίντεο είναι υπεύθυνη για την αδυναμία του συστήματος να «αντέξει» περισσότερους χρήστες, καθώς το QoS των χρηστών βίντεο, και όχι των χρηστών φωνής, είναι αυτό που παραβιάζεται πρώτο. Παράλληλα, ο μέσος όρος της πιθανότητας αυτής είναι μεγαλύτερος για τον προτεινόμενο μηχανισμό απ’ ότι στον ιδανικό για κάθε σενάριο, όπως επίσης είναι μεγαλύτερος για το πρώτο σενάριο (μεσαίο φορτίο βίντεο) απ’ ότι στο δεύτερο (υψηλό φορτίο βίντεο) για κάθε μηχανισμό. Οι λόγοι είναι, πρώτον, ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός υπολείπεται του ιδανικού, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, εφ’ όσον δεν εκμεταλλεύεται το ίδιο αποτελεσματικά τις χρονοθυρίδες πληροφορίας στις οποίες έχουμε αποτυχημένη μετάδοση βίντεο και, δεύτερον, το γεγονός ότι το δεύτερο επιλεγμένο σενάριο κίνησης περιλαμβάνει υψηλό φορτίο χρηστών βίντεο και handoff – η ύπαρξη αυτού του φορτίου προκαλεί την μείωση του συνολικού αριθμού χρηστών στο σύστημα (περισσότεροι χρήστες βίντεο οδηγούν σε σημαντική μείωση των χρηστών φωνής) αλλά και την σχετική μείωση των συγκρούσεων στις χρονοθυρίδες αιτήσεων των *non-handoff* χρηστών, λόγω της ύπαρξης περισσότερων *handoff* χρηστών σε σχέση με το πρώτο επιλεγμένο σενάριο κίνησης.

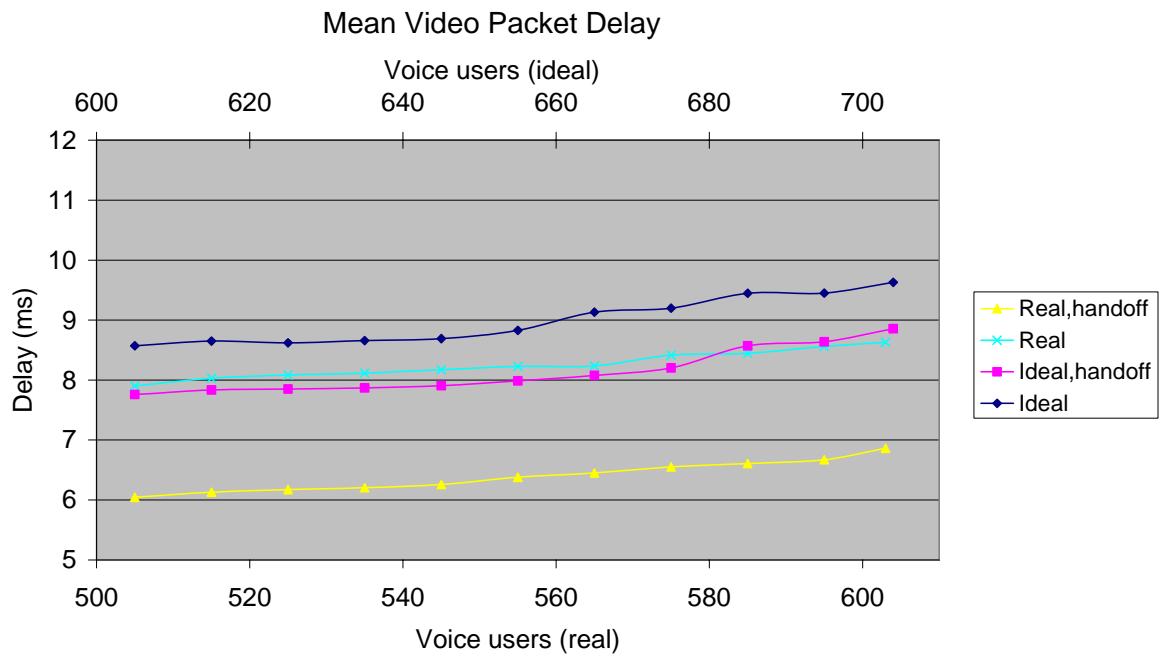
Το δεύτερο σημαντικό σχόλιο πάνω στα αποτελέσματα των Πινάκων 8-11 και των Σχημάτων 16-23 είναι ότι και οι δύο μηχανισμοί και για τα δύο σενάρια ικανοποιούν πλήρως τις απαιτήσεις QoS που ισχύουν για την πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής. Η απαίτηση QoS αυτής της υπηρεσίας όπως προαναφέρθηκε βρίσκεται στο 1%, ενώ το εύρος του συνόλου των τιμών και για τα δύο σενάρια κυμαίνεται από 0,0103% έως 0,0123%, γεγονός που δείχνει για μια ακόμη φορά ότι η κίνηση βίντεο είναι αυτή που περιορίζει την μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής στο σύστημα και αποτελεί το κρισιμότερο παράγοντα για την σχεδίαση και την απόδοση του συστήματος. Επιπλέον μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέση πιθανότητα

αποτυχημένης μετάδοσης φωνής, όπως αναμενόταν, είναι μικρότερη στον ιδανικό μηχανικό σε σχέση με τον προτεινόμενο.

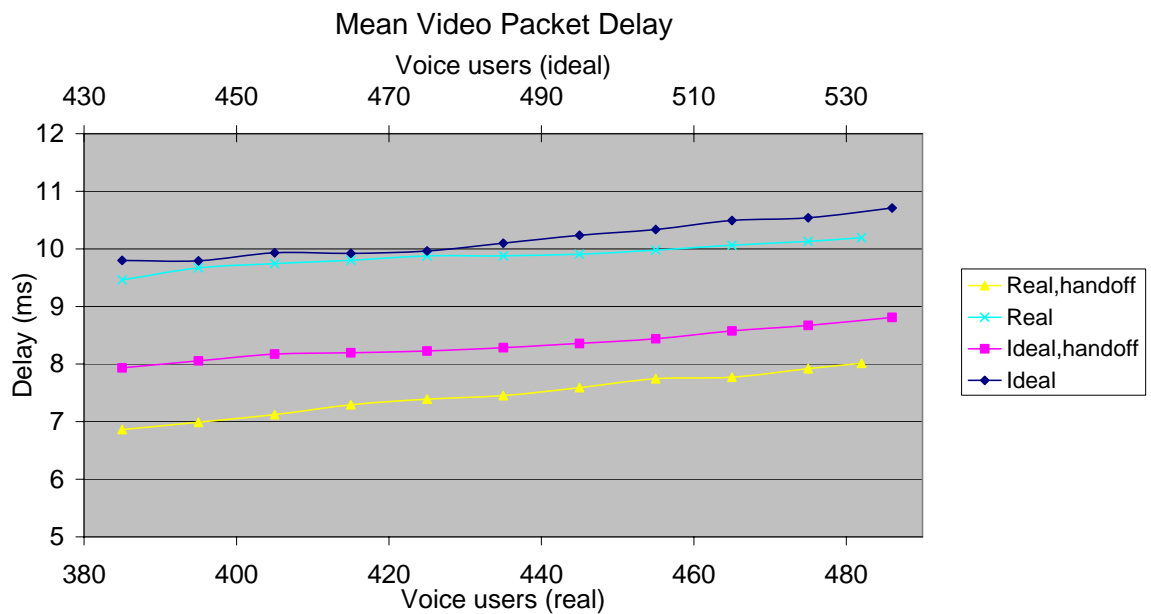
Άμεσα συνδεδεμένη με τον αριθμό των χρηστών φωνής είναι και η μετρική της μέσης καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων βίντεο. Αυξανόμενου του αριθμού των χρηστών φωνής στο σύστημα αυξάνεται και η μέση καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων, βίντεο και όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των χρηστών βίντεο στο σύστημα τόσο μεγαλύτερη είναι η καθυστέρηση μετάδοσης. Αυτό οφείλεται στο ότι οι χρήστες φωνής λειτουργούν εις βάρος του βίντεο γιατί όσοι περισσότεροι χρήστες φωνής είναι μέσα στο σύστημα τόσο λιγότερες χρονοθυρίδες πληροφορίας αφήνουν προς εκμετάλλευση για τους χρήστες βίντεο.

Παράλληλα, αυξανόμενου του αριθμού χρηστών φωνής στο σύστημα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και η καθυστέρηση μετάδοσης της φωνής. Όσον αφορά την συγκεκριμένη μετρική, αξίζει να σημειωθεί πως, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός χρηστών βίντεο στο σύστημα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η καθυστέρηση μετάδοσης της φωνής, καθώς υπάρχουν λιγότερες διαθέσιμες χρονοθυρίδες για την μετάδοση φωνής.

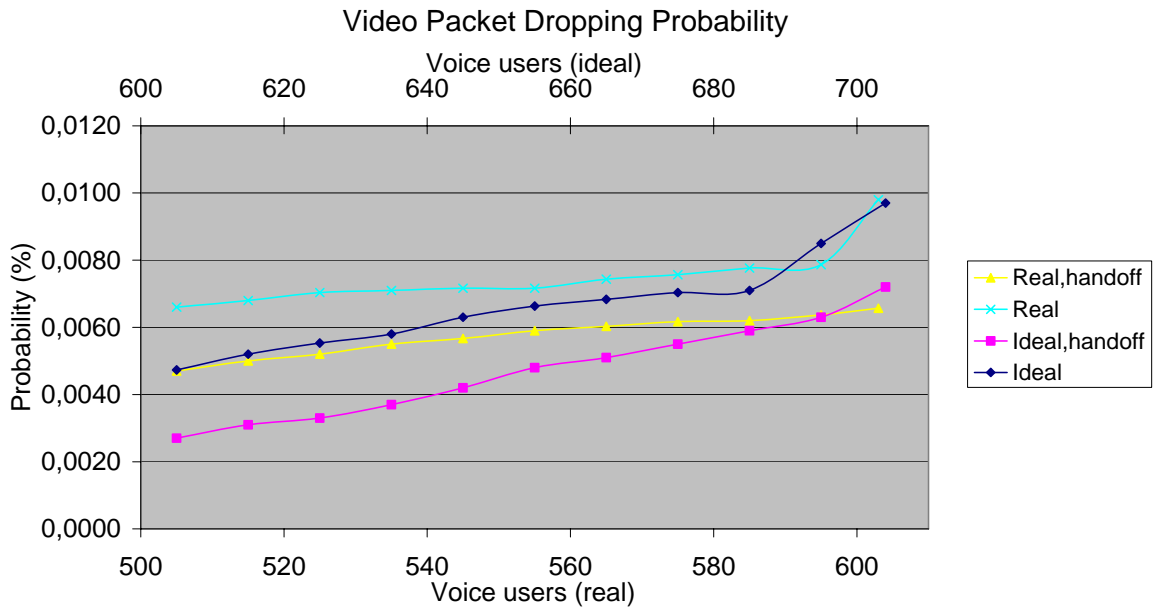
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε, στα Σχήματα 24-29, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας που αφορούν στην μέση καθυστέρηση πακέτων βίντεο από handoff βίντεο χρήστες, καθώς και στην μέση πιθανότητα απόρριψης πακέτων φωνής και πακέτων βίντεο για τους *handoff* χρήστες. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για το σύνολο των χρηστών (*handoff* και non-*handoff* χρήστες).



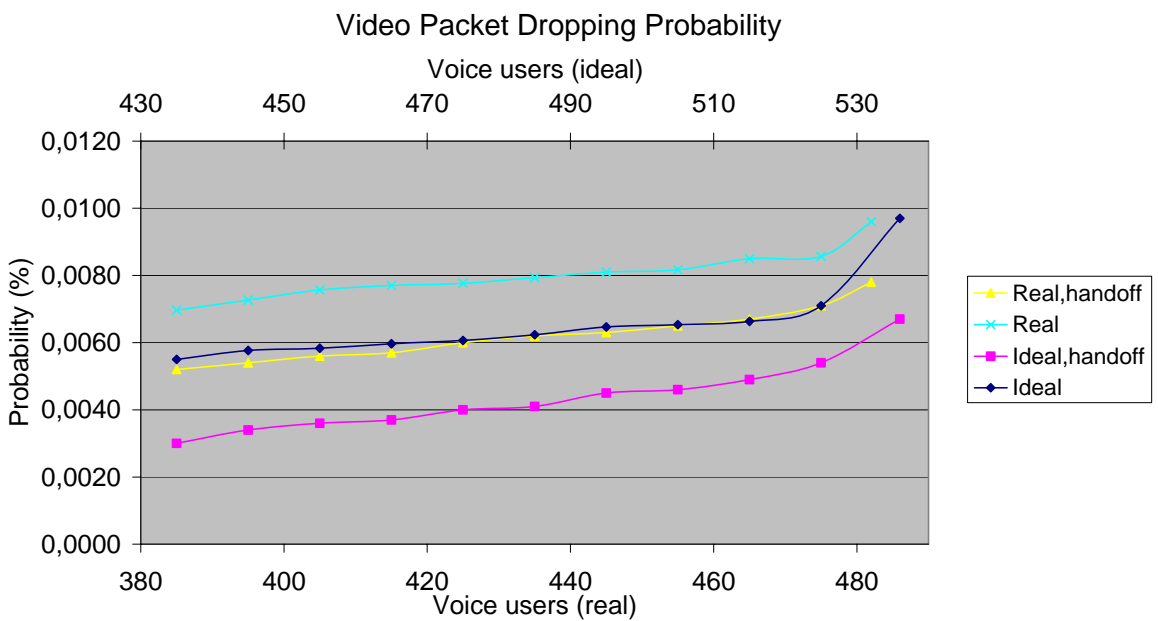
Σχήμα 24. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης *handoff* πακέτων βίντεο, με 10 χρήστες βίντεο και 5% *handoff*.



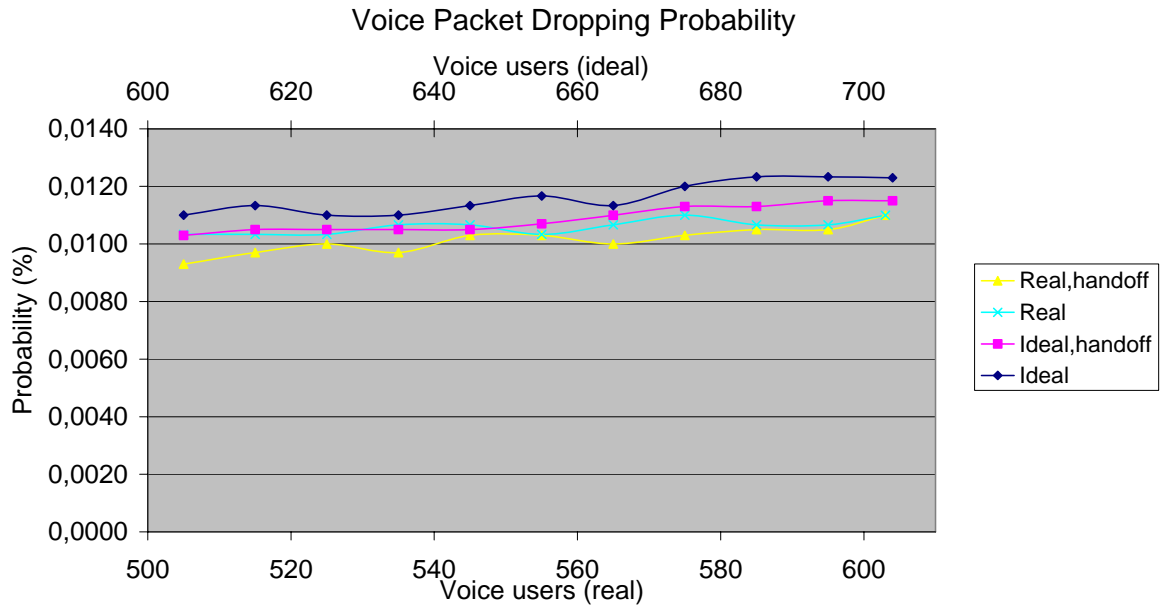
Σχήμα 25. Μέση καθυστέρηση μετάδοσης *handoff* πακέτων βίντεο, με 15 χρήστες βίντεο και 10% *handoff*.



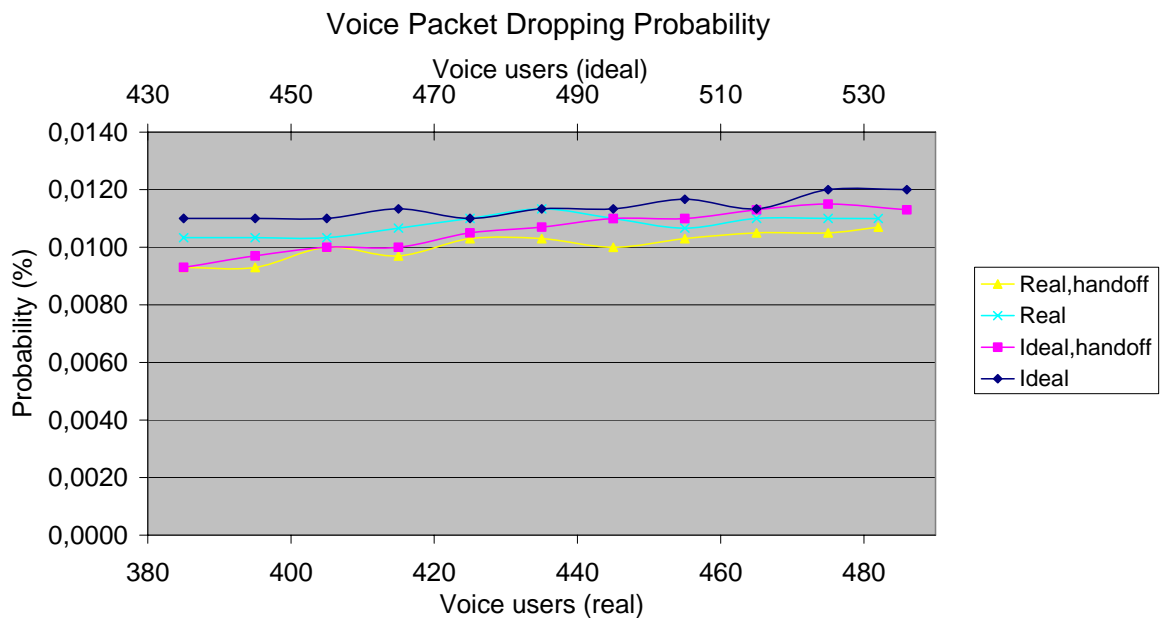
Σχήμα 26. Μέση πιθανότητα απόρριψης *handoff* πακέτων βίντεο, με 10 χρήστες βίντεο και 5% *handoff*.



Σχήμα 27. Μέση πιθανότητα απόρριψης *handoff* πακέτων βίντεο, με 15 χρήστες βίντεο και 10% *handoff*.



Σχήμα 28. Μέση πιθανότητα απόρριψης *handoff* πακέτων φωνής, με 10 χρήστες βίντεο και 5% *handoff*.



Σχήμα 29. Μέση πιθανότητα απόρριψης *handoff* πακέτων φωνής, με 15 χρήστες βίντεο και 10% *handoff*.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό πως η συμπεριφορά των μετρικών που αφορούν στους χρήστες *handoff* (βίντεο και φωνής) ακολουθεί την γενική συμπεριφορά των μετρικών που αφορούν στο σύνολο των χρηστών. Παρόλ' αυτά, το *QoS* των *handoff* χρηστών είναι σημαντικά καλύτερο από αυτό που απολαμβάνει το σύνολο των χρηστών. Ο λόγος για την διαφορά αυτή είναι η μεγαλύτερη προτεραιότητα των *handoff* χρηστών στην χρησιμοποίηση των πόρων του συστήματος, την οποία διασφαλίζει ο προτεινόμενος μηχανισμός, και η οποία λειτουργεί εις βάρος των *non-handoff* χρηστών, αυξάνοντας σημαντικά τις απώλειές τους σε πακέτα και σε μέση καθυστέρηση μετάδοσης.

Το επόμενο βήμα της ερευνητικής μας δουλειάς θα είναι η διεύρυνση του συστήματος με την προσθήκη κίνησης δεδομένων από διάφορες υπηρεσίες, όπως email, SMS και WAP.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]. V. H. MacDonald, "The Cellular Concept", *Bell Sys. Tech. Journal*, Vol. 58, No. 1, pp. 15-41, January 1979.
- [2]. ETSI, "General Packet Radio Service (GPRS), Requirements Specification of General Packet Radio Service", *GSM 01.06, Version 1.1.0*, Nov. 1994.
- [3]. J. Cai and D. J. Goodman, "General Packet Radio Service in GSM", *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 35, No. 10, October 1997.
- [4]. IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", *IEEE Std 802.11-1997, The IEEE*, New York, 1997.
- [5]. ETSI, "Radio Equipment and Systems (RES), High Performance Radio LAN (HIPERLAN), Type 1; Functional Specification", *ETS 300-652*, October 1996.
- [6]. [Online] www.tkn.tu-berlin.de/research/trace/trace.html
- [7]. F. H. P. Fitzek and M. Reisslein, "MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation", *IEEE Network*, Vol. 15, No. 6, 2001, pp. 40-54.
- [8]. E. N. Gilbert, "Capacity of a burst-noise channel," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 39, pp. 1253-1265, 1960.
- [9]. E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst-noise channels," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 42, pp. 1977-1997, 1963.
- [10]. P. Koutsakis, S. Psychis and M. Paterakis, "Integrated Wireless Access for Videoconference from MPEG-4 and H.263 Video Coders with Voice, E-mail and Web Traffic over Wireless Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 5, 2005, pp. 1863-1874.
- [11]. S. Psychis, P. Koutsakis and M. Paterakis, "A Flexible MAC Protocol for the Integration of High and Low Quality Video Streams, Voice and Data Traffic over High Speed Packet Switched Wireless Networks", *International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier Publ., Vol. 60, No. 4, 2006, pp. 306-315.
- [12]. Y. Fang and Y. Zhang, "Call-Admission Control Schemes and Performance Analysis in Wireless Mobile Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 51, No. 2, 2002.
- [13]. F. Callegati, C. Carciofi, M. Frullone, P. Grazioso and G. Riva, "Call-Admission Control for PRMA-based Multiservice Cellular Networks", *IEICE Transactions on Communications*, April 1995.

- [14]. K. Pahlavan and A. Levesque, "Wireless Data Communications", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No. 9, September 1994.
- [15]. A. Willig, "A new class of packet- and bit-level models for wireless channels," in *Proc. of the 13th IEEE Int. Symp. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2002*, Lisbon, Portugal.
- [16]. M. Hassan, M. M. Krunz, and I. Matta, "Markov-based channel characterization for tractable performance analysis in wireless packet networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 3, pp. 821-831, 2004.
- [17]. P. Koutsakis and M. Paterakis, "Highly Efficient Voice-Data Integration over Medium and High Capacity Wireless TDMA Channels", *Wireless Networks Journal*, Springer Publ., Vol. 7, No.1, 2001, pp. 43-54.
- [18]. M. Bottigliengo, C. Casetti, C.-F. Chiasserini, and M. Meo, "Short-term fairness for TCP flows in 802.11b WLANs," in *Proc. of the IEEE Infocom 2004*, Hong Kong, China.
- [19]. P. Koutsakis and M. Vafiadis, "A Fully Dynamic Scheduling Mechanism for Multimedia Integration in Next Generation Wireless Networks", *accepted for publication in the Computer Communications Journal (Elsevier Publ.)*, currently on the journal's web site as an "Article in Press".
- [20]. F. Bauchot, "MASCARA: A Wireless ATM MAC Protocol", in *Proceedings of the Wireless ATM Workshop*, Helsinki, Finland, September 1996.
- [21]. J. E. Padgett et al., "Overview of Wireless Personal Communications", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 33, No.1, pp. 28-41, January 1995.
- [22]. E. Ayanoglu et al., "Wireless ATM: Limits, Challenges and Proposals", *IEEE Personal Communications*, Vol.3, No. 4, pp. 18-34, August 1996.
- [23]. M. Nishio, M. Shinagawa, and T. Kobayashi, "A lossless handover method for video transmission in mobile ATM networks and its subjective quality assessment," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 37, no. 11, pp. 1964-1973, 1999.
- [24]. C.-K. Toh and Bora Akyol, "A Survey of Handover Techniques for Wireless ATM Networks", *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 5, no. 1, pp. 43-60, Jan. 1998.
- [25]. Li-Chun Wang, Ching-Yu Liao, and Chung-Ju Chang, "Soft handover mechanism with constrained unequal power allocation in CDMA heterogeneous cellular architectures," in *Proceedings of the IEEE Globecom*, pp. 1830 - 1834, 2002.
- [26]. F. A. Tobagi, "Multiaccess Link Control", *Computer Network Architectures and Protocols*, P.E. Green, Jr. ed., New York: Plenum Press, 1982.

- [27]. D. Bertsekas and R. Gallager, "Data Networks", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [28]. S. Nanda, D. J. Goodman and U. Timor, "Performance of PRMA: A packet voice protocol for cellular systems ", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40, pp. 584-598, 1991.
- [29]. D. Raychaudhuri, L. J. French, R. J. Siracusa, S. K. Biswas, R. Yuan, P. Narasimhan and C. A. Johnston, "WATMnet: A Prototype Wireless ATM System for Multimedia Personal Communication", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 15, No. 1, pp.83-95, January 1997.
- [30]. X. Wu, S. Wu, H. Sun and L. Li, "Dynamic Slot Allocation Multiple Access Protocol for Wireless ATM Networks", *in Proceedings of the IEEE ICC '97*, Montreal, Canada, June 1997.
- [31]. C.-S. Chang, K.-C. Chen, M.-Y. You and J.-F. Chang, "Guaranteed Quality-of-Service Wireless Access to ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 15, No. 1, pp. 106-118, January 1997.
- [32]. N. M. Mitrou, Th. D. Orinos and E. N. Protonotarios, " A Reservation Multiple Access Protocol for Microcellular Mobile-Communication Systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 39, No. 4, Nov. 1990, pp. 340-351.
- [33]. N. M. Mitrou, G. L. Lyberopoulos and A. D. Panagopoulou, " Voice and Data Integration in the Air-Interface of a Microcellular Mobile Communication System ", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 1, Feb. 1993, pp. 1-13.
- [34]. A. C. Cleary and M. Paterakis, "On the Voice-Data Integration in Third Generation Wireless Access Communication Networks", *European Transactions on Telecommunications and Related Technologies*, Vol.5, No.1, Jan.-Feb.1994, pp.11-18.
- [35]. J. Metzler, "A LAN Perspective on Wireless WAN Requirements", [Online] http://www.flarion.com/products/whitepapers/MetzlerLatencyApps_Paper.pdf
- [36]. [Online] <http://www.heitec.sk/EN/xml/heikon.htm>
- [37]. P. Koutsakis and M. Paterakis, "Near-Optimal Voice-Data Integration over Third Generation Medium and High Capacity Wireless TDMA Channels ", *in Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference 1999 (WCNC '99)*, New Orleans, USA, pp. 1382-1386.
- [38]. [Online] <http://www.eurotechnology.com>
- [39]. F. Akyildiz, J. McNair, L. C. Martorell, R. Puigjaner and Y. Yesha, "Medium Access Control Protocols for Multimedia Traffic in Wireless Networks", *IEEE Network*, Vol. 13, No. 4, 1999, pp. 39-47.

- [40]. D.A. Dyson and Z. J. Haas, "A Dynamic Packet Reservation Multiple Access Scheme for Wireless ATM", *ACM /Baltzer MONET Journal*, Vol. 4, No.2, 1999, pp. 87-99.
- [41]. X. Wang and Y. Chen, "A TDMA/FDD MAC Protocol Based on a New Resource Updating Scheme", in *Proceedings of the IEEE GLOBECOM 2001*, San Antonio, USA.
- [42]. S. Elnoubi and A. M. Alsayh, "A Packet Reservation Multiple Access-Based Algorithm for Multimedia Wireless System", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 53, No. 1, 2004, pp. 215-222.
- [43]. G. Bianchi, F. Borgonovo, L. Fratta, L. Musumeci and M. Zorzi, "C-PRMA: A Centralized Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 46, No. 2, 1997, pp. 422-436.
- [44]. A. C. Cleary and M. Paterakis, "Design and Performance Evaluation of an RRA Scheme for Voice-Data Channel Access in Outdoor Microcellular Wireless Environments", *Mobile Networks and Applications (MONET) Journal*, ACM/Baltzer Science Publishers, Vol. 2, No.1, 1997, pp. 31-43.
- [45]. R. Rom and M. Sidi, "Multiple Access Protocols: Performance and Analysis", *Springer Verlag*, 1990.
- [46]. M. Paterakis, L. Georgiadis and P. Papantoni-Kazakos, "A Full Sensing Window RA Algorithm for Networks with Strict Delay Constraints", *Algorithmica*, Vol. 4, 1989, pp.313-328.
- [47]. P. T. Brady, "A Technique for Investigating On-Off Patterns of Speech", *Bell Sys. Tech. Journal*, Jan. 1965.
- [48]. Q Pang, A. Bigloo et. al., "Service Scheduling for General Packet Radio Service Classes", *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference 1999 (WCNC'99)*, New Orleans, USA.
- [49]. ETSI. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Technical Realization of the Short Message Service (SMS); Point-to-Point (PP). (GSM 03.40)
- [50]. W. C. Wong and D. J. Goodman, "A Packet Reservation Multiple Access Protocol for Integrated Speech and Data Transmission", *IEE Proceedings-1*, Vol. 139, Dec. 1992, pp.607-612.