

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ  
ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΑΚΟ ΦΟΡΤΟ ΣΕ  
ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤDΜΑ ΔΙΚΤΥΑ**

**ΚΥΜΠΟΥΡΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**2005**

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Πατεράκη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και για την ανεκτίμητη βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας μου. Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα διδάσκοντα κ. Πολυχρόνη Κουτσάκη για την καθοδήγησή που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας, που χωρίς αυτή δεν θα είχα ποτέ καταφέρει να εντυπώσω στο θέμα με το οποίο ασχολήθηκα. Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Νίκο Σιδηρόπουλο για την ανάγνωση της διπλωματικής μου και τα σχόλιά του. Ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν ηθικά και κάθε στιγμή που τους αναζήτησα βρίσκονταν πάντα δίπλα μου για να μου προσφέρουν τη βοήθειά τους.

Κυμπούρης Βασίλης

Νοέμβριος 2005

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| Κεφάλαια  | Σελίδα |
|---|--------|
| Εισαγωγή.....   | 4      |
| 1. Εισαγωγή.....  | 5      |
| 1.1 Ενσύρματα και Ασύρματα Δίκτυα.....  | 5      |
| 1.2 Ασύρματα Δίκτυα.....  | 7      |
| 1.2.1 Ασύρματη Τηλεφωνία (Cordless Telephony).....  | 7      |
| 1.2.2 Κυψελωτά Δίκτυα Φωνής.....  | 9      |
| 1.2.3 Κυψελωτά Δίκτυα Δεδομένων.....  | 11     |
| 1.2.4 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα Δεδομένων.....   | 15     |
| 1.3 Συνδυασμός Ασύρματων Δικτύων και Τεχνολογίας ATM.....   | 15     |
| 1.3.1 Έλεγχος Πολλαπλής Πρόσβασης.....  | 17     |
| 1.3.2 Έλεγχος Λαθών.....  | 18     |
| 1.3.3 Αλλαγή Σταθμού Βάσης (Handover).....  | 18     |
| 1.4 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Πολλαπλής Πρόσβασης.....   | 19     |
| 1.5 Το Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης.....  | 22     |
| 2. Εισαγωγή.....  | 26     |
| 2.1 Το μοντέλο του συστήματος.....  | 26     |
| 2.1.1 Δομή του Πλαισίου του Καναλιού.....   | 26     |
| 2.1.2 Ενέργειες των Τερματικών Φωνής και Δεδομένων, και Χρονοπρογραμματισμός στον Σταθμό Βάσης..... | 29     |
| 2.1.3 Πρωτόκολλα Μετάδοσης.....   | 32     |
| 2.1.3.1 Τερματικά Δεδομένων.....  | 32     |
| 2.1.3.2 Τερματικά Φωνής.....  | 34     |
| 2.1.4 Μοντέλο για την Κίνηση Φωνής.....   | 36     |
| 2.1.5 Μοντέλο για την Κίνηση Δεδομένων.....   | 36     |
| 2.2 Παράμετροι του Συστήματος.....  | 38     |
| 2.3 Αποτελέσματα.....   | 41     |
| 2.3.1 Υλοποίηση πρωτοκόλλων.....  | 41     |
| 2.3.2 Συζήτηση πάνω στα αποτελέσματα.....   | 42     |
| 2.3.3 Γενικά συμπεράσματα – Η πρότασή μας- Μελλοντική Δουλειά.....                                  | 53     |
| Βιβλιογραφικές αναφορές.....  | 54     |

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης και γι' αυτό οι εφαρμογές τους αφορούν κυρίως σε μεταδόσεις φωνής και δεδομένων χαμηλού ρυθμού. Το πρόβλημα αυτό προσπαθεί να αντιμετωπίσει η παρούσα εργασία με τη χρήση ενός μηχανισμού με τον οποίο η χωρητικότητα των χρηστών θα είναι ιδιαίτερα υψηλή.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται 4 είδη πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Control protocols, MAC protocols) για ασύρματα δίκτυα. Και τα τέσσερα MAC πρωτόκολλα χρησιμοποιούν κανάλι ρυθμού μετάδοσης δεδομένων της τάξης των 9 Mbps. Ολοκληρώνουν κίνηση φωνής και τριών ειδών δεδομένων (email, sms, wap), και χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους επίλυσης συγκρούσεων για όλα τα είδη κίνησης. Στην εργασία μελετάται η απόδοση των πρωτοκόλλων και υπολογίζεται η χωρητικότητα του καναλιού σε χρήστες φωνής για κάθε περίπτωση.

Τελικά διαπιστώθηκε ότι κάθε MAC πρωτόκολλο υπερτερεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις των υπολοίπων, κι έτσι είναι κατάλληλο για συγκεκριμένο φορτίο κίνησης στο ασύρματο κανάλι. Ανάλογα με το MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται, υπάρχει κάποιος ρυθμός άφιξης δεδομένων που δίνει βέλτιστα αποτελέσματα πολυπλεξίας. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί ο σταθμός βάσης θα έχει την δυνατότητα, γνωρίζοντας την κίνηση στο κανάλι, να ενημερώνει τα τερματικά που προσπαθούν να μεταδώσουν ποιο πρωτόκολλο θα χρησιμοποιούν για βέλτιστη χρήση του εύρους ζώνης του καναλιού.

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ενσύρματα και Ασύρματα Δίκτυα

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 υποστηρίζει 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 υποστηρίζει 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 Ασύρματα Δίκτυα**

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:

### **1.2.1. Ασύρματη Τηλεφωνία (Cordless Telephony)**

Παρέχουν περιορισμένη εμβέλεια, άρα και μικρή ισχύ εκπομπής των τηλεφώνων, ανέχονται μικρές ταχύτητες στην κίνηση των χρηστών και υποστηρίζουν αποκλειστικά τηλεφωνία (φωνή). Η πρώτη γενιά τυποποιήσεων στην ασύρματη τηλεφωνία μέσω των προτύπων CT0 και CT1 (Cordless Telephony 0 και 1, αντίστοιχα) παρείχε αναλογική μετάδοση με διαμόρφωση συχνότητας (Frequency

Modulation, FM) και πολλαπλή προσπέλασης του ασυρμάτου μέσου με τεχνική Διαίρεση Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Η συνεχώς αναπτυσσόμενη αγορά, σε συνάρτηση με την ωρίμανση της ψηφιακής τεχνολογίας, οδήγησε στην προδιαγραφή του CT2. Το CT2 αναπτύχθηκε πρώτα στο Ηνωμένο βασίλειο και υιοθετήθηκε αργότερα ως Πανευρωπαϊκό πρότυπο για την υλοποίηση ασύρματης τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς [10]. Το CT2 παρέχει 40 κανάλια στη ζώνη συχνοτήτων 864-868 MHz και ρυθμό μετάδοσης 72Kbps, παρέχοντας 32Kbps αμφίδρομο κανάλι φωνής χρησιμοποιώντας Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Duplex, TDD).

Ωστόσο, από το 1988 το ινστιτούτο ETSI είχε ξεκινήσει δράσεις για την τυποποίηση ενός νέου προτύπου ασύρματης τεχνολογίας, γνωστό και ως DECT (Digital European Cordless Telephony). Ουσιαστικά το DECT είναι η τεχνολογική μετεξέλιξη του συστήματος DCT900 (Digital Cordless Telephony 900) το οποίο εισήγαγε η Ericsson [11]. Τόσο το DCT900, αρχικά, όσο και το μεταγενέστερο DECT είναι βασισμένα σε τεχνικές πολύπλεξης χρόνου, υποστηρίζουν μεταπομπές, παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και τέλος υποστηρίζουν μεγαλύτερους ρυθμούς πρόσβασης. Όσο αφορά το DECT, λειτουργεί στη ζώνη των 1880-1900MHz, παρέχοντας συνολικής ταχύτητα μετάδοσης 1152Kbps σε δέκα συχνότητες, με 12 χρονοαμφίδρομα κανάλια ανά συχνότητα (τεχνική TDD), επιτρέποντας την υποστήριξη 120 καναλιών φωνής (basic bearer service) ανά σταθμό βάσης. Σε κάθε DECT συχνότητα εφαρμόζεται η τεχνική Πολλαπλής Προσπέλασης με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA), σύμφωνα με την οποία ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια των χρονοθυρίδων (time slots), κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται για ένα κανάλι φωνής. Παρά το γεγονός ότι το DECT αναπτύχθηκε κυρίως για την ασύρματη τηλεφωνία, η εξέλιξή του ήταν ραγδαία και έτσι το DECT συνέχισε να αναπτύσσει πρότυπα βασισμένα στο DECT. Σήμερα μπορεί να θεωρηθεί ότι το DECT παρέχει δυνατότητα υλοποίησης ασύρματου Private Branch eXchange (PBX), ασύρματων τοπικών δικτύων δεδομένων (cordless data), ασύρματων τοπικών βρόγχων (Radio Local Loop, RLL) και επέκτασης των δημοσίων δικτύων (ενσύρματων π.χ., PSTN και ISDN ή ασύρματων π.χ., GSM, DCS1800) [12].

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα CT2 και DECT χρησιμοποιούν ADPCM (Adaptive, Differential Pulse Code Modulation) κωδικοποιητές φωνής, οπότε κάθε κανάλι ομιλίας απαιτεί 32Kbps. Επιπρόσθετα ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι και η δυνατότητα δυναμικής εκχώρησης καναλιών (Dynamic Channel Allocation –



DCA), δηλαδή η δυνατότητα που έχουν οι σταθμοί (κινητοί ή βάσης) να δεσμεύουν κανάλια βάση μετρήσεων των συνθηκών στις ασύρματες ζεύξεις, που πραγματοποιούνται σε πραγματικό χρόνο.

### **1.2.2. 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.

Το AMPS (Advanced Mobile Phone Service) στη Βόρεια Αμερική αποτέλεσε τη πρώτη γενιά συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Στηριζόταν σε αναλογική μετάδοση με διαμόρφωση FM και πολλαπλή προσπέλαση μέσου με τεχνική FDMA και λειτουργούσε στα 800MHz. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 80 ήταν πολύ διαδεδομένο στις ΗΠΑ. Ανάλογο σύστημα, το TACS (Total Access Communication System), χρησιμοποιήθηκε και στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η συνεχόμενη ζήτηση για μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης, οι τεχνολογικές εξελίξεις στις ψηφιακές τηλεπικοινωνίες, καθώς και η αναμενόμενη αύξηση του αριθμού των χρηστών κινητής τηλεφωνίας (σε μερικές χώρες η ζήτηση αυξήθηκε μέχρι και 50% από το 1990 έως το 1995 [13]) οδήγησαν στη δεύτερη γενιά συστημάτων ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας. Στην ανάπτυξη των προτύπων, η Ευρώπη και η Βόρειος Αμερική διαχώρισαν, για ακόμη μια φορά, τους δρόμους τους, και έτσι η δεύτερη γενιά κινητής τηλεφωνίας εκφράστηκε στην Ευρώπη μέσω του GSM (Global System for Mobile communications), και στην Αμερική μέσω του DAMPS (Digital AMPS).

Τα κυριότερα πρότυπα κινητής κυψελωτής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς είναι το GSM που υιοθετήθηκε στην Ευρώπη, το DAMPS (γνωστό και ως IS-54/IS-95) που χρησιμοποιείται στην Αμερικανική ήπειρο, και το Ιαπωνικό JDC (Japan Digital Cellular). Το ETSI έχει αναπτύξει και το πρότυπο DCS1800 (Digital Cellular System) που αποτελεί έκδοση του GSM στα 1800MHz. Στις ΗΠΑ έχει αναπτυχθεί και το PCS1900 (Personal Communication System) το οποίο είναι μια έκδοση των DCS1800 και DAMPS στα 1900MHz. Τα περισσότερα πρότυπα χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους κωδικοποίησης και συμπίεσης φωνής, όπως το RELP (Residually Excited Linear Prediction) στα GSM/DCS1800, και το VSELP (Vector Sum Excited Linear Predictive) στο DAMPS και στο JDC. Αυτές οι μέθοδοι

κωδικοποίησης απαιτούν ταχύτητες πρόσβασης 13kbps και 6,7kbps, αντίστοιχα, δηλαδή πολύ χαμηλότερες από το 32Kbps του ADPCM, άρα περισσότερα κανάλια φωνής μπορούν να πολυπλεχθούν σε κοινό εύρος. Παράλληλα, εφαρμόζονται νέες τεχνικές διαμόρφωσης, αντί της FSK (Frequency Shift Keying), όπως GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) στα GSM/DCS1800,  $\pi/4$ DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) στα DAMPS και JDC [14].

Το GSM χρησιμοποιεί Πολυπλεξία Διάρθρωσης Συχνότητας (Frequency Division Duplex, FDD). Οι συχνότητες τις ζώνης 890-915MHz χρησιμοποιούνται για επικοινωνία των κινητών με το σταθμό βάσης (ανοδικές συχνότητες), ενώ οι συχνότητες της ζώνης 935-960MHz για επικοινωνία του σταθμού βάσης με τα κινητά (καθοδικές συχνότητες). Οι συχνότητες ενός αμφίδρομου ζεύγους μετάδοσης απέχουν 45 MHz. Κάθε συχνότητα έχει εύρος (carrier spacing) 200 KHz, επομένως 125 (ήτοι  $960-935/0.2=125$ ) συχνότητες μπορούν να διατεθούν στους παροχείς κυψελωτών υπηρεσιών, ακολουθώντας, συνήθως, μεθόδους πλειστηριασμού (auction). Η ανάθεση συχνοτήτων, δηλαδή η εκχώρηση άδειων χρήσης, πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε διαφορετικές συχνότητες να εκχωρούνται σε διαφορετικούς παροχείς με χρήση της τεχνικής FDMA, εξασφαλίζοντας ότι η λειτουργία του ασύρματου δικτύου κάθε παροχέα δεν θα παρεμβάλει τις συχνότητες των υπολοίπων. Ως τεχνική διαμόρφωσης ακολουθείται η GMSK αποδίδοντας 270Kbps ανά συχνότητα φάσματος 200KHz, επιτυγχάνοντας, επομένως, αποδοτικότητα διαμόρφωσης 1,35bps/Hz [11]. Σε κάθε GSM συχνότητα εφαρμόζεται η τεχνική TDMA, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια των οκτώ χρονοθυρίδων (time slots), κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται για ένα κανάλι φωνής. Και στο DCS1800 χρησιμοποιείται η τεχνική FDD. Στη ζώνη των 1710-1785MHz επικοινωνούν τα κινητά με το σταθμό βάσης, ενώ στη ζώνη των 1805-1880MHz είναι το αμφίδρομο κανάλι. Οι συχνότητες ενός αμφίδρομου ζεύγους μετάδοσης απέχουν 95MHz. Κάθε συχνότητα έχει εύρος 200KHz, επομένως 375 (ήτοι  $1785-1710/0.2=375$ ) συχνότητες μπορούν να διατεθούν στους παροχείς κυψελωτών υπηρεσιών κατά FDMA. Χρησιμοποιείται GMSK αποδίδοντας 270Kbps ανά κανάλι φάσματος 200KHz. Σε κάθε συχνότητα εφαρμόζεται TDMA, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια των οκτώ χρονοθυρίδων, κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται για ένα κανάλι φωνής.

### 1.2.3 Κυβελωτά Δίκτυα Δεδομένων

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

Το MOBITECH [17] αναφέρεται ως ένα από τα πρώτα εγχειρήματα κυβελωτών συστημάτων μετάδοσης δεδομένων. Λειτουργεί στο φάσμα των 900MHz στη Βόρεια Αμερική και των 450MHz στις υπόλοιπες χώρες. Κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης, ενώ μια αντιστοιχία (cluster) από σταθμούς βάσης ελέγχεται από ένα τοπικό μεταγωγέα δεδομένων. Σε μια γεωγραφική περιοχή, οι τοπικοί μεταγωγείς δεδομένων συγκεντρώνονται σε ισχυρότερους (περιφερειακούς) μεταγωγείς δεδομένων. Οι ενσύρματες<sup>1</sup> συνδέσεις μεταξύ των μεταγωγέων και μεταξύ των σταθμών βάσης και των τοπικών μεταγωγέων χρησιμοποιούν πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτου, όπως το X.25. Στην ασύρματη πρόσβαση χρησιμοποιείται τεχνική FDD. Στη Βόρειο Αμερική, οι καθοδικές συχνότητες (σταθμός βάσης προς κινητά τερματικά) εξυπηρετούνται στα 935-940MHz, και οι ανοδικές (κινητά τερματικά προς σταθμό βάσης) στα 896-901MHz. Κάθε σταθμός βάσης εφοδιάζεται με ένα έως τέσσερα κανάλια των 12,5KHz, που αποδίδουν 8Kbps ανά κανάλι, με χρήση διαμόρφωσης GMSK. Η πρόσβαση σε κάθε κανάλι βασίζεται στο πρωτόκολλο ALOHA με σχισμές (slotted ALOHA). Στα χαρακτηριστικά του MOBITECH συγκαταλέγονται η ευκολία περιαγωγής (roaming) των χρηστών, η χρήση διαδικασιών αποθήκευσης και προώθησης (store and forward) μηνυμάτων στους χρήστες, και η ευκολία διασύνδεσής του με δημόσια δίκτυα μεταγωγής πακέτων (Public Switched Packet Data Networks, PSPDN).

Ως κυρίαρχος των συστημάτων κυβελωτής μετάδοσης δεδομένων αναφέρεται το CDPD (Cellular Digital Packet Data). Άρχισε να αναπτύσσεται στις ΗΠΑ στα τέλη του 1980, με πρωτοβουλία της IBM σε συνεργασία με εννέα από τους τότε παροχείς

---

<sup>1</sup> Ο όρος ενσύρματη σύνδεση εις το εξής θα υπονοεί οποιαδήποτε ζεύξη υλοποιείται είτε με συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού, είτε με ομοαξονικό (coaxial) καλώδιο, είτε με οπτική (μονότροπη ή πολύτροπη) ίνα.

κυβελωτών υπηρεσιών στις ΗΠΑ, μεταξύ των οποίων η NYNEX, η Bell Atlantic και η Ameritech [14], στοχεύοντας να καλύψει το 95% των πυκνά κατοικημένων περιοχών. Η ιδέα πίσω από το CDPD ήταν να χρησιμοποιηθεί το υπάρχον αναλογικό ή ψηφιακό κυβελωτό δίκτυο φωνής των παροχέων και να υποστηριχθεί μετάδοση δεδομένων υπό μορφή πακέτων στα κανάλια φωνής (εύρους 30KHz στο AMPS) όπου δεν ανιχνευόταν δραστηριότητα (αδρανή κανάλια). Το σύστημα CDPD, αν και δεν αυξάνει τον αριθμό των καναλιών που χρησιμοποιείται σε κάθε κυψέλη, ωστόσο, επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, δεδομένου ότι εξυπηρετεί μετάδοση δεδομένων σε αδρανείς περιόδους. Κάθε τυποποιημένο κανάλι εύρους 30KHz αποδίδει ρυθμούς μετάδοσης 19,2Kbps με διαμόρφωση GMSK, για την υποστήριξη μετάδοσης πακέτων δεδομένων από/προς τους σταθμούς βάσης του AMPS. Η πρόσβαση στο κανάλι επιτυγχάνεται με τη μέθοδο Data/Digital Sense Multiple Access (DSMA), που είναι βασισμένη στην καθιερωμένη μέθοδο ανίχνευσης καναλιού πολλαπλής προσπέλασης CSMA (Carrier Sense Multiple Access) του Ethernet. Το CDPD αναπτύχθηκε αρκετά και στις αρχές του 1999 κάλυπτε περίπου το 55% του πληθυσμού. Ήδη προσφέρει στους χρήστες του διασύνδεση με το Internet, ενώ μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα με το ψηφιακό AMPS (IS-54).

Στο τομέα των κυβελωτών δικτύων μετάδοσης δεδομένων η Ευρώπη δεν έμεινε πίσω. Το 1988 το Ινστιτούτο ETSI ξεκίνησε τις διαδικασίες για την ανάπτυξη του TETRA προτύπου (Trans European Trunked Radio), αναγνωρίζοντας τις ανάγκες της εποχής για τυποποίηση ενός Πανευρωπαϊκού ψηφιακού συστήματος ραδιομετάδοσης δεδομένων. Ο εξοπλισμός λειτουργεί στο φάσμα των 400 ή των 800MHz. Στο TETRA κάθε σταθμός βάσης εφοδιάζεται με έναν αριθμό καναλιών 25KHz. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση  $\pi/4$ QPSK, με υψηλή αποδοτικότητα 1,44bps/Hz, επιτυγχάνοντας 36Kbps σε κάθε κανάλι φάσματος 25MHz. Η πρόσβαση στο κανάλι ακολουθεί τη μέθοδο DSMA.. Στο ενσύρματο δίκτυο χρησιμοποιούνται συνδέσεις ISDN και X.25, ενώ στα χαρακτηριστικά του συγκαταλέγεται και η υποστήριξη μεταπομπής.

Στην Ευρώπη, ωστόσο, η ώθηση των κυβελωτών δικτύων μετάδοσης δεδομένων δόθηκε με το GPRS (General Packet Radio Service). Ο στόχος ήταν να αναβαθμιστεί το δίκτυο GSM, ώστε να παρέχει υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων. Η ιδέα δεν ήταν πρωτότυπη, δεδομένου ότι στις ΗΠΑ το σύστημα CDPD στηρίχθηκε στην υποδομή του AMPS. Όμως, στην περίπτωση του GPRS, οι ρυθμοί πρόσβασης στην ασύρματη

ζεύξη είναι αναβαθμισμένοι σε σχέση με το GSM, ενώ η προοπτική διασύνδεσης των κινητών συσκευών με το Internet και η υποστήριξη διαφορετικών κλάσεων QoS αποτέλεσαν βασικό σχεδιαστικό παράγοντα. Αρκετοί, όπως στο [18], αναφέρουν ότι το GPRS αποτελεί μία πρόσθετη υπηρεσία μεταφοράς (bearer service) του GSM. Αυτή η θέση δεν είναι ατεκμηρίωτη, δεδομένου ότι το GPRS χρησιμοποιεί την ίδια περιοχή φάσματος με το GSM, ταυτόσημα κανάλια των 200KHz, την ίδια τεχνολογία TDMA/TDD με πλαίσια των οκτώ χρονοθυρίδων, ενώ χρησιμοποιεί και κοινές υποδομές στο ενσύρματο δίκτυο, που στη νομενκλατούρα των κυψελωτών δικτύων αναφέρεται ως PLMN (Public Land Mobile Network), κυρίως για τη διαχείριση των διαδικασιών εγγραφής, αυθεντικοποίησης και κινητικότητας των χρηστών. Μία σημαντική διαφορά μεταξύ των συστημάτων GSM και GPRS είναι ότι στο πρώτο για κάθε σύνδεση ομιλίας δεσμεύεται στατικά μια χρονοθυρίδα (slot) στο κάθε TDMA πλαίσιο των οκτώ χρονοθυρίδων, που περιοδικά επαναλαμβάνεται. Στο GPRS, αντίθετα, δεν πραγματοποιείται στατική δέσμευση πόρων, αλλά στατική πολυπλεξία των υπό μετάδοση πακέτων, που ανήκουν σε μία σύνδεση. Κάθε σύνδεση μεταφοράς δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερες από μία χρονοθυρίδες στο κάθε TDMA πλαίσιο των οκτώ χρονοθυρίδων, που περιοδικά επαναλαμβάνεται. Το GPRS προϋποθέτει την εγκατάσταση ειδικής λειτουργικής μονάδας ελέγχου πακέτων (Packet Control Unit-PCU) η οποία αναλαμβάνει τον έλεγχο πρόσβασης των πακέτων στην ασύρματη ζεύξη. Οι ταχύτητες πρόσβασης στην ασύρματη ζεύξη μπορούν να φτάσουν τα 115Kbps. Στο [18], όπου παρουσιάζονται αναλυτικά η αρχιτεκτονική, τα πρωτόκολλα και οι τεχνολογίες ασύρματης ζεύξης του GPRS, αναφέρεται ότι το GPRS υποστηρίζει διαφορετικές κλάσεις QoS, όσο αφορά την αξιοπιστία μετάδοσης (πιθανότητες σφαλμάτων σε πακέτα προς μετάδοση), αλλά και την καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων, ανάλογα με το μήκος τους. Στο GPRS έχουν τυποποιηθεί δύο είδη κόμβων υποστήριξης διαδικασιών (GPRS Support Nodes, GSN) ο SGSN (Service GSN) και ο GGSN (Gateway GSN). Ο πρώτος κόμβος αναλαμβάνει τη δρομολόγηση πακέτων προς τα κινητά τερματικά που κινούνται στην περιοχή που εξυπηρετεί, ενώ ο δεύτερος είναι υπεύθυνος για τη διασύνδεση των δικτύων GPRS με ενσύρματα δίκτυα δεδομένων, όπως IP (Internet Protocol) δίκτυα. Για το σκοπό αυτό, το GPRS υποστηρίζει σημαντικές υπηρεσίες δικτύου, όπως την DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), ώστε κάθε κινητό τερματικό να ανακτά δυναμικά μια IP διεύθυνση, και την DNS (Domain Name Service) για διευκόλυνση της πρόσβασης των χρηστών σε εξυπηρετές του

διαδικτύου. Το GPRS αποτελεί ένα σημαντικό ενδιάμεσο στάδιο για την ανάπτυξη κυψελωτών δικτύων τρίτης γενιάς (3<sup>rd</sup> Generation, 3G). Στην Ευρώπη παρέχονται υπηρεσίες GPRS από τα μέσα του 2000, ενώ στην Ελλάδα αντίστοιχες υπηρεσίες ενεργοποιήθηκαν στα μέσα του 2001.

Στη διαδικασία ανάπτυξης κυψελωτών δικτύων τρίτης γενιάς, το EDGE αποτελεί ακόμα ένα εναλλακτικό μονοπάτι πέρα από το GPRS.. Κύριος στόχος του EDGE είναι η αναβάθμιση της ασύρματης ζεύξης των συστημάτων GSM και GPRS, ώστε στο ίδιο κανάλι των 200KHz να υποστηρίζεται ρυθμός μετάδοσης 384Kbps. Για το σκοπό αυτό, το EDGE χρησιμοποιεί τη διαμόρφωση 8-PSK (Phase Shift Keying), σε αντίθεση με τα GSM και GPRS πρότυπα που στηρίζονται σε GMSK διαμόρφωση, υπερδιπλασιάζοντας την αποδοτικότητα διαμόρφωσης.

Το σύστημα EDGE θα υποστηρίζει όλες τις υπηρεσίες του GPRS (π.χ., πρόσβαση στο Internet), αλλά και πρόσθετες, όπως μετάδοση φωνής μέσω IP (Voice over IP-VoIP). Τα συστήματα GPRS και EDGE αποτελούν ελκυστική λύση για τους παροχείς κυψελωτών υπηρεσιών, εφόσον χωρίς να απαιτούνται νέες συχνότητες (άρα και άδειες χρήσης), μπορούν να αναβαθμίσουν τις παρεχόμενες υπηρεσίες τους προς τους χρήστες.

Ο κατεξοχήν διεθνής φορέας έκδοσης τυποποιήσεων στις τηλεπικοινωνίες είναι η ένωση ITU (International Telecommunications Union). Η προοπτική ανάπτυξης ασύρματων και κυψελωτών τεχνολογιών 3G της ITU καλείται IMT2000 (International Mobile Telephone 2000). Στο πλαίσιο IMT2000 τα συστήματα 3G θα υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών προς τους χρήστες, από χαμηλής ταχύτητας μετάδοση φωνής, έως πολύ υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, εικόνων και video. Στο πλαίσιο IMT2000 θα παρέχονται με ομοιογενή τρόπο ταχύτητες πρόσβασης 144Kbps σε κινούμενα οχήματα, 384Kbps σε υπαίθριους χώρους μέσης εμβέλειας, μέχρι 2Mbps σε εσωτερικούς ή υπαίθριους χώρους μικρής εμβέλειας και 9,6Kbps για δορυφορικές επικοινωνίες [17]. Το UMTS αποτελεί ένα εναλλακτικό σύστημα ανάπτυξης και παροχής υπηρεσιών 3G που εξελίσσεται στα πλαίσια του IMT2000 και υποστηρίζεται, κυρίως, από Ευρωπαϊκούς οργανισμούς παροχής υπηρεσιών και κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακών υλικών. Το εύρος ζώνης των UMTS/IMT2000 είναι πολλαπλάσιο από τα 200KHz των GSM/GPRS τεχνολογιών και απαιτεί ειδικούς μηχανισμούς διαχείρισης.

#### **1.2.4 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, πανεπιστημιούπολεις, 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 Συνδυασμός Ασύρματων Δικτύων και Τεχνολογίας ATM**

Ο συνδυασμός των ασύρματων δικτύων και της τεχνολογίας ATM 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 ATM. Ο συνδυασμός αυτός δεν είναι εύκολος, γιατί το ATM έχει σχεδιασθεί για περιβάλλοντα πολύ διαφορετικά από τα ασύρματα δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, το ATM υποθέτει:

- σταθερούς χρήστες,
- άφθονο και σταθερό εύρος ζώνης, το οποίο είναι δυνατόν να κατανεμηθεί 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 συχνότητων 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 ATM 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 Πολλαπλής Πρόσβασης**

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 (Multiple Access Control, Έλεγχος Πολλαπλής Πρόσβασης) 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 διανεμούνται 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 Λαθών**

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 υπηρεσίας (QoS), 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 Αλλαγή Σταθμού Βάσης (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, 24, 25].

#### **1.4 Κατηγορίες Πρωτοκόλλων Πολλαπλής Πρόσβασης**

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., [36]). 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 Πρωτόκολλο Πολλαπλής Πρόσβασης**

Τα ασύρματα δίκτυα 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> 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<sup>ης</sup> γενιάς, περίπου 200Kbps (τυπικά 384Kbps) για DoCoMo και Vodafone κινητών τηλεφώνων 3<sup>ης</sup> 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 [37].

Θέματα που αφορούν στην ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας, (Quality of service, 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 πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης ( multiple access control, MAC ) 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 (Time Division Multiple Access, 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) [38].

Η βιβλιογραφία για TDMA-TDD πρωτόκολλα είναι μεγάλη. Ένα από τα πιο γνωστά της κατηγορίας είναι το DTDMA/TDD που σχεδιάστηκε ειδικά για ATM δίκτυα (WATMnet). Είναι ένα πρωτότυπο δίκτυο μικροκυψελών και έχει τη δυνατότητα να παρέχει ολοκληρωμένη επικοινωνία πολυμέσων σε απομακρυσμένα τερματικά [39]. Στο [39] οι χρήστες στέλνουν αιτήσεις για μετάδοση στο Σταθμό Βάσης (BS) σε συγκεκριμένες θυρίδες κράτησης (reservation slots) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Aloha με σχισμές (slotted Aloha). Η επεξεργασία των αιτήσεων γίνεται με βάση των QoS παραμέτρων της κίνησης του κάθε χρήστη. Έπειτα ο σταθμός βάσης ενημερώνει τους χρήστες μεταδίδοντας τις επιβεβαιώσεις για τις επιτυχημένες κρατήσεις και τις χρονοθυρίδες όπου θα μεταδώσει ο χρήστης. Για κίνηση σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Constant Bit Rate, CBR) ο προσδιορισμός των χρονοθυρίδων γίνεται μια φορά κατά την εγκαθίδρυση της κλήσης. Στον χρηστή παραχωρείται ένας σταθερός αριθμός χρονοθυρίδων με βάση τις απαιτήσεις του. Όταν οι CBR χρονοθυρίδες δεν είναι πλέον διαθέσιμες οι επόμενες CBR κλήσεις εμποδίζονται. Οι χρονοθυρίδες μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης των Bit (VBR) ανατίθενται με βάση στατιστικούς αλγόριθμους πολυπλεξίας. Οι χρονοθυρίδες που δεν χρησιμοποιούνται διαμοιράζονται και σε άλλα είδη κίνησης. Οι νέες VBR κλήσεις εμποδίζονται και αυτές όταν οι VBR χρονοθυρίδες δεν είναι πλέον διαθέσιμες. Για Available Bit Rate/Unspecified Bit Rate (ABR/UBR) κίνηση ο προσδιορισμός των χρονοθυρίδων εκτελείται δεσμεύοντας δυναμικά ABR/UBR και μη χρησιμοποιούμενες CBR και VBR χρονοθυρίδες. Από τη στιγμή που οι χρονοθυρίδες διαμοιράζονται στις τρεις κατηγορίες CBR, VBR, και ABR/UBR στο κανάλι δεν κυριαρχεί ο πιο απαιτητικός χρήστης (δικαιοσύνη μεταξύ χρηστών). Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η μείωση του εύρους ζώνης που προκαλείται λόγω των συγκρούσεων, οι χρονοθυρίδες που

χρησιμοποιούνται για τις αιτήσεις μετάδοσης διαιρούνται σε μίνι χρονοθυρίδες (mini slots).

Τα βασικά μειονεκτήματα αυτού του πρωτοκόλλου είναι:

1. Η χρήση του πρωτοκόλλου πρόσβασης slotted Aloha, που οδηγεί σε ασταθή συμπεριφορά του συστήματος (εκτός αν η χρήση του καναλιού είναι χαμηλή) και παρέχει χαμηλή ρυθμαπόδοση.
2. Το γεγονός ότι το σχέδιο είναι βασισμένο στην λογική του περιορισμού του πιο απαιτητικού χρήστη στην προσπάθεια του να κυριαρχήσει στο κανάλι. Αυτή, όπως εξηγήθηκε, είναι λογική επιλογή από την άποψη της δικαιοσύνης σε χρήστες χαμηλής προτεραιότητας. Όταν όμως βρίσκονται στο σύστημα πολύ απαιτητικές και εκρηκτικές πηγές (π.χ. υψηλής ποιότητας video) η χρήση της TDMA/TDD λογικής δεν επιτρέπει στο σύστημα να παρέχει το κατάλληλο QoS σε αυτές τις πηγές.

Ένα άλλο γνωστό πρωτόκολλο τύπου TDMA-TDD είναι το MASCARA [40, 42], το οποίο έγκειται στην λογική αίτησης-ανάθεσης από κρατήσεις βασιζόμενες στον ανταγωνισμό. Η άνω ζεύξη (uplink) διαιρείται σε μια περίοδο ανταγωνισμού (στην οποία ένας αλγόριθμος βασισμένος σε slotted Aloha και ένας αλγόριθμος στοίβας εκτιμούνται) για μετάδοση αιτήσεων κράτησης ή πληροφοριών ελέγχου και σε μια περίοδο μετάδοσης για την uplink κίνηση δεδομένων. Κάθε περίοδος έχει μεταβλητό μήκος ανάλογα με τη στιγμιαία κίνηση που μεταφέρεται στην ασύρματη ζεύξη. Παρόλο που το MASCARA πρωτόκολλο παρέχει μεταβλητό εύρος ζώνης (bandwidth) στα τερματικά, εντούτοις το μεταβλητού-μήκους πλαίσιο που χρησιμοποιείται στο πρωτόκολλο δημιουργεί δυσκολίες στην ανάθεση της χωρητικότητας στα πακέτα CBR και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για να διαχειριστεί τις απαιτήσεις QoS για την κίνηση των χρηστών είναι αρκετά σύνθετος [38].

Ένας εξίσου μεγάλος αριθμός TDMA-FDD MAC πρωτοκόλλων έχει προταθεί στη βιβλιογραφία (π.χ., [43-46]). Ένα γνωστό πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας είναι το CPRMA [46]. Η σχεδιάσή 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 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 [38]. Για αυτόν τον λόγο, σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήσαμε την τεχνική TDMA-FDD στα πρωτόκολλα που εξετάσαμε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση, σύγκριση και αξιολόγηση τεσσάρων πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Control, MAC) για ασύρματα TDMA δίκτυα. Τα αποτελέσματα της εργασίας μας οδήγησαν στην πρόταση ενός ευέλικτου μηχανισμού επιλογής MAC πρωτοκόλλου ανάλογα με τον φόρτο του ασύρματου δικτύου.

Τα πρωτόκολλα μελετήθηκαν πάνω σε ασύρματο κανάλι υψηλής ταχύτητας, με στόχο την ολοκλήρωση κίνησης φωνής και δεδομένων, και κάθε ένα από τα τέσσερα πρωτόκολλα χρησιμοποιεί διαφορετικό αλγόριθμο επίλυσης συγκρούσεων. Οι αποδόσεις των πρωτοκόλλων συγκρίθηκαν βάσει συγκεκριμένων μετρικών απόδοσης, που ήταν η πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής, η μέση καθυστέρηση πακέτων φωνής, η μέση καθυστέρηση πρόσβασης στο σύστημα για τα τερματικά δεδομένων και η μέση καθυστέρηση μετάδοσης μηνύματος για τα τερματικά δεδομένων.

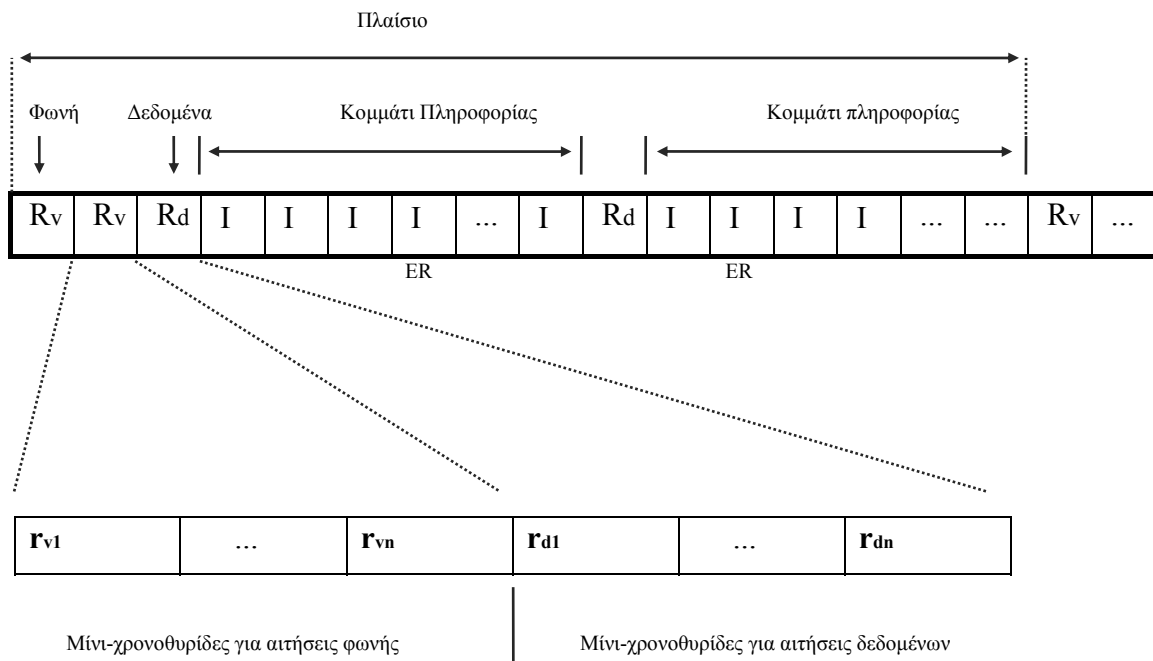
### 2.1 Το μοντέλο του συστήματος

Τα MAC πρωτόκολλα που μελετήθηκαν έχουν κοινά χαρακτηριστικά την δομή του πλαισίου του καναλιού (channel frame), τις ενέργειες των τερματικών φωνής και δεδομένων και τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού (scheduling) που εκτελεί ο σταθμός βάσης. Η διαφορά τους έγκειται στους αλγόριθμους επίλυσης των συγκρούσεων ανάμεσα στα τερματικά φωνής και ανάμεσα στα τερματικά δεδομένων.

#### 2.1.1. Δομή του Πλαισίου του Καναλιού

Ο χρόνος του καναλιού στην άνω ζεύξη (uplink, ζεύξη από τα τερματικά προς τον σταθμό βάσης) 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 φωνής (voice request interval), το δεύτερο μέρος είναι το κομμάτι αιτήσεων δεδομένων (data request interval) και το τρίτο μέρος είναι το κομμάτι μετάδοσης της πληροφορίας (information interval).



**Σχήμα 1. Παράδειγμα δομής πλαισίου, το οποίο παρουσιάζει τα κομμάτια αιτήσεων φωνής και δεδομένων καθώς και τα κομμάτια μετάδοσης της πληροφορίας μέσα σε ένα πλαίσιο.**

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

Σε όλα τα κομμάτια αιτήσεων, τόσο στα κομμάτια φωνής όσο και στα κομμάτια δεδομένων, οι χρονοθυρίδες χωρίζονται σε μικρότερα τμήματα, τις μίνι-χρονοθυρίδες (mini-slots) και κάθε μίνι-χρονοθυρίδα «φιλοξενεί» ένα ακριβώς μίνι-πακέτο σταθερού μεγέθους. Το μίνι-πακέτο είναι το πακέτο αίτησης που στέλνουν τα τερματικά φωνής και τα τερματικά δεδομένων 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 δεδομένων, η αίτηση πρέπει να περιλαμβάνει ακόμα το μέγεθος του μηνύματός τους σε πακέτα και πιθανόν κάποιες άλλες παραμέτρους όπως την προτεραιότητα του συγκεκριμένου

είδους δεδομένων ή τον ελάχιστο αριθμό χρονοθυρίδων ανά πλαίσιο που απαιτεί ο συγκεκριμένος χρήστης δεδομένων. Κατανέμουμε τα κομμάτια αιτήσεων δεδομένων ομοιόμορφα μέσα στο πλαίσιο. Κατ' αυτό τον τρόπο, επιτρέπουμε στα τερματικά δεδομένων που αποκτούν μηνύματα δεδομένων προς μετάδοση οποτεδήποτε μέσα στο πλαίσιο (η κατανομή του χρόνου μεταξύ αφίξεων διαδοχικών μηνυμάτων είναι εκθετική) να αποκτήσουν πρόσβαση στο κανάλι σε πολύ σύντομο χρόνο μετά την γέννηση του μηνυματός τους.

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 μια πιο αποδοτική χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για τις αιτήσεις. Υιοθετούμε την ιδέα που προτάθηκε στο [36] ότι *ορισμένες χρονοθυρίδες αιτήσεων μπορούν να μοιράζονται ανάμεσα σε τερματικά φωνής και τερματικά δεδομένων* (με απόλυτη προτεραιότητα στα τερματικά φωνής και, μετά την επίλυση των συγκρούσεών τους θα ξεκινούν οι μεταδόσεις των τερματικών δεδομένων). 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 φωνής γίνεται εκμεταλλεύσιμο για τα δεδομένα.

Η προσέγγιση της κράτησης ενός μικρού ποσοστού του εύρους ζώνης για να γίνονται κρατήσεις τόσο από τα τερματικά φωνής όσο και από τα τερματικά δεδομένων 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., [35]) -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. Ένα ποσοστό 2-3% του συνολικού εύρους ζώνης του καναλιού συνήθως αρκεί για να διατεθεί ως εύρος ζώνης αιτήσεων [32].

Τα τερματικά φωνής και δεδομένων 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) τόσο για τα τερματικά φωνής όσο και για τα τερματικά δεδομένων, με προτεραιότητα των τερματικών 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 [33, 34].

### ***2.1.2. Ενέργειες των Τερματικών Φωνής και Δεδομένων, και Χρονοπρογραμματισμός στον Σταθμό Βάσης.***

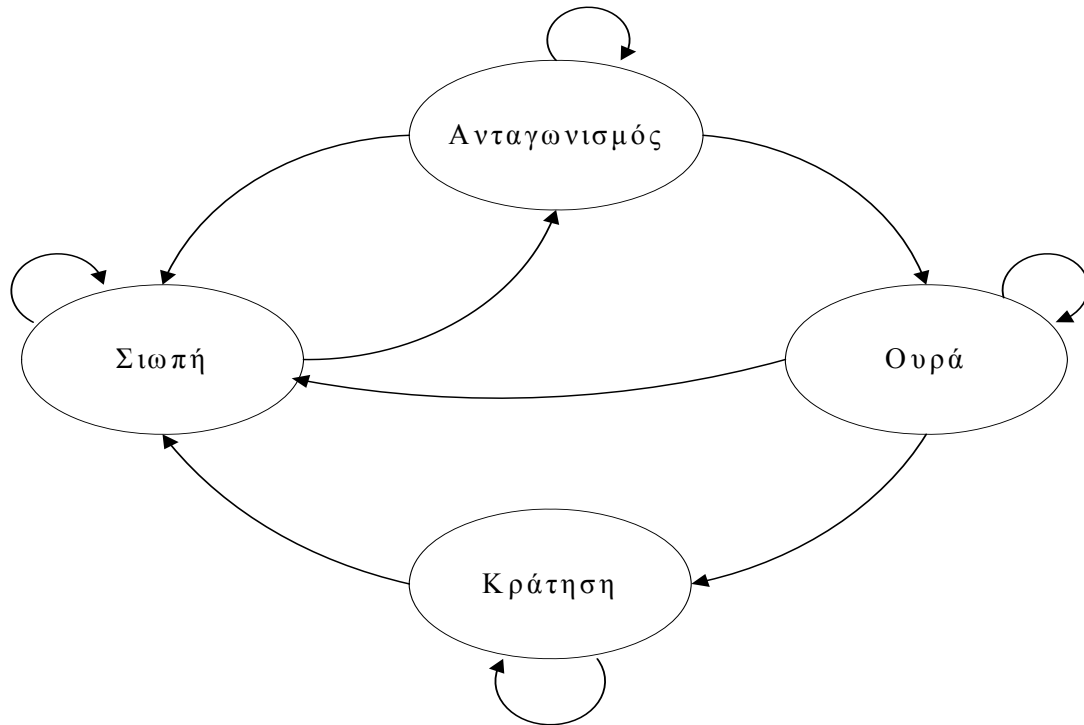
Τα τερματικά φωνής και δεδομένων που έχουν πακέτα προς μετάδοση αλλά δεν έχουν κάνει κράτηση, ανταγωνίζονται για του πόρους του καναλιού χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης (random access protocol) ώστε να μεταδώσουν τα πακέτα αιτήσεών τους κατά την διάρκεια των κομματιών αιτήσεων φωνής και δεδομένων, αντίστοιχα. 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 χρονοθυρίδα πληροφορίας θα του διατεθεί. Ένα τερματικό το οποίο δεν κατόρθωσε να μεταδώσει επιτυχημένα το πακέτο αίτησής του μέσα στα κομμάτια αιτήσεων του τρέχοντος

πλαίσιου, 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. 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, όσον αφορά στα πακέτα φωνής, όταν αυτά δεν μεταδοθούν πριν ξεπεράσει η καθυστέρησή τους το μέγιστο αποδεκτό όριο καθυστέρησης φωνής, απορρίπτονται (voice packet dropping), γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα ότι ένα τερματικό φωνής μπορεί να σταματήσει να μεταδίδει αιτήσεις χωρίς ποτέ να επιτύχει να μεταδώσει πακέτα, αφού όλα τα πακέτα του θα έχουν ξεπεράσει το μέγιστο όριο καθυστέρησης και το τερματικό θα έχει επανέλθει σε σιωπή.

Για να εκχωρήσει τους πόρους του καναλιού, ο σταθμός βάσης διατηρεί έναν δυναμικό πίνακα από τα ενεργά τερματικά που βρίσκονται μέσα στην μικροκυψέλη. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται μέσα στον πίνακα μπορεί να περιλαμβάνουν την ταυτότητα του τερματικού, την ταυτότητα του ιδεατού κυκλώματος που χρησιμοποιείται, 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. Τα τερματικά φωνής και δεδομένων 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 συνομιλία τελειώσει ή ένα μήνυμα δεδομένων αποσταλεί, ή κατ' αντιστοιχία, όταν ένα ενεργό τερματικό εξέλθει από την μικροκυψέλη (handover), 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.

Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης πάντοτε εκχωρεί την πρώτη ελεύθερη χρονοθυρίδα μέσα στο πλαίσιο, και ότι η κίνηση φωνής έχει υψηλότερη προτεραιότητα από την

κίνηση δεδομένων. Έτσι, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί κάθε αίτηση φωνής που εκκρεμεί πριν αρχίσει την εξυπηρέτηση των αιτήσεων δεδομένων -κατ' αυτό τον τρόπο έχουμε την δημιουργία δύο κλάσεων εξυπηρέτησης. Μέσα σε κάθε κλάση, η εξυπηρέτηση γίνεται με την μέθοδο FCFS (First Come First Served).



**Σχήμα 2. Διάγραμμα μεταβολής καταστάσεων για ένα ενεργό τερματικό φωνής.**

Μια άλλη λειτουργία που επιτελεί ο σταθμός βάσης είναι να εφαρμόζει preemption: αν σε κάποιο πλαίσιο πρέπει να μεταδώσουν τερματικά φωνής αλλά δεν υπάρχουν ελεύθερες χρονοθυρίδες τότε ο σταθμός βάσης ελευθερώνει χρονοθυρίδες από τερματικά δεδομένων και τις εκχωρεί στα τερματικά φωνής, τοποθετώντας τα τερματικά δεδομένων που έχουν τις δεσμευμένες χρονοθυρίδες τους σε μια ξεχωριστή ουρά. Η ουρά αυτή θα εξυπηρετηθεί με προτεραιότητα έναντι της ουράς των υπόλοιπων τερματικών δεδομένων όταν ελευθερωθούν ξανά οι πόροι (χρονοθυρίδες) του καναλιού. Χωρίς preemption τα τερματικά φωνής θα έπρεπε να περιμένουν να μεταδώσουν σε επόμενο πλαίσιο, αφού κάποιο τερματικό δεδομένων θα μετέδιδε το μήνυμά του και θα απελευθέρωνε μια χρονοθυρίδα.. Έτσι, ο χρόνος παραμονής ενός μηνύματος στον σταθμό βάσης θα ήταν μεγάλος και αν ξεπερνούσε τον μέγιστο χρόνο καθυστέρησης θα έπρεπε να απορριφθεί, με συνέπεια να αυξάνει και η συνολική πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής. Αυτό δεν είναι επιθυμητό γιατί

οι χρήστες φωνής έχουν ανάγκη να μεταδώσουν γρήγορα σε σχέση με τους χρήστες δεδομένων που έχουν περισσότερο ελαστικούς χρόνους παραμονής. Κατά συνέπεια, αν τα τερματικά φωνής που πρέπει να μεταδώσουν είναι περισσότερα από τις ελεύθερες χρονοθυρίδες, ελευθερώνονται τόσες, έτσι ώστε όλα να μεταδώσουν στο παρόν πλαίσιο (αν, βέβαια, υπάρχει ικανός αντίστοιχος αριθμός χρονοθυρίδων δεσμευμένων από τερματικά δεδομένων).

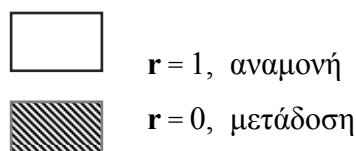
### 2.1.3 Πρωτόκολλα Μετάδοσης

#### 2.1.3.1 Τερματικά Δεδομένων

Για την επίλυση των συγκρούσεων των τερματικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τρεις αλγόριθμοι: ο *two-cell stack*, ο *three-cell stack* και ένας αλγόριθμος που ακολουθεί την λογική του PRMA (*PRMA-like αλγόριθμος*).

Χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο *two-cell stack* για την ελεγχόμενη πρόσβαση και την επίλυση των συγκρούσεων των τερματικών δεδομένων, ώστε να διευκολύνεται η επιτυχημένη μετάδοση των πακέτων αιτήσεων [47]. Είναι ένας αλγόριθμος τύπου παραθύρου, με εξυπηρέτηση παρόμοια με την FCFS.

Η λειτουργία του μηχανισμού για την επίλυση των συγκρούσεων που χρησιμοποιεί αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να οπτικοποιηθεί με την χρήση μιας στοίβας δύο κελιών (Σχήμα 3).



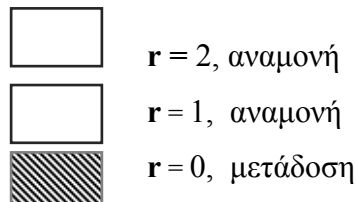
**Σχήμα 3. Οπτικοποίηση του αλγορίθμου two-cell stack.**

Αρχικά όλα τα τερματικά ανταγωνίζονται για μια δεδομένη μίνι-χρονοθυρίδα αίτησης. Αν δεν υπάρξει σύγκρουση, που σημαίνει ότι στο κανάλι προσπάθησε να μεταδώσει το πολύ ένα τερματικό, ο σταθμός βάσης επιστρέφει σήμα non-collision, και η μετάδοση (αν έγινε) ήταν επιτυχής. Αν τα τερματικά είναι περισσότερα και προσπαθήσουν να μεταδώσουν ο σταθμός βάσης επιστρέφει σήμα Collision. Τα τερματικά δεδομένων χωρίζονται με ίση πιθανότητα σε αυτά που θα επαναμεταδώσουν την αίτηση και καταλαμβάνουν το κάτω κελί, και σε αυτά που θα



περιμένουν στην επόμενη μίνι χρονοθυρίδα χωρίς να μεταδώσουν καταλαμβάνοντας το πάνω κελί. Αν το σύνολο των τερματικών στο κάτω κελί είναι μεγαλύτερο του ενός, ο σταθμός βάσης επιστρέφει σήμα collision και τα τερματικά αυτά χωρίζονται και πάλι με ίση πιθανότητα σε δύο υποσύνολα. Το ένα υποσύνολο παραμένει στο κάτω κελί για να προσπαθήσει να επαναμεταδώσει ενώ το άλλο μεταφέρεται στο επάνω κελί και ενσωματώνεται με τα τερματικά που ήδη περίμεναν. Τελικά, όταν στο κάτω κελί δεν υπάρχει πλέον τερματικό που μεταδίδει, όσα τερματικά βρίσκονταν στο επάνω κελί μεταφέρονται στο κάτω. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν εκ νέου να ανταγωνιστούν για να αποστείλουν αίτηση μετάδοσης. Το τέλος του ανταγωνισμού των τερματικών για τις μίνι-χρονοθυρίδες αιτήσεων ορίζεται μοναδικά από την εμφάνιση δύο συνεχόμενων non-collision [27, 48].

Κατά παρόμοιο τρόπο με τον *two-cell stack* λειτουργεί ο *three-cell stack* αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για επίλυση συγκρούσεων σε τερματικά δεδομένων. Είναι και αυτός ένας αλγόριθμος τύπου παραθύρου, με εξυπηρέτηση παρόμοια με την FCFS. Όπως και ο *two-cell stack* μπορεί να οπτικοποιηθεί με τη χρήση μια στοίβας τριών κελιών (σχήμα 4), με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί επιπλέον ένα κελί.



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

Έτσι, κατά την περίοδο ανταγωνισμού των αιτήσεων, τα τερματικά προσπαθούν να μεταδώσουν, οπότε μπορούν να βρεθούν σε δύο διαφορετικές καταστάσεις (collision ή non-collision). Αν σε μία μίνι-χρονοθυρίδα βρεθεί μόνο ένα τερματικό, λαμβάνει σήμα ανάδρασης non-collision και μεταδίδει. Αν όμως βρεθούν περισσότερα, τότε ο σταθμός βάσης επιστρέφει σήμα σύγκρουσης (collision). Ομοίως με τον *two cell-stack*, τα τερματικά που συγκρούστηκαν επιχειρώντας να μεταδώσουν στη μίνι χρονοθυρίδα χωρίζονται στα κελιά της στοίβας. Κάθε τερματικό έχει 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. Αν ο σταθμός βάσης επιστρέψει σήμα non-collision, σημαίνει ότι το κάτω κελί είναι άδειο και τα τερματικά των δύο άλλων κελιών μετακινούνται κατά μία θέση προς τα κάτω. Τα τερματικά που βρέθηκαν στο κάτω κελί προσπαθούν να επαναμεταδώσουν και ακολουθούν την ίδια διαδικασία. Τελικά αν εμφανιστούν τρία συνεχόμενα σήματα non-collision σε αντίστοιχες μίνι-χρονοθυρίδες σημαίνει ότι ολοκληρώθηκε ο ανταγωνισμός και όλα τα τερματικά μεταδόθηκαν.

Ο τρίτος αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας για επίλυση των συγκρούσεων κατά την περίοδο ανταγωνισμού στις μίνι χρονοθυρίδες είναι, όπως ήδη αναφέρθηκε, ένας αλγόριθμος που ακολουθεί την λογική του PRMA, μονάχα όμως στο κομμάτι αιτήσεων του frame, και μονάχα για την επίλυση συγκρούσεων των τερματικών δεδομένων.. Τα τερματικά δεδομένων μεταδίδουν, στο κομμάτι αιτήσεων που τους αναλογεί, με συγκεκριμένη πιθανότητα τα πακέτα αιτήσεων τους. Η βέλτιστη πιθανότητα για τη μείωση των συγκρούσεων και την ικανοποίηση των απαιτήσεων των τερματικών σε ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας, μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο του καναλιού (τόσο για να επιλυθεί αυτό καθ' εαυτό το πρόβλημα της ανεύρεσης της βέλτιστης πιθανότητας για κάθε φορτίο, όσο και για να επιλυθεί το γνωστό πρόβλημα της αστάθειας του PRMA όταν χρησιμοποιείται σταθερή πιθανότητα). Σε περίπτωση που η πιθανότητα επιτρέπει στο τερματικό δεδομένων να μεταδώσει σε κάποια μίνι χρονοθυρίδα αίτησης δεδομένων, το τερματικό ανταγωνίζεται με τα υπόλοιπα τερματικά που επίσης μετέδωσαν αίτηση στη συγκεκριμένη μίνι χρονοθυρίδα. Αν στη μίνι χρονοθυρίδα επιχειρήσουν να μεταδώσουν περισσότερα του ενός τερματικά δεδομένων τότε συγκρούονται και ξαναπροσπαθούν, βάσει της πιθανότητας μετάδοσης, στις επόμενες μίνι χρονοθυρίδες. Η προσπάθεια ενός τερματικού συνεχίζεται μέχρι να επιτύχει τη μετάδοση της αίτησής του.

### 2.1.3.2 Τερματικά Φωνής

Χρησιμοποιούμε και πάλι τους αλγόριθμους *two-cell stack* και *three-cell stack*, εξαιτίας της απλότητας που εμφανίζουν στην λειτουργία τους, της σταθερότητάς τους και της σχετικά υψηλής απόδοσής τους σε σύγκριση με τον αλγόριθμο PRMA

(Aloha) ([28]) και με αλγόριθμους που μοιάζουν με τον PRMA, όπως αυτοί που παρουσιάζονται στα [35, 50].

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος τύπου PRMA για τα τερματικά δεδομένων είναι η ανομοιομορφία των εξεταζόμενων τύπων κίνησης, τόσο όσον αφορά στα χαρακτηριστικά τους όσο και στις απαιτήσεις τους σε ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας. Για τους λόγους αυτούς, άλλωστε, εξετάστηκε στην εργασία μας η προσαρμογή της πιθανότητας μετάδοσης στο φορτίο που προκύπτει αθροιστικά από τα τρία είδη κίνησης δεδομένων. Στην περίπτωση κίνησης φωνής δεν ισχύουν τα παραπάνω, κατά συνέπεια δεν μελετήθηκε η χρήση ενός αλγόριθμου τύπου PRMA. Επίσης, μια βασική ιδέα του συστήματός μας είναι η κοινή χρήση του κομματιού των αιτήσεων από τα τερματικά φωνής και δεδομένων με απόλυτη προτεραιότητα όμως στα τερματικά φωνής. Η απόλυτη προτεραιότητα αυτή διασφαλίζεται μονάχα με τη χρήση των *two-cell stack* και *three-cell stack* αλγορίθμων για την επίλυση του ανταγωνισμού των πακέτων φωνής, ενώ δεν θα ήταν δυνατή με την χρήση PRMA-τύπου αλγορίθμου για τη φωνή (δεν θα γνωρίζαμε πότε επιλύθηκε οριστικά η σύγκρουση των πακέτων φωνής).

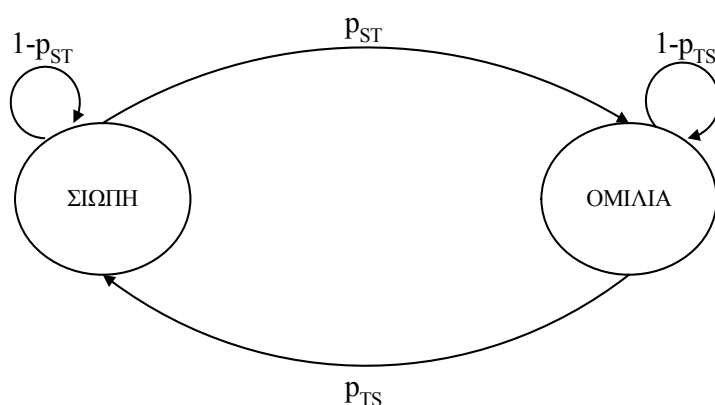
Ο *two-cell stack* αλγόριθμος για την επίλυση συγκρούσεων τερματικών φωνής διαφέρει από τον *two-cell stack* που χρησιμοποιείται για τα τερματικά δεδομένων στο 2.1.3.1, στο ότι ένα σύνολο από τερματικά φωνής που ανταγωνίζονται χωρίζεται πιθανοτικά σε δύο ισοπίθανα υποσύνολα (μετάδοση-αναμονή) στην αρχή 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) [49]. Το τέλος του ανταγωνισμού των τερματικών φωνής ορίζεται και πάλι μοναδικά από την εμφάνιση δύο συνεχόμενων μη-συγκρούσεων.

Αντίστοιχα υλοποιείται και ο *three-cell stack*. Τα τερματικά φωνής χωρίζονται σε τρία υποσύνολα με ίση πιθανότητα στην αρχή του κάθε πλαισίου, οπότε δεν χρειάζεται να χαθεί η πρώτη μίνι-χρονοθυρίδα λόγω σύγκρουσης μέχρι να ξεκινήσει ο μηχανισμός επίλυσης των συγκρούσεων, εξασφαλίζοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα..

### 2.1.4 Μοντέλο για την Κίνηση Φωνής

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, 51]. 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 5.



Σχήμα 5. Το Μαρκοβιανό μοντέλο για την δραστηριότητα των πηγών φωνής.

2. 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 12 ms, ενώ η μέση διάρκεια των περιόδων ομιλίας και σιωπής υπερβαίνει το 1 sec.

3. Θεωρούμε ότι στο κανάλι δεν έχουμε σφάλματα και ότι απουσιάζει το φαινόμενο της σύλληψης σήματος (capture).

4. 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.

### 2.1.5 Μοντέλο για την Κίνηση Δεδομένων

Χρησιμοποιούμε τρία είδη κίνησης δεδομένων: email, sms, wap. Το μοντέλο για την κίνηση Email βασίζεται στην χρήση email από Πανεπιστήμια της Φινλανδίας. Τα δεδομένα συνέλεξε το FUNET (Finish University and Research Network) [52].

Θεωρούμε πως τα δεδομένα γεννιούνται από έναν μεγάλο, άγνωστο αριθμό τερματικών δεδομένων (θεωρητικά άπειρο).

- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f(x)$  για το μήκος των μηνυμάτων email βρέθηκε στο [52] ότι μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή *Cauchy* (0.8,1), από την οποία προκύπτει ότι το μέσο μήνυμα email περιλαμβάνει κατά μέσο όρο περίπου 78 πακέτα. Τα μηνύματα SMS έχουν μέγεθος 140 bytes (το οποίο περιλαμβάνει επικεφαλίδα 13 bytes), άρα αντιστοιχούν σε 3 πακέτα μεγέθους ATM [53]. Στο [58], οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα μοντέλο κίνησης war, η οποία εξαρτάται από το προφίλ του χρήστη (user profile), και πιο συγκεκριμένα από το αν ο χρήστης ζητάει μέσω της war εφαρμογής να κάνει εμπορικές συναλλαγές (π.χ. κρατήσεις εισιτηρίων), να λάβει πληροφορίες για νέες ειδήσεις, να λάβει emails ή να λάβει άλλου είδους πληροφορίες. Στο μοντέλο κίνησης war στο [58], το μέγεθος μηνύματος war αίτησης (δηλαδή της πληροφορίας για το τι ζητάει ο χρήστης) κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 82 και 112 bytes, ανάλογα με την εφαρμογή, δηλαδή κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3 πακέτων ATM όταν χρησιμοποιείται μέγεθος πακέτου που περιέχει 48 bytes πληροφορίας, όπως στην παρούσα εργασία. Επίσης, η τυπική απόκλιση του μεγέθους μηνύματος της war αίτησης κυμαίνεται μεταξύ 16.5 bytes και 84.7 bytes, δηλαδή μεταξύ 1 και 2 πακέτων μεγέθους ATM. Το μέγεθος των μηνυμάτων war επιλέξαμε να περιγράφεται στην εργασία μας από μια συνάρτηση lognormal, όπως και στο [58], και στην προσπάθειά μας να περιγράψουμε τα στοιχεία για τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση, χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση lognormal με παραμέτρους (0.9975,0.201), που δίνουν μέσο μέγεθος war μηνύματος ίσο με 3 πακέτα και τυπική απόκλιση ίση με 1.41 πακέτα. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι το μέσο μέγεθος μηνύματος email είναι ίσο με περίπου 33 kbits, το μέσο μέγεθος μηνύματος sms είναι ίσο με περίπου 1.25 kbits και το μέσο μέγεθος μηνύματος war είναι ίσο με περίπου 1 kbit.
- Ο χρόνος ανάμεσα στις αφίξεις πακέτων στο μοντέλο του FUNET, όπως και στα άλλα δύο είδη δεδομένων είναι εκθετικά κατανομημένος.

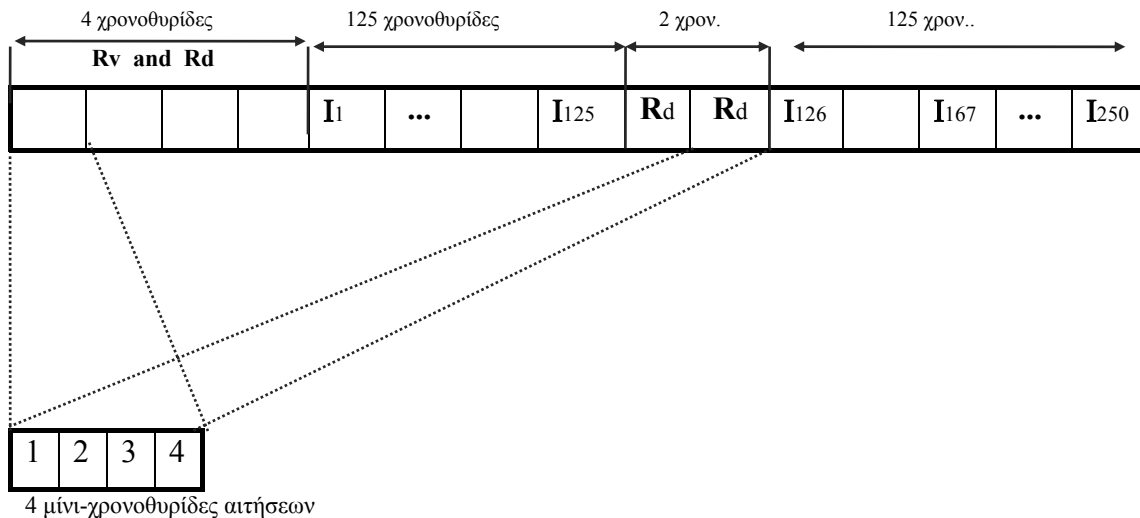
## 2.2 Παράμετροι του Συστήματος

Η μελέτη της απόδοσης των MAC πρωτοκόλλων έγινε με την βοήθεια προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με την χρήση των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1. Κάθε αποτέλεσμα προσομοίωσης που παρουσιάζεται είναι αποτέλεσμα ενός μέσου όρου από 10 ανεξάρτητα runs, κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει 305000 πλαίσια (τα πρώτα 5000 χρησιμοποιούνται ως περίοδος για «ζέσταμα» του συστήματος, ώστε όταν αρχίζει η προσομοίωση για τα υπόλοιπα frames να μην είναι αρχικά όλα τα τερματικά ανενεργά).

| Παράμετροι Σχεδιασμού                     |        |
|---|--------|
| Ταχύτητα Καναλιού (Mbps)                  | 9.045  |
| Ρυθμός Κωδικοποίησης Φωνής (Kbps)         | 32     |
| Διάρκεια πλαισίου (ms)                    | 12     |
| Χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο                  | 256    |
| Διάρκεια χρονοθυρίδας (μs)                | 46.875 |
| Χρονοθυρίδες αίτησης ανά πλαίσιο          | 6      |
| Μίνι-χρονοθυρίδες ανά χρονοθυρίδα αίτησης | 4      |
| Μέγεθος πακέτου (bytes)                   | 53     |
| Μέση διάρκεια ομιλίας (sec)               | 1.41   |
| Μέση διάρκεια σιωπής (sec)                | 1.78   |

**Πίνακας 1. Πειραματικές παράμετροι του συστήματος**

Ένα πλαίσιο περιλαμβάνει 256 χρονοθυρίδες στα 12 ms της διάρκειάς του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, έξι χρονοθυρίδες χρησιμοποιούνται ως χρονοθυρίδες αιτήσεων. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό μόλις 2.34% του συνολικού εύρους ζώνης (το ποσοστό του καναλιού που «χάνεται» χωρίς να μπορεί να μεταδοθεί πληροφορία είναι συνεπώς μικρό, ενώ τα κέρδη από την κατάτμηση των χρονοθυρίδων σε μίνι-χρονοθυρίδες και την πολιτική κρατήσεων είναι σημαντικά).



**Σχήμα 7. Δομή πλαισίου για το κανάλι των 9.045 Mbps.**

Οι πρώτες τέσσερις χρονοθυρίδες του πλαισίου αποτελούν το πρώτο κομμάτι αιτήσεων. Τα τερματικά φωνής έχουν απόλυτη προτεραιότητα πρόσβασης μέσα στις μίνι-χρονοθυρίδες αυτού του κομματιού αιτήσεων, και τα τερματικά δεδομένων αποκτούν πρόσβαση σε αυτές μόνο όταν τελειώσει ο ανταγωνισμός των πακέτων φωνής.

Όπως εξηγήθηκε στο 2.1.3.2 η χρήση των two-cell stack και three-cell stack αλγορίθμων για την επίλυση συγκρούσεων ανάμεσα στα τερματικά φωνής διασφαλίζει την γνώση του χρόνου επίλυσης του ανταγωνισμού. Οι άλλες δύο χρονοθυρίδες αιτήσεων, οι οποίες είναι αποκλειστικά αφιερωμένες στα κομμάτια αιτήσεων δεδομένων είναι οι χρονοθυρίδες 130 και 131 που βρίσκονται στη μέση του πλαισίου. Έτσι, οι χρονοθυρίδες αιτήσεων δεδομένων (δηλαδή αυτές οι δύο μαζί με τις μίνι-χρονοθυρίδες που μένουν αχρησιμοποίητες στην αρχή του πλαισίου από τα τερματικά φωνής) είναι ομοιόμορφα κατανομημένες μέσα στο πλαίσιο.

Θεωρήσαμε τις εξής απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας:

α. 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 είναι 1%.

β. Για τα πακέτα δεδομένων οι απαιτήσεις δεν είναι εξίσου αυστηρές, λόγω του είδους της κίνησης, με τη διαφορά όμως ότι τα πακέτα δεδομένων δεν πρέπει να χάνονται, οπότε επαναμεταδίδονται μέχρι να υπάρξει επιτυχής μετάδοση. Το μέγιστο επιτρεπτό όριο για τη μέση καθυστέρηση πακέτων email τέθηκε ίσο με 10 δευτερόλεπτα, για sms 5 δευτερόλεπτα, και για wap 1 δευτερόλεπτο. Οι επιλογές των ορίων αυτών έγιναν χρησιμοποιώντας τις παρακάτω αναφορές:

Για τα email μηνύματα, στο [57] ορίζεται ότι ένα email πρέπει να σταλεί εντός 60 δευτερολέπτων για να θεωρείται αποδεκτή η ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας στον χρήστη. Με δεδομένο ότι στην εργασία μας εξετάζουμε μονάχα το uplink κανάλι ενός ασύρματου TDMA δικτύου, ο χρόνος των δέκα δευτερολέπτων για αποστολή ενός email μηνύματος θεωρήθηκε ικανός για την παροχή υπηρεσίας φιλικής προς τον χρήστη.

Όσον αφορά στα sms μηνύματα, οι εκτιμήσεις των καθυστερήσεων στην μετάδοση SMS μηνυμάτων σε GSM δίκτυα αναφέρουν καθυστερήσεις μεταξύ 2 και 30 δευτερολέπτων [56]. Με δεδομένο ότι στην εργασία μας εξετάζουμε το uplink κανάλι ενός ασύρματου TDMA δικτύου, ο χρόνος των πέντε δευτερολέπτων για αποστολή ενός SMS μηνύματος θεωρήθηκε ικανός για την παροχή υπηρεσίας φιλικής προς τον χρήστη.

Για τα wap μηνύματα, στο [54] ορίζεται ότι ο χρήστης μπορεί να θεωρείται ικανοποιημένος αν η πρώτη αίτησή του για download ικανοποιηθεί (ολοκληρωθεί δηλαδή το download) μέσα σε 10 δευτερόλεπτα και οι επόμενες αιτήσεις του σε χρόνο ανάμεσα σε 4 και σε 7 δευτερόλεπτα. Επίσης, στο [55] ορίζεται ότι η επίτευξη ενός χρόνου κάτω των 6 δευτερολέπτων για wap download οδηγεί σε υπηρεσία φιλική προς τον χρήστη (user-friendly). Με δεδομένο ότι στην εργασία μας εξετάζουμε το uplink κανάλι ενός ασύρματου TDMA δικτύου, ο χρόνος του ενός δευτερολέπτου για αποστολή της wap αίτησης θεωρήθηκε ικανός για την παροχή υπηρεσίας φιλικής προς τον χρήστη.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την σχεδίαση του συστήματος επιλέξαμε τον αριθμό των μίνι-χρονοθυρίδων ανά κομμάτι αιτήσεων να είναι ίσος με 4, λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τον χρόνο που απαιτείται για συγχρονισμό και για καθυστέρηση διάδοσης μέσα στην μικροκυψέλη, καθώς και ότι όλα τα κομμάτια αιτήσεων φωνής βρίσκονται στην αρχή του πλαισίου, λόγω της υπόθεσης 2 του μοντέλου φωνής που χρησιμοποιούμε.



## 2.3 Αποτελέσματα

### 2.3.1 Υλοποίηση πρωτοκόλλων

Στην εργασία αυτή υλοποιήθηκαν τέσσερα MAC πρωτόκολλα με ίδια δομή αλλά διαφορετικούς αλγόριθμους επίλυσης συγκρούσεων των πακέτων κατά τη διάρκεια του ανταγωνισμού. Το πρώτο υλοποιήθηκε με τον αλγόριθμο two-cell stack στην επίλυση του ανταγωνισμού για την κίνηση της φωνής και των δεδομένων, το δεύτερο με τον two-cell stack στην επίλυση κίνησης φωνής και με three-cell stack στη επίλυση της κίνησης δεδομένων, το τρίτο με three-cell stack στην επίλυση του ανταγωνισμού για την κίνηση της φωνής και των δεδομένων, και το τέταρτο με two-cell stack στην επίλυση του ανταγωνισμού της φωνής και αλγόριθμο τύπου PRMA στη επίλυση του ανταγωνισμού για την κίνηση δεδομένων.

Τα τέσσερα πρωτόκολλα συγκρίθηκαν μεταξύ τους ως προς τη μέγιστη χωρητικότητα των τερματικών φωνής που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα, για διάφορους ρυθμούς άφιξης μηνυμάτων δεδομένων. Η μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής υπολογίστηκε με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας των τερματικών φωνής και δεδομένων.

Διενεργήθηκαν δύο ειδών προσομοιώσεις για όλα τα πρωτόκολλα. Στην πρώτη περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης ήταν ίδιος για κάθε είδος δεδομένων, π.χ. ο ρυθμός άφιξης email θα ισούται με 0,1 μήνυμα ανά πλαίσιο - ο ρυθμός άφιξης sms θα ισούται με 0,1 μήνυμα ανά πλαίσιο - ο ρυθμός άφιξης wap θα ισούται με 0,1 μήνυμα ανά πλαίσιο. Στη δεύτερη περίπτωση ο ρυθμός μετάδοσης για κάθε είδος δεδομένων είναι διαφορετικός, όμως το συνολικό φορτίο κίνησης μηνυμάτων ανά πλαίσιο είναι ίδιο.. Με τον όρο φορτίο κίνησης δεδομένων εννοείται ο μέσος αριθμός πακέτων δεδομένων που πρέπει να μεταδοθούν σε ένα πλαίσιο, π.χ. φορτίο κίνησης 50%, αντιστοιχεί σε 128 πακέτα κατά μέσο όρο ( $0.5 * 256$  χρονοθυρίδες).

Στο τελευταίο πρωτόκολλο, με χρήση PRMA-like αλγόριθμου για την επίλυση του ανταγωνισμού τερματικών δεδομένων, τόσο η εύρεση του μέγιστου αριθμού χωρητικότητας των χρηστών φωνής όσο και η ευστάθεια (stability) του πρωτοκόλλου εξαρτώνται από τη πιθανότητα μετάδοσης για κάθε είδος κίνησης. Στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε, για μείωση της πολυπλοκότητας θεωρήσαμε πως κάθε είδος δεδομένων χρησιμοποιεί την ίδια πιθανότητα μετάδοσης, η οποία εξαρτάται από το ρυθμό άφιξης των δεδομένων.

Ένα τερματικό φωνής βρίσκεται σε ομιλία (talkspurt) κατά μέσο όρο  $1.41/(1.41+1.78) = 0.442$ , δηλαδή 44,2% του χρόνου που είναι ενεργό, βάσει των παραμέτρων του πίνακα 1. Συνεπώς, οι 250 χρονοθυρίδες πληροφορίας ενός frame μπορούν θεωρητικά να «φιλοξενήσουν» μέγιστη χωρητικότητα χρηστών ίση με  $250/0.442=565$  χρήστες φωνής, ελλείψει κίνησης δεδομένων. Στο [36] αποδείχτηκε, μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων πως ακόμη και με τη χρήση του σταθερού πρωτοκόλλου two-cell stack για την επίλυση του ανταγωνισμού πακέτων φωνής, η θεωρητική χωρητικότητα απέχει ελαφρά από τη μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί λόγω των συγκρούσεων ανάμεσα στους ανταγωνιζόμενους χρήστες. Όπως θα δούμε στα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω, τα πρωτόκολλα που υλοποιήσαμε επιτυγχάνουν υψηλό βαθμό πολυπλεξίας παρά την ανομοιομορφία ανάμεσα στα είδη κίνησης δεδομένων. Έτσι, η χρήση του εύρους ζώνης του καναλιού (throughput) φθάνει σε υψηλά επίπεδα που πλησιάζουν τη μέγιστη θεωρητική τιμή (97%).

Όπως έχει εξηγηθεί νωρίτερα, όλα τα MAC πρωτόκολλα που μελετήθηκαν δίνουν προτεραιότητα στην κίνηση της φωνής. Αυτό συμβαίνει γιατί η κίνηση φωνής έχει αυστηρές απαιτήσεις τόσο στην καθυστέρηση των πακέτων (<24ms) όσο και στο ποσοστό απόρριψης των πακέτων ( $P_{drop} < 1\%$ ). Αντίθετα, η κίνηση δεδομένων είναι περισσότερο ελαστική στις απαιτήσεις της για τη μέγιστη μέση καθυστέρηση μηνύματος δεδομένων (οι απαιτήσεις για κάθε είδος κίνησης ορίστηκαν στην παράγραφο 2.2).

### 2.3.2 Συζήτηση πάνω στα αποτελέσματα

Στους επόμενους πίνακες παρατίθενται τα δεδομένα των προσομοιώσεων, τόσο για ίδιο ρυθμό άφιξης δεδομένων όσο και για ίδιο φορτίο κίνησης δεδομένων.

Ο πίνακας 2 αναφέρεται στη μέγιστη χωρητικότητα των χρηστών φωνής για κάθε πρωτόκολλο σε συνάρτηση με τον ρυθμό άφιξης των μηνυμάτων δεδομένων. Ο ρυθμός άφιξης των μηνυμάτων δεδομένων είναι σταθερός και ίδιος για κάθε είδος κίνησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, για μικρό ρυθμό άφιξης των μηνυμάτων, μεγαλύτερη χωρητικότητα χρηστών φωνής παρουσιάζει το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τον τύπου PRMA αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των συγκρούσεων στα μηνύματα δεδομένων, ενώ τη μικρότερη το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των συγκρούσεων στα μηνύματα δεδομένων και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των συγκρούσεων στα μηνύματα φωνής. Αντίθετα, το

πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο τύπου PRMA επιτυγχάνει πολύ χειρότερα αποτελέσματα από τα τρία άλλα πρωτόκολλα όταν ο ρυθμός άφιξης των μηνυμάτων είναι υψηλός, λόγω της αστάθειας του PRMA κάτω από υψηλό φορτίο. Οι λόγοι που η χρήση του αλγόριθμου τύπου PRMA οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα για μικρό ρυθμό άφιξης των μηνυμάτων δεδομένων είναι:

- α) η άσκοπη απώλεια χρονοθυρίδων, στην οποία οδηγείται το σύστημα με την χρήση των πρωτοκόλλων στοιβάς, καθώς ένας χρήστης μπορεί να οδηγηθεί πιθανοτικά σε κάποιο από τα πάνω κελιά της στοιβάς, ενώ, λόγω του χαμηλού φορτίου του καναλιού, πολύ συχνά δεν θα υπάρχει άλλος χρήστης στο/στα κάτω κελί/κελιά.
- β) η εύρεση της βέλτιστης πιθανότητας μετάδοσης για τα τερματικά δεδομένων στον PRMA, όπως αυτή προέκυψε από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν.

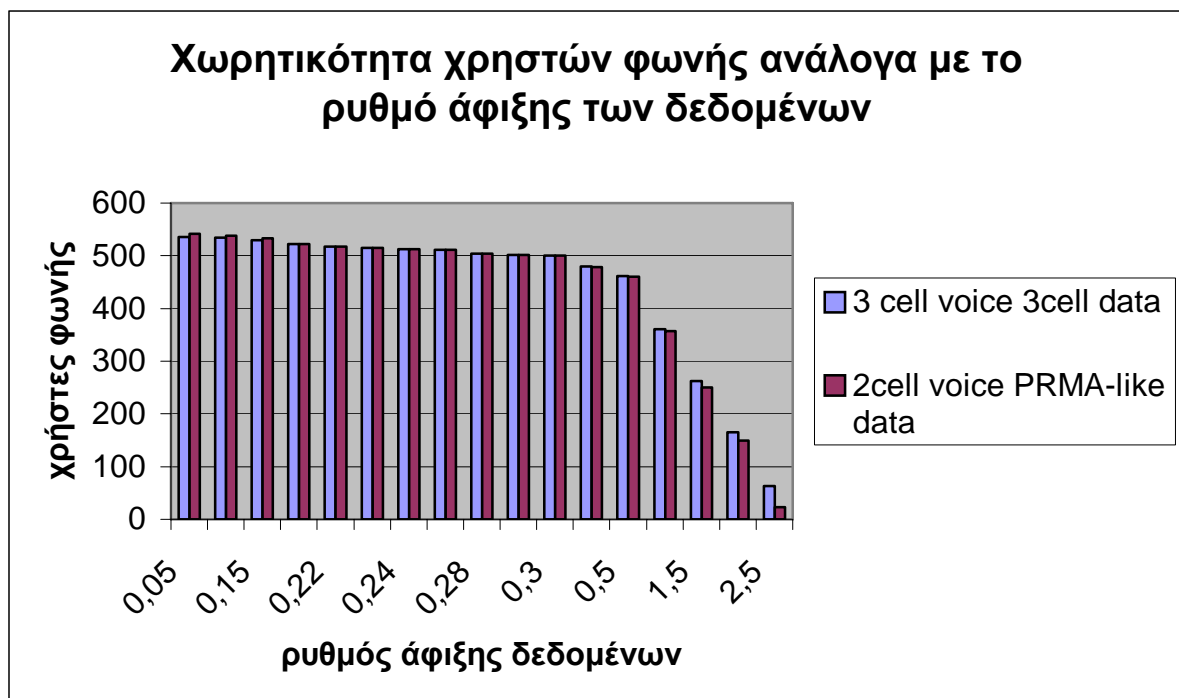
| $\lambda$ (messages/frame) | Voice Capacity<br>2cell voice- 2cell<br>data | Voice Capacity<br>2cell voice-3cell<br>data | Voice Capacity<br>3cell voice-<br>3cell data | Voice Capacity<br>2cell voice-<br>PRMA-like data |
|----------------------------|--|---|--|--|
| 0.05                       | 538  | 537   | 536  | 542  |
| 0.1                        | 536  | 535   | 534  | 538  |
| 0.15                       | 532  | 531   | 530  | 533  |
| 0.2                        | 522  | 522   | 522  | 522  |
| 0.22                       | 517  | 517   | 517  | 517  |
| 0.23                       | 515  | 515   | 515  | 515  |
| 0.24                       | 513  | 513   | 513  | 513  |
| 0.25                       | 511  | 511   | 511  | 511  |
| 0.28                       | 504  | 504   | 504  | 504  |
| 0.29                       | 502  | 502   | 502  | 502  |
| 0.3                        | 500  | 501   | 501  | 500  |
| 0.4                        | 479  | 480   | 480  | 479  |
| 0.5                        | 460  | 461   | 461  | 460  |
| 1                          | 359  | 361   | 361  | 357  |
| 1.5                        | 254  | 257   | 262  | 250  |
| 2                          | 163  | 164   | 165  | 150  |
| 2.5                        | 49   | 56  | 63   | 23   |

**Πίνακας 2. Μέγιστη χωρητικότητα χρηστών φωνής για κάθε πρωτόκολλο, ανάλογα με το ρυθμό άφιξης των μηνυμάτων δεδομένων. Κάθε είδος κίνησης έχει τον ίδιο ρυθμό άφιξης.**

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν αλγόριθμους στοιβάς εμφανίζουν παραπλήσια αποτελέσματα μεταξύ τους. Η χρήση του two-cell stack αλγόριθμου οδηγεί σε μεγαλύτερη χωρητικότητα τερματικών φωνής για μικρό ρυθμό αφίξεων δεδομένων, ενώ η χρήση του three-cell stack αλγόριθμου ευνοεί το μεγάλο ρυθμό αφίξεων

δεδομένων, οπότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερη χωρητικότητα τερματικών φωνής. Το αποτέλεσμα αυτό συμβαδίζει με την λογική βάσει της οποίας έχουν σχεδιαστεί οι αλγόριθμοι two-cell stack και three-cell stack, καθώς για χαμηλό φορτίο ο αλγόριθμος three-cell stack εμπεριέχει την πιθανότητα να επιλέγει ο ανταγωνιζόμενος χρήστης το τρίτο κελί (κελί 2 της στοίβας στο Σχήμα 4), ενώ θα μπορούσε να μεταδώσει άμεσα ή έπειτα από μία μονάχα χρονοθυρίδα. Αντίθετα, σε υψηλό φορτίο, η κατανομή των πολλών ανταγωνιζόμενων χρηστών σε τρία κελιά, στον three-cell stack, οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από την κατανομή τους σε δύο κελιά, στον two-cell stack.

Το Σχήμα 8 αποτελεί μια απεικόνιση του παραπάνω πίνακα με στόχο την σύγκριση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού μηνυμάτων δεδομένων με το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού μηνυμάτων φωνής και αλγόριθμο τύπου PRMA για την επίλυση του ανταγωνισμού μηνυμάτων δεδομένων.



Σχήμα 8. Σύγκριση δύο πρωτοκόλλων βάσει της μέγιστης χωρητικότητας χρηστών φωνής που μπορούν να επιτύχουν για διάφορους ρυθμούς άφιξης δεδομένων.

Όπως γίνεται φανερό από την παρατήρηση της παραπάνω γραφικής παράστασης, υπάρχει ένα διάστημα κατά το οποίο οι χωρητικότητες χρηστών φωνής και για τα δύο πρωτόκολλα είναι ίδιες. Σε αυτό το διάστημα ο ρυθμός άφιξης των μηνυμάτων

δεδομένων έχει τιμές από 0.2 μέχρι και 0.29. Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την διατύπωση της πρότασής μας, που θα γίνει στην παράγραφο 2.3.3. Οι πίνακες 3, 4, 5 και 6 παρουσιάζουν, για κάθε ένα από τα τέσσερα πρωτόκολλα, τις τιμές των μετρικών για τη φωνή και τα δεδομένα όταν το σύστημα εξυπηρετεί τον μέγιστο δυνατό αριθμό χρηστών φωνής. Στον πίνακα 6 η στήλη με τίτλο “probability” αναφέρεται στη βέλτιστη πιθανότητα μετάδοσης αιτήσεων που έχουν τα τερματικά δεδομένων και είναι ίδια για κάθε είδος κίνησης δεδομένων. Η πιθανότητα αυτή έχει υπολογιστεί μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων.

| $\lambda$ (messages/frame) | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay Sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop (%) | Throughput |
|----------------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|------------|
| 0.05                       | 538            | 1114.18         | 189.29        | 182.18        | 0.516     | 0.94       |
| 0.1                        | 536            | 1317.24         | 383.28        | 374.32        | 0.719     | 0.95       |
| 0.15                       | 532            | 1917.39         | 892.59        | 873.28        | 0.918     | 0.96       |
| 0.2                        | 522            | 1994.82         | 965.51        | 944.41        | 0.727     | 0.96       |
| 0.22                       | 517            | 1886.74         | 874.87        | 854.96        | 0.598     | 0.96       |
| 0.23                       | 515            | 1936.4          | 907.69        | 891.5         | 0.591     | 0.96       |
| 0.24                       | 513            | 2028.79         | 981.64        | 961.93        | 0.569     | 0.96       |
| 0.25                       | 511            | 1953.8          | 923.95        | 904.62        | 0.521     | 0.96       |
| 0.28                       | 504            | 1846.24         | 824.96        | 808.28        | 0.433     | 0.96       |
| 0.29                       | 502            | 2022.03         | 960.63        | 941.99        | 0.432     | 0.96       |
| 0.3                        | 500            | 2022.43         | 966.73        | 948.18        | 0.406     | 0.96       |
| 0.4                        | 479            | 1938.17         | 882.12        | 869.07        | 0.219     | 0.96       |
| 0.5                        | 460            | 2001.52         | 946.68        | 932.5         | 0.133     | 0.96       |
| 1                          | 359            | 1450.07         | 493.21        | 488.38        | 0.003     | 0.95       |
| 1.5                        | 254            | 1107.81         | 190.36        | 185.16        | 0         | 0.94       |
| 2                          | 163            | 1634.05         | 719.76        | 712.4         | 0         | 0.95       |
| 2.5                        | 49             | 1106.08         | 185.5         | 179.69        | 0         | 0.92       |

**Πίνακας 3. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων.**

| $\lambda$ (messages/frame) | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop (%) | Throughput |
|----------------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|------------|
|                            |                |                 |               |               |           |            |
| 0.05                       | 537            | 1129.63         | 176.11        | 169.14        | 0.489     | 0.94       |
| 0.1                        | 535            | 1270.44         | 342.23        | 331.21        | 0.665     | 0.95       |
| 0.15                       | 531            | 1777.67         | 779.07        | 758.68        | 0.85      | 0.96       |
| 0.2                        | 522            | 1898.2          | 885.37        | 867.04        | 0.7       | 0.96       |
| 0.22                       | 517            | 1970.07         | 937.13        | 913.88        | 0.607     | 0.96       |
| 0.23                       | 515            | 2004.28         | 968.25        | 947.02        | 0.59      | 0.96       |
| 0.24                       | 513            | 1939.48         | 914.24        | 895.55        | 0.55      | 0.96       |
| 0.25                       | 511            | 2063.25         | 1011.73       | 995.47        | 0.545     | 0.96       |
| 0.28                       | 504            | 2050.69         | 986           | 968.92        | 0.47      | 0.96       |
| 0.29                       | 502            | 1938.9          | 906.48        | 891.29        | 0.411     | 0.96       |
| 0.3                        | 501            | 2033.4          | 983.37        | 969.75        | 0.417     | 0.96       |
| 0.4                        | 480            | 1993.71         | 943.64        | 925.35        | 0.226     | 0.96       |
| 0.5                        | 461            | 2056.47         | 998.12        | 982.21        | 0.138     | 0.96       |
| 1                          | 361            | 1426.88         | 478.68        | 472.32        | 0.003     | 0.95       |
| 1.5                        | 257            | 1155.63         | 237.05        | 231.86        | 0         | 0.94       |
| 2                          | 164            | 1133.1          | 223.63        | 218.11        | 0         | 0.94       |
| 2.5                        | 56             | 1081.33         | 163.25        | 157.7         | 0         | 0.93       |

**Πίνακας 4. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων.**

| $\lambda$ (messages/frame) | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|----------------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
| 0.05                       | 536            | 1094.12         | 166.32        | 157.89        | 0.449 | 0.94       |
| 0.1                        | 534            | 1269.19         | 338.44        | 325.04        | 0.632 | 0.95       |
| 0.15                       | 530            | 1666.02         | 673.02        | 655.19        | 0.782 | 0.96       |
| 0.2                        | 522            | 2030.14         | 996.03        | 972.83        | 0.694 | 0.96       |
| 0.22                       | 517            | 1993.54         | 950.9         | 928.48        | 0.612 | 0.96       |
| 0.23                       | 515            | 2087.6          | 1027.62       | 996.07        | 0.593 | 0.96       |
| 0.24                       | 513            | 1932.86         | 908.59        | 896.74        | 0.538 | 0.96       |
| 0.25                       | 511            | 2093.48         | 1031.41       | 998.7         | 0.541 | 0.96       |
| 0.28                       | 504            | 1864.19         | 837.24        | 819.62        | 0.416 | 0.96       |
| 0.29                       | 502            | 1981.98         | 934.67        | 917.67        | 0.406 | 0.96       |
| 0.3                        | 501            | 2075.97         | 1020.18       | 999.46        | 0.404 | 0.96       |
| 0.4                        | 480            | 2006.69         | 952.21        | 935.71        | 0.22  | 0.96       |
| 0.5                        | 461            | 2068.13         | 1003.55       | 991.64        | 0.13  | 0.96       |
| 1                          | 361            | 1437.06         | 488.21        | 482.88        | 0.001 | 0.95       |
| 1.5                        | 262            | 1257.99         | 339.69        | 334.52        | 0     | 0.95       |
| 2                          | 165            | 1205.97         | 289.72        | 284.86        | 0     | 0.95       |
| 2.5                        | 63             | 1220.73         | 307.37        | 301.32        | 0     | 0.94       |

**Πίνακας 5. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων.**

| $\lambda$ (mes../frame) | Voice Capacity | Probability | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|-------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
| 0.05                    | 542            | 0.667       | 1220.99         | 264.87        | 255.64        | 0.691 | 0.95       |
| 0.1                     | 538            | 0.5         | 1432.21         | 486.06        | 471.61        | 0.845 | 0.95       |
| 0.15                    | 533            | 0.32        | 1975.65         | 958.74        | 936.41        | 0.932 | 0.96       |
| 0.2                     | 522            | 0.29667     | 1937.02         | 917.45        | 902.94        | 0.704 | 0.96       |
| 0.22                    | 517            | 0.27        | 1909.5          | 886.71        | 865.33        | 0.596 | 0.96       |
| 0.23                    | 515            | 0.26        | 1993.47         | 945.14        | 925.41        | 0.608 | 0.96       |
| 0.24                    | 513            | 0.25333     | 1875.29         | 857.22        | 838.84        | 0.549 | 0.96       |
| 0.25                    | 511            | 0.24333     | 2017.96         | 968.67        | 953.59        | 0.535 | 0.96       |
| 0.28                    | 504            | 0.24        | 2099.41         | 1039.64       | 999.85        | 0.447 | 0.96       |
| 0.29                    | 502            | 0.23667     | 2125.48         | 1061.02       | 999.4         | 0.442 | 0.96       |
| 0.3                     | 500            | 0.23        | 1996.68         | 946.5         | 931.11        | 0.393 | 0.96       |
| 0.4                     | 479            | 0.22667     | 1974.85         | 917.72        | 900.81        | 0.218 | 0.96       |
| 0.5                     | 460            | 0.22        | 2002.62         | 943.55        | 927.22        | 0.131 | 0.96       |
| 1                       | 357            | 0.11        | 1297.05         | 352.09        | 343.25        | 0.002 | 0.95       |
| 1.5                     | 250            | 0.07        | 1061.53         | 145.03        | 137.9         | 0     | 0.93       |
| 2                       | 150            | 0.03333     | 1045.09         | 125.41        | 117.91        | 0     | 0.93       |
| 2.5                     | 23             | 0.017       | 996.96          | 49.12         | 43.13         | 0     | 0.87       |

**Πίνακας 6. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και αλγόριθμο τύπου PRMA για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων.**

Στους πίνακες 7, 8, 9, 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των πρωτοκόλλων για διάφορα φορτία κίνησης δεδομένων (φορτία ίσα με 25%, 40%, 50%, 60%, 80%, 90% του συνολικού φορτίου πληροφορίας που μπορεί θεωρητικά να υποστηρίξει το σύστημα, δηλαδή των 250 πακέτων). Το κάθε ένα από τα εξεταζόμενα φορτία αντιστοιχεί σε διάφορους συνδυασμούς ρυθμών άφιξης δεδομένων για κάθε είδος δεδομένων (email, sms, wap). Σε όλα τα πρωτόκολλα τηρήθηκαν οι περιορισμοί που τέθηκαν για τις απαιτήσεις ποιότητας προσφερόμενης υπηρεσίας.

Παρατηρήθηκε ότι για το ίδιο φορτίο κίνησης αλλά για διαφορετικούς ρυθμούς άφιξης δεδομένων, η χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες φωνής διαφέρει αισθητά. Η αύξηση του ρυθμού άφιξης wap και sms δεδομένων ανά πλαίσιο (με ανάλογη μείωση του ρυθμού άφιξης email) οδηγεί το σύστημα σε μικρότερη χωρητικότητα χρηστών φωνής, λόγω του ότι για να παραμείνει ίδιο το φορτίο πρέπει τα μηνύματα sms και wap που εμπεριέχουν πολύ λιγότερα πακέτα από ένα μήνυμα email να αυξηθούν πολύ, με συνέπεια να αυξηθούν και οι συγκρούσεις των πακέτων αιτήσεων των χρηστών κατά την περίοδο του ανταγωνισμού.

Όσον αφορά στην σύγκριση μεταξύ των πρωτοκόλλων, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι γενικά ίδια με αυτά που προέκυψαν και από τους πίνακες 2-6, καθώς όλα τα αποτελέσματα των πινάκων 7-10 αφορούν ιδιαίτερα υψηλά συνολικά φορτία κίνησης (φωνής και δεδομένων), με συνέπεια να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων και τα χειρότερα αποτελέσματα το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και αλγόριθμο τύπου PRMA για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων. Πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι το τελευταίο αυτό πρωτόκολλο, τα αποτελέσματα του οποίου εμφανίζονται στον πίνακα 10, θα μπορούσε να εμφανίσει πιθανόν σχετικά καλύτερα αποτελέσματα (πάντα όμως χειρότερα από αυτά των πρωτοκόλλων στοίβας) αν χρησιμοποιούσαμε διαφορετικές πιθανότητες μετάδοσης πακέτου για κάθε είδος δεδομένων, καθώς οι ρυθμοί άφιξης για κάθε είδος δεδομένων είναι διαφορετικοί. Οι λόγοι που δεν ακολουθήθηκε αυτή η προσέγγιση είναι: α) η υπολογιστική πολυπλοκότητα του υπολογισμού των διαφορετικών πιθανοτήτων για κάθε είδος κίνησης δεδομένων, β) το γεγονός ότι μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν απολύτως ανεφάρμοστη πρακτικά, καθώς δεν είναι δυνατόν να υπολογισθούν οι αντίστοιχες πιθανότητες για όλα τα σενάρια κίνησης δεδομένων (που είναι άπειρα) και, επιπλέον, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα 10, οι βέλτιστες πιθανότητες διαφέρουν αισθητά ακόμα και ανάμεσα σε ίσα φορτία δεδομένων, γ) η λογική με την οποία εξυπηρετούνται οι χρήστες δεδομένων στο σύστημά μας είναι ότι *όλοι αντιμετωπίζονται ως ίσοι κατά την περίοδο του ανταγωνισμού*, καθώς δεν υπάρχει ειδική «βαρύτητα» σε κάποια από τις τρεις εξεταζόμενες εφαρμογές δεδομένων, και *έπειτα, βάσει των διαφορετικών απαιτήσεών τους σε καθυστερήσεις, ο σταθμός βάσης εξυπηρετεί πρώτα τους wap χρήστες που έχουν επιτύχει στον ανταγωνισμό, έπειτα τους sms χρήστες και τελευταίους τους email χρήστες*.

Τέλος, τα σύμβολα «x» στους πίνακες δηλώνουν την αδυναμία του συστήματος να υποστηρίξει τα συγκεκριμένα φορτία.



| Load | Rate email | Rate sms | Rate wap | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|------|------------|----------|----------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
|      | 0.7        | 2        | 1.4      | 393            | 1058.04         | 213.46        | 128.04        | 0.003 | 0.93       |
| 25%  | 0.4        | 5        | 7.12     | 364            | 947             | 38.11         | 51.63         | 0.001 | 0.88       |
|      | 0.2        | 7.8      | 10       | 359            | 957.36          | 38.78         | 52.52         | 0.001 | 0.87       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.2        | 1.5      | 1.72     | 308            | 1103.55         | 190.62        | 318.17        | 0.001 | 0.94       |
| 40%  | 0.7        | 10       | 7        | 285            | 947             | 469.15        | 36.86         | 0     | 0.9        |
|      | 0.5        | 7.8      | 16       | 273            | 952.48          | 36.57         | 812.44        | 0     | 0.88       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.5        | 2        | 2        | 246            | 1008.08         | 822.18        | 815.88        | 0     | 0.93       |
| 50%  | 1          | 8.3      | 10       | 223            | 948.99          | 90.79         | 825.3         | 0     | 0.89       |
|      | 0.6        | 12       | 18.8     | 200            | 939.84          | 36.71         | 352.2         | 0     | 0.85       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.7        | 2        | 6        | 171            | 951.07          | 40.99         | 974.32        | 0     | 0.91       |
| 60%  | 1.4        | 8        | 8.16     | 157            | 949.86          | 153.45        | 198.53        | 0     | 0.88       |
|      | 1.1        | 12       | 12.72    | 150            | 942.88          | 116.32        | 358.1         | 0     | 0.86       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.5        | 2        | 1.52     | 86             | 9913.45         | 56.88         | 34.72         | 0     | 0.97       |
| 80%  | 2.1        | 7        | 8        | 40             | 946.79          | 154.43        | 543.63        | 0     | 0.88       |
|      | 1.6        | 7        | 23.6     | 10             | 947.25          | 33.7          | 963.59        | 0     | 0.83       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.85       | 1        | 2.04     | 27             | 4879.09         | 35.75         | 36.25         | 0     | 0.96       |
| 90%  | 2.7        | 4.52     | 2.5      | 3              | 990.71          | 3321.77       | 26.87         | 0     | 0.92       |
|      | 2.3        | 4.5      | 15       | x              | x               | x             | x             | x     | x          |

**Πίνακας 7. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων, για διάφορα φορτία κίνησης.**

| Load | Rate email | Rate sms | Rate wap | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|------|------------|----------|----------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
|      | 0.7        | 2        | 1.4      | 395            | 1055.44         | 136.4         | 129.88        | 0.003 | 0.94       |
| 25%  | 0.4        | 5        | 7.12     | 371            | 957.2           | 37.79         | 44.27         | 0.001 | 0.89       |
|      | 0.2        | 7.8      | 10       | 360            | 950.71          | 37.25         | 34.99         | 0.001 | 0.87       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.2        | 1.5      | 1.72     | 308            | 1097.45         | 181.63        | 176.29        | 0.001 | 0.94       |
| 40%  | 0.7        | 10       | 7        | 289            | 944.15          | 98.95         | 33.9          | 0     | 0.9        |
|      | 0.5        | 7.8      | 16       | 276            | 941.58          | 36.38         | 53.08         | 0     | 0.88       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.5        | 2        | 2        | 247            | 1087.58         | 170.36        | 165.13        | 0     | 0.94       |
| 50%  | 1          | 8.3      | 10       | 232            | 948.88          | 76.89         | 387.45        | 0     | 0.91       |
|      | 0.6        | 12       | 18.8     | 201            | 951             | 36.4          | 38.45         | 0     | 0.85       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.7        | 2        | 6        | 182            | 962.29          | 49.75         | 580.87        | 0     | 0.92       |
| 60%  | 1.4        | 8        | 8.16     | 159            | 948.74          | 69.55         | 74.87         | 0     | 0.88       |
|      | 1.1        | 12       | 12.72    | 150            | 948.12          | 48.62         | 69.54         | 0     | 0.87       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.5        | 2        | 1.52     | 86             | 1318.6          | 404.66        | 399.47        | 0     | 0.96       |
| 80%  | 2.1        | 7        | 8        | 47             | 949.72          | 87.87         | 253.49        | 0     | 0.89       |
|      | 1.6        | 7        | 23.6     | 21             | 945.77          | 33.5          | 50.16         | 0     | 0.84       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.85       | 1        | 2.04     | 27             | 1385.52         | 467.15        | 463.55        | 0     | 0.96       |
| 90%  | 2.7        | 4.52     | 2.5      | 10             | 1014.68         | 3934.03       | 40.53         | 0     | 0.93       |
|      | 2.3        | 4.5      | 15       | x              | x               | x             | x             | x     | x          |

**Πίνακας 8. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων, για διάφορα φορτία κίνησης.**

| Load | Rate email | Rate sms | Rate wap | Voice Capacity | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|------|------------|----------|----------|----------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
|      | 0.7        | 2        | 1.4      | 397            | 1101.42         | 179.92        | 173.96        | 0.002 | 0.94       |
| 25%  | 0.4        | 5        | 7.12     | 374            | 951.12          | 39.38         | 57.12         | 0.001 | 0.9        |
|      | 0.2        | 7.8      | 10       | 365            | 950.07          | 37.84         | 38.57         | 0     | 0.88       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.2        | 1.5      | 1.72     | 310            | 1154.22         | 234.42        | 229.35        | 0     | 0.94       |
| 40%  | 0.7        | 10       | 7        | 296            | 954.43          | 268.4         | 39.6          | 0     | 0.92       |
|      | 0.5        | 7.8      | 16       | 278            | 940.72          | 36.54         | 64.25         | 0     | 0.88       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.5        | 2        | 2        | 248            | 1117.22         | 199.98        | 194.82        | 0     | 0.94       |
| 50%  | 1          | 8.3      | 10       | 237            | 952.76          | 100.77        | 840.57        | 0     | 0.92       |
|      | 0.6        | 12       | 18.08    | 208            | 942.84          | 36.86         | 47.39         | 0     | 0.86       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 1.7        | 2        | 6        | 183            | 970.91          | 56.52         | 989.72        | 0     | 0.92       |
| 60%  | 1.4        | 8        | 8.16     | 167            | 949.01          | 136.88        | 163.45        | 0     | 0.9        |
|      | 1.1        | 12       | 12.72    | 153            | 946.83          | 50.87         | 74.56         | 0     | 0.87       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.5        | 2        | 1.52     | 86             | 1430.18         | 508.35        | 502.39        | 0     | 0.96       |
| 80%  | 2.1        | 7        | 8        | 52             | 949.64          | 157.63        | 453.81        | 0     | 0.9        |
|      | 1.6        | 7        | 23.6     | 43             | 946.76          | 34.65         | 807.04        | 0     | 0.88       |
|      |            |          |          |                |                 |               |               |       |            |
|      | 2.85       | 1        | 2.04     | 28             | 1405.2          | 486.49        | 483.03        | 0     | 0.96       |
| 90%  | 2.7        | 4.52     | 2.5      | 11             | 1042.17         | 4260.41       | 42.07         | 0     | 0.94       |
|      | 2.3        | 4.5      | 15       | x              | x               | x             | x             | x     | x          |

**Πίνακας 9. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και three-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων, για διάφορα φορτία κίνησης.**

| Load | Rate email | Rate sms | Rate wap | Voice Capacity | Probability | Delay email(ms) | Delay sms(ms) | Delay wap(ms) | Pdrop | Throughput |
|------|------------|----------|----------|----------------|-------------|-----------------|---------------|---------------|-------|------------|
|      | 0.7        | 2        | 1.4      | 387            | 0.067       | 986.16          | 74.87         | 68.86         | 0.002 | 0.92       |
| 25%  | 0.4        | 5        | 7.12     | 297            | 0.067       | 953.16          | 41.36         | 35.5          | 0     | 0.77       |
|      | 0.2        | 7.8      | 10       | 287            | 0.067       | 960             | 41.59         | 35.72         | 0     | 0.75       |
|      |            |          |          |                |             |                 |               |               |       |            |
|      | 1.2        | 1.5      | 1.72     | 271            | 0.067       | 963.61          | 42.83         | 36.97         | 0     | 0.88       |
| 40%  | 0.7        | 10       | 7        | 212            | 0.033       | 965.88          | 41.6          | 35.74         | 0     | 0.77       |
|      | 0.5        | 7.8      | 16       | 202            | 0.033       | 956.91          | 41.5          | 35.74         | 0     | 0.75       |
|      |            |          |          |                |             |                 |               |               |       |            |
|      | 1.5        | 2        | 2        | 235            | 0.046       | 992.62          | 79.09         | 72.9          | 0     | 0.91       |
| 50%  | 1          | 8.3      | 10       | 152            | 0.033       | 951.74          | 40.94         | 35.08         | 0     | 0.76       |
|      | 0.6        | 12       | 18.8     | 73             | 0.036       | 955.16          | 37.22         | 31.36         | 0     | 0.64       |
|      |            |          |          |                |             |                 |               |               |       |            |
|      | 1.7        | 2        | 6        | 111            | 0.03        | 959.75          | 40.59         | 34.73         | 0     | 0.8        |
| 60%  | 1.4        | 8        | 8.16     | 100            | 0.026       | 954.08          | 40.78         | 34.91         | 0     | 0.78       |
|      | 1.1        | 12       | 12.72    | 66             | 0.033       | 952.94          | 39.56         | 33.7          | 0     | 0.72       |
|      |            |          |          |                |             |                 |               |               |       |            |
|      | 2.5        | 2        | 1.52     | 62             | 0.03        | 1027.95         | 112.32        | 105.39        | 0     | 0.92       |
| 80%  | 2.1        | 7        | 8        | x              | x           | x               | x             | x             | x     | x          |
|      | 1.6        | 7        | 23.6     | x              | x           | x               | x             | x             | x     | x          |
|      |            |          |          |                |             |                 |               |               |       |            |
|      | 2.85       | 1        | 2.04     | 11             | 0.04        | 1117.91         | 196.82        | 187.34        | 0     | 0.94       |
| 90%  | 2.7        | 4.52     | 2.5      | x              | x           | x               | x             | x             | x     | x          |
|      | 2.3        | 4.5      | 15       | x              | x           | x               | x             | x             | x     | x          |

**Πίνακας 10. Μετρικές για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί two-cell stack αλγόριθμο για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων φωνής και αλγόριθμο τύπου PRMA για την επίλυση του ανταγωνισμού των μηνυμάτων δεδομένων, για διάφορα φορτία κίνησης.**

### 2.3.3 Γενικά συμπεράσματα – Η πρότασή μας- Μελλοντική Δουλειά

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη των τεσσάρων MAC πρωτοκόλλων οδηγούν στο συμπέρασμα πως κάθε MAC πρωτόκολλο υπερτερεί σε συγκεκριμένες περιπτώσεις των υπολοίπων, κι έτσι είναι κατάλληλο για συγκεκριμένο φορτίο κίνησης στο ασύρματο κανάλι.

Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στην πρόταση ενός δυναμικού μηχανισμού επιλογής MAC πρωτοκόλλου βάσει του φορτίου του καναλιού:

Σχολιάζοντας στην παράγραφο 2.3.2 τα αποτελέσματα του Σχήματος 8, καταλήξαμε στο συμπέρασμα πως υπάρχει ένας οριακός ρυθμός άφιξης δεδομένων (0.29 μηνύματα/frame) πέρα από τον οποίο αλλάζει το MAC πρωτόκολλο που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα πολυπλεξίας. Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν, τόσο μέσω προσομοιώσεων όσο και μέσω αναλυτικής προσέγγισης του προβλήματος, να βρεθούν ορισμένα «κομβικά φορτία» που θα χρησιμοποιούνται ως σημεία εναλλαγής των MAC πρωτοκόλλων. Μία απλή μέθοδος υπολογισμού του φορτίου του καναλιού προτάθηκε στο [59], όπου οι κόμβοι αντιλαμβάνονται το φορτίο του καναλιού μετρώντας τις άδειες χρονοθυρίδες του πλαισίου -έπειτα, βάσει της μέτρησης του φορτίου οι κόμβοι στο [59] αποφασίζουν με ποιο ρυθμό θα μεταδώσουν. Η προσέγγιση αυτή δεν αποτελεί την καλύτερη πρακτική λύση σε ένα ασύρματο δίκτυο, καθώς οι χρήστες θα ήταν αναγκασμένοι να παρακολουθούν συνεχώς το downlink κανάλι για να μαθαίνουν την κατάσταση κάθε χρονοθυρίδας, με συνέπεια την αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για κάθε τερματικό.. Η μέθοδος που προτείνουμε περιλαμβάνει την ύπαρξη όλων των πρωτοκόλλων πάνω στην κάρτα των τερματικών φωνής και δεδομένων, και τον υπολογισμό του φορτίου του καναλιού από τον σταθμό βάσης -που έχει πλήρη γνώση της κατάστασης του συστήματος- ως συνάρτηση της ήδη υπάρχουσας κίνησης στο κανάλι (κατειλημμένες χρονοθυρίδες πληροφορίας) και της κίνησης που αναμένει να λάβει χρονοθυρίδες πληροφορίας (χρήστες που έχουν επιτύχει στον ανταγωνισμό). Με βάση αυτό τον υπολογισμό, ο σταθμός βάσης θα μπορεί να ενημερώνει σε μια χρονοθυρίδα του downlink καναλιού τα τερματικά ώστε να αλλάζουν, όποτε χρειάζεται, το πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιούν για πρόσβαση στο δίκτυο, με στόχο την μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού.

Η προτεινόμενη μέθοδος θα εξεταστεί διεξοδικά σε μελλοντική δουλειά.

## 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. T. M. Chen and S. S. Liu, "ATM Switching Systems", *Artech House, Inc.*, ISBN 0-89006-682-5, 1995.
7. The ATM Forum, "Traffic Management Specification Version 4.0", Straw Vote, October 1995.
8. The ATM Forum, "Draft UNI Specification Version 4.0", October 1995.
9. W. Stallings, "ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM", *Prentice Hall*, 1995.
10. ETSI, "Common Air Interface Specification to be Used for the Interworking Between Cordless Telephone Apparatus in the Frequency Band 864.1 to 868.1 MHz", *Draft ETS 300-131*, France, 1991.
11. P. Wong and D. Britland, "Mobile Data Communications", *Artech House Publishers, Mobile Communications Series*, 1995.
12. ETSI, "Radio Equipment and Systems (RES); Digital European Cordless Telecommunication (DECT); Common Interface Part 1: Overview", *ETS 300 175-1*, October 1992.
13. V. O. K. Li and X. Qiu, "Personal Communication Systems (PCS)", *in Proceedings of the IEEE, Vol.83, No.9*, September 1995.
14. K. Pahlavan, A. Levesque, "Wireless Data Communications", *in Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9*, September 1994.
15. S. Faruque, "Cellular Mobile Systems Engineering", *Artech House Publishers, Mobile Communications Series*, 1996.

16. J. Gardiner and B. West, "Personal Communication Systems and Technologies", *Artech House Publishers, Mobile Communications Series*, 1995.
17. Α. Μαριάς, «Διαχείριση Πόρων σε μη Αδειοδοτημένα Ασύρματα Συστήματα», *Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*, 2003.
18. C. Bettstetter, H. J. Vogel and J. Eberspacher, "GSM Phase 2+. General Packet Radio Service, GPRS: Architecture, Protocols and Air Interface", *IEEE Communication Surveys, Third Quarter 1999, vol. 2, no. 3*.
19. Federal Communication Committee (FCC), "In the Matter of Amendment of the Commission's Rules for Operation of Unlicensed NII Devices in the 5 GHz Frequency Range", *Report and Order*, January 1997.
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. 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, pp. 87-89, January 1999.
36. 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.
37. [Online] <http://www.eurotechnology.com>
38. 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.
39. D. Raychaudhuri, L.J. French, R.J. Siracusa, S. K. Biswas, Y. Ruixi, 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, 1997, pp. 83-95.
40. N.Passas, D.Skyrianoglou and L.Merakos, "Traffic Scheduling in Wireless ATM Networks", in *Proceedings of the IEEE ATM'97 Workshop*, Lisbon, Portugal, May 1997.
41. L. Musumeci, P. Giacomazzi and L. Fratta, "Polling - and Contention-Based Schemes for TDMA-TDD Access to Wireless ATM Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 9, 2000, pp. 1597-1607.



42. G. Colombo, L. Lenzi, E. Mingozzi, B. Cornaglia and R. Santaniello, "Extended Performance Evaluation of PRADOS: A Scheduling Algorithm for Traffic Integration in a Wireless ATM Network", *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 2-3, 2002, pp. 265-274.
43. 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.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. R. Rom and M. Sidi, "Multiple Access Protocols: Performance and Analysis", *Springer Verlag*, 1990.
49. 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.
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.
51. P. T. Brady, "A Technique for Investigating On-Off Patterns of Speech", *Bell Sys. Tech. Journal*, Jan. 1965.
52. 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.
53. ETSI. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Technical Realization of the Short Message Service (SMS); Point-to-Point (PP). (GSM 03.40)
54. H. Holma and A. Toskala, "WCDMA for UMTS", (book), John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 2004, third edition.
55. L. Langer, "Mobile Traffic Shaping: the key to success for GPRS services", [Online] <http://www.intercomms.net/AUG03/content/cellglide.php>
56. [Online] <http://www.heitec.sk/EN/xml/heikon.htm>

57. J. Metzler, "A LAN Perspective on Wireless WAN Requirements", [Online] [http://www.flarion.com/products/whitepapers/MetzlerLatencyApps\\_Paper.pdf](http://www.flarion.com/products/whitepapers/MetzlerLatencyApps_Paper.pdf)
58. P. Stuckmann and C. Hoymann, "Dimensioning GPRS Networks for Coexisting Applications based on WAP and Conventional Internet Protocols", in *Proceedings of the European Wireless 2002 Conference*, Florence, Italy, 2002.
59. J. O. Limb, "Load-controlled Scheduling of Traffic on High-Speed Metropolitan Area Networks", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 37, 1989, pp. 1144-1150.