

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Τηλεπικοινωνιών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προτεραιοποιημένη πρόσβαση χρηστών φωνής σε ασύρματα
TDMA ενοποιημένα δίκτυα φωνής/δεδομένων τρίτης γενιάς**

Παπαδάκης Χάρης

Χανιά 2004

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή αφορά τον σχεδιασμό αποδοτικού πρωτοκόλλου για την παροχή ενοποιημένης πρόσβασης σε χρήστες φωνής και δεδομένων, με προτεραιότητα στους χρήστες φωνής, σε ασύρματα TDMA δίκτυα τρίτης γενιάς.

Στο πρώτο κύριο κεφάλαιο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής, κεφάλαιο 2, περιλαμβάνεται αρχικά μία σύντομη αναφορά πάνω στα ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα και τις τεχνολογικές εξελίξεις στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες (ενότητα 2.1). Στην συνέχεια (ενότητα 2.2) γίνεται αναλυτική παρουσίαση του Ασύγχρονου Τρόπου Μετάδοσης (ATM), δομή και τρόπος λειτουργίας, αναφέρονται περιληπτικά οι κατηγορίες συνδέσεων ATM, και γίνεται σύγκριση με την τεχνική του Σύγχρονου Τρόπου Μετάδοσης (Synchronous Transfer Mode, STM). Στην επόμενη ενότητα (2.3) αναπτύσσονται τα κύρια χαρακτηριστικά ορισμένων κατηγοριών στις οποίες διακρίνονται τα ασύρματα δίκτυα: της ασύρματης τηλεφωνίας, των κυψελωτών δικτύων φωνής, των κυψελωτών δικτύων δεδομένων, και των ασύρματων τοπικών δικτύων δεδομένων. Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί ο συνδυασμός ασύρματων δικτύων και τεχνολογίας ATM (ενότητα 2.4), όπου αναλύονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται σε ένα ασύρματο ATM δίκτυο, δηλαδή ο έλεγχος πολλαπλής πρόσβασης, ο έλεγχος λαθών, και η αλλαγή σταθμού βάσης. Το τελευταίο κομμάτι αυτού του κεφαλαίου (ενότητα 2.5) περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του εξειδικευμένου ερευνητικού χώρου με τον οποίο ασχολήθηκε αυτή η μεταπτυχιακή εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά, το προτεινόμενο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (MAC Protocol) για ασύρματη ενοποιημένη επικοινωνία φωνής και δεδομένων, και τα αποτελέσματα της μελέτης απόδοσης του πρωτοκόλλου μέσω προσομοιώσεων.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' αυτή την ερευνητική εργασία και η συνεισφορά της στο ερευνητικό πεδίο, καθώς και μερικές ιδέες για πιθανή μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 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.

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

- Την αύξηση της ταχύτητας (capacity) των ασύρματων καναλιών, χάρη στην βελτίωση των τεχνολογιών για τους ασύρματους πομπούς και δέκτες.

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

Χάρη στα παραπάνω τεχνολογικά επιτεύγματα, σήμερα επικρατεί η τάση ολοκλήρωσης πολλαπλών εφαρμογών και η ταυτόχρονη παροχή τους στους χρήστες. Χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα δικτύου είναι το GSM, το οποίο αν και αρχικά σχεδιάστηκε για την υποστήριξη κινητής τηλεφωνίας, έχει ήδη εξελιχθεί και με την προσθήκη νέων τεχνικών ασύρματης μετάδοσης μέσω του GPRS (General Packet Radio Service) [2] και του πρωτοκόλλου WAP (Wireless Application Protocol) είναι σε θέση να υποστηρίξει ταυτόχρονα μετάδοση φωνής και δεδομένων, παρέχοντας ήδη στους χρήστες την δυνατότητα πρόσβασης στο Internet [3]. Μάλιστα, η προοπτική χρήσης της τεχνολογίας EDGE (Enhanced Data rate for GSM Evolution) στα GSM δίκτυα είναι αρκετά υποσχόμενη και όσον αφορά την 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 υποστηρίξουν ικανοποιητικά τις εφαρμογές φωνής και δεδομένων χαμηλού ρυθμού που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα. Γι' αυτό το λόγο απαιτείται η σχεδίαση ενός νέου δικτύου, τόσο σε επίπεδο αρχιτεκτονικής όσο και σε επίπεδο πρωτοκόλλων. Μ' αυτό τον τρόπο, οι νέες εφαρμογές θα υποστηριχθούν ικανοποιητικά και οι πόροι του δικτύου θα χρησιμοποιούνται αποδοτικά.

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

2.2 Ασύγχρονος Τρόπος Μετάδοσης (ATM)

Η ATM τεχνική έχει επιλεγεί ως ο επίσημος τρόπος μετάδοσης για το BISDN (Broadband Integrated Services Digital Network, Ευρυζωνικό Ψηφιακό Δίκτυο Ενοποιημένων Υπηρεσιών). Το BISDN είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που υποστηρίζει ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών (φωνή, εικόνα, πολυμέσα, κλπ). Ο όρος «Ασύγχρονος» δεν αναφέρεται στην μετάδοση αυτή καθ' αυτή, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σύγχρονη, αλλά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η κράτηση (reservation) του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ο χρόνος του καναλιού, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα

παρακάτω, διαιρείται σε χρονοθυρίδες σταθερού μεγέθους, οι οποίες κρατούνται με δυναμικό τρόπο από τους διάφορους χρήστες δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες τους.

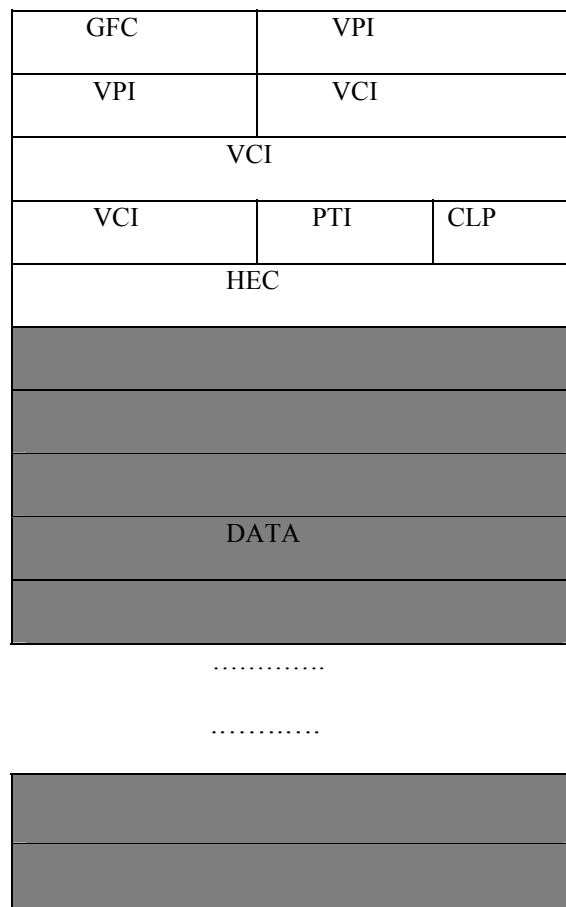
2.2.1. Ορισμός Τεχνικής ATM – Χρήση Πεδίων Επικεφαλίδας

Η τεχνική ATM ορίζεται με την βοήθεια ενός συνόλου αρχών [6]:

- Η πληροφορία μεταδίδεται με μονάδες δεδομένων σταθερού μεγέθους, που ονομάζονται κελιά (cells). Τα κελιά αποτελούνται από μια επικεφαλίδα και ένα πεδίο δεδομένων. Η δομή των κελιών περιγράφεται παρακάτω.
- Η ATM τεχνική χρησιμοποιεί ιδεατές συνδέσεις (virtual connections) για την μετάδοση της πληροφορίας. Συγκεκριμένα, η τεχνική ATM πολυπλέκει τα κανάλια μετάδοσης σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο της ιδεατής διαδρομής (Virtual Path, VP) και στο επίπεδο του ιδεατού καναλιού (Virtual Circuit, VC). Η πληροφορία προς μετάδοση διοχετεύεται στα VCs, έτσι ώστε μια πηγή πληροφορίας να χρησιμοποιεί ένα VC. Για το BISDN, ένας τερματικός σταθμός μπορεί να έχει ενεργοποιημένες πολλαπλές πηγές πληροφορίας ταυτόχρονα, οπότε για την μετάδοση απαιτούνται περισσότερα του ενός VCs. Κάθε φυσικό μέσο (οπτική ίνα ή ομοαξονικό καλώδιο) πολυπλέκεται (διαιρείται στατιστικά) σε ένα ή περισσότερα VPs. Κάθε VP πολυπλέκεται σε ένα ή περισσότερα VCs. Το ίδιο VP ή VC μπορεί να επεκτείνεται σε περισσότερες του ενός φυσικές ζεύξεις. Ως φυσική ζεύξη εννοείται το φυσικό μέσο (οπτικό, ενσύρματο ή ασύρματο) που συνδέει τον τερματικό εξοπλισμό ενός χρήστη με τον ATM κόμβο ή δύο ATM κόμβους μεταξύ τους. Εάν το τερματικό σημείο ενός VP ή VC είναι ένας ATM κόμβος εσωτερικά στο δίκτυο, τότε ο κόμβος αυτός πρέπει να εκτελέσει μεταγωγή. Ο όρος μεταγωγή χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τη διαδικασία εύρεσης της εξερχόμενης θύρας του κόμβου, του εξερχόμενου VP και του εξερχόμενου VC, με βάση την εισερχόμενη θύρα, το εισερχόμενο VP και το εισερχόμενο VC. Ο στόχος είναι να βρεθεί το εξερχόμενο VC στο οποίο θα προωθηθεί η εισερχόμενη πληροφορία. Ένας ATM κόμβος που εκτελεί την διαδικασία μεταγωγής, σε οποιοδήποτε από τα τρία επίπεδα (θύρα, VP, VC),

ονομάζεται ATM μεταγωγέας (ATM switch). Οι πίνακες αντιστοίχισης των εισερχόμενων τριάδων (θύρα, VP, VC), σε εξερχόμενες τριάδες (θύρα, VP, VC) ονομάζονται πίνακες μεταγωγής, και ανανεώνονται κατά την εγκαθίδρυση ή τον τερματισμό μιας ATM σύνδεσης, από τη στάθμη ελέγχου και διάφανα προς τον χρήστη.

- Η κύρια χρήση της επικεφαλίδας του κελιού (cell header) είναι η αναγνώριση των κελιών που ανήκουν στην ίδια σύνδεση.
- Οι επικεφαλίδες των κελιών έχουν τοπική σημασία μονάχα. Δεν είναι κανονικές διευθύνσεις και «μεταφράζονται» σε κάθε μεταγωγέα ATM.
- Το μέγεθος κάθε κελιού είναι 53 bytes. Από αυτά, τα 5 bytes αποτελούν την επικεφαλίδα και τα υπόλοιπα 48 bytes χρησιμοποιούνται για μετάδοση της πληροφορίας (payload). Η δομή των κελιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, όπου κάθε σειρά αναπαριστά ένα byte του κελιού.



Σχήμα 1. Δομή κελιού ATM.

Η χρήση των πεδίων της επικεφαλίδας έχει ως εξής:

- GFC (Generic Flow Control). Έχει μήκος 4 bits, και αφορά μόνο τα ATM κελιά που ρέουν στην φυσική διασύνδεση του τελικού χρήστη με τον πρώτο ATM μεταγωγέα (edge switch), διασύνδεση που καλείται και UNI (User Network Interface). Έχει όμοια χρήση με τον MAC μηχανισμό στα παραδοσιακά LANs.
- VPI (Virtual Path Identifier). Έχει μήκος 8 bits, και προσδιορίζει το VP από το οποίο προέρχονται τα ATM κελιά. Σε κάθε κόμβο ο προσδιοριστής VPI πρέπει να είναι μοναδικός.
- VCI (Virtual Channel Identifier). Έχει μήκος 16 bits και προσδιορίζει από ποιο VC προέρχονται τα ATM κελιά. Ο προσδιοριστής VCI είναι μοναδικός για κάθε VP.
- PTI (Payload Type Identifier). Έχει μήκος 3 bits και προσδιορίζει το είδος της μεταφερόμενης πληροφορίας, δηλαδή αν πρόκειται για πληροφορία χρήστη ή πληροφορία ελέγχου και διαχείρισης, κλπ.
- CLP (Cell Loss Priority). Έχει μήκος 1 bit και υποδεικνύει αν το ATM κελί μπορεί να απορριφθεί σε ένα κόμβο του δικτύου όπου παρατηρείται συμφόρηση. Η τιμή 0 υποδεικνύει χαμηλή προτεραιότητα απόρριψης, ενώ η τιμή 1 υψηλή.
- HEC (Header Error Control). Έχει μήκος 1 byte και εκτελεί έλεγχο σφαλμάτων στην επικεφαλίδα. Σε κάθε κόμβο προσδιορίζει αν τα περιεχόμενα της επικεφαλίδας είναι ορθά ή εσφαλμένα και αν είναι εσφαλμένα επιχειρεί να τα διορθώσει. Αν το σφάλμα είναι πέρα από τις δυνατότητες διόρθωσης του κώδικα, τότε η κυψελίδα απορρίπτεται.
- Τα πεδία VPI και VCI είναι απαραίτητα για την διαδικασία μεταγωγής στους ATM κόμβους. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ATM κελιά που διατρέχουν μια ιδεατή σύνδεση VP/VC διατηρούν την ακολουθία μετάδοσής τους από άκρο σε άκρο.

2.2.2. Κατηγορίες Συνδέσεων ATM

Για την επίτευξη υψηλής ποιότητας υπηρεσίας, οι συνδέσεις ATM κατηγοριοποιούνται σε πέντε κατηγορίες σύμφωνα με τις συστάσεις [7] και [8] του ATM Forum:

- Σταθερού ρυθμού μετάδοσης (Constant Bit Rate, CBR). Οι συνδέσεις αυτές έχουν σταθερό ρυθμό μετάδοσης καθ' όλη τη διάρκειά τους. Παράλληλα

παρουσιάζουν σταθερή χρονική εξάρτηση μεταξύ διαδοχικών ATM κελιών (σταθερό delay jitter). Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν αυτή την κατηγορία σύνδεσης έχουν αυστηρές απαιτήσεις στην καθυστέρηση των κελιών από άκρο σε άκρο (end-to-end). Παράδειγμα εφαρμογής που χρησιμοποιεί μετάδοση CBR είναι η ψηφιακή τηλεφωνία (π.χ., 64 Kbps PCM).

- Μεταβαλλόμενου Ρυθμού Μετάδοσης–Πραγματικού Χρόνου (Real Time Variable Bit Rate, rtVBR). Οι συνδέσεις αυτές παρουσιάζουν μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης κατά την διάρκειά τους. Παράλληλα παρουσιάζουν σταθερή χρονική εξάρτηση μεταξύ διαδοχικών ATM κελιών. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν rtVBR συνδέσεις ανέχονται ένα μέγιστο χρόνο μετάδοσης των κελιών από άκρο σε άκρο. Οι rtVBR εξυπηρετούν κλήσεις μετάδοσης βίντεο.
- Μεταβαλλόμενου Ρυθμού Μετάδοσης-Μη Πραγματικού Χρόνου (Non Real Time Variable Bit Rate, nrtVBR). Οι συνδέσεις αυτές παρουσιάζουν μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης κατά την διάρκειά τους, δεν παρουσιάζουν σταθερή χρονική εξάρτηση μεταξύ διαδοχικών ATM κελιών και δεν θέτουν περιορισμού στις απαιτήσεις τους όσον αφορά στην καθυστέρηση των κελιών από άκρο σε άκρο. Αντίθετα, οι ανοχές σε απώλειες πακέτων είναι συνήθως πολύ μικρές σε σχέση με τις συνδέσεις πραγματικού χρόνου, και για το λόγο αυτό απαιτούνται προηγμένοι μηχανισμοί ελέγχου και διόρθωσης λαθών.
- Διαθέσιμου Ρυθμού Μετάδοσης (Available Bit Rate, ABR). Οι συνδέσεις αυτές εξυπηρετούν κλήσεις που απαιτούν ρυθμό μετάδοσης πάνω από ένα ελάχιστο όριο και δεν θέτουν μεγάλες απαιτήσεις στην καθυστέρηση των κελιών από άκρο σε άκρο. Η δέσμευση πόρων πραγματοποιείται με βάση τους μέσους ρυθμούς παραγωγής κελιών, ενώ στο δίκτυο εφαρμόζονται μηχανισμοί ελέγχου της ροής των κελιών (flow control), η ανάδραση των οποίων βελτιώνει τους ρυθμούς απώλειας κελιών.
- Αδιευκρίνιστου Ρυθμού Μετάδοσης (Unspecified Bit Rate, UBR). Οι συνδέσεις αυτές εξυπηρετούν κλήσεις που δεν έχουν απαιτήσεις σε χρόνους και ρυθμούς μετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο ATM εξυπηρετεί αυτές τις κλήσεις και σε μη δεσμευμένες (idle) χρονοθυρίδες.

Λόγω των διαφορετικών ειδών κίνησης και απαιτήσεων των κλάσεων, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού που θα διαμορφώνει την κίνηση πριν αυτή μεταφερθεί μέσω ATM κελιών, και αντίστροφα θα ανασυνθέτει τις αρχικές μονάδες πληροφορίας από τα ATM κελιά. Ο μηχανισμός αυτός ορίζεται σαν ξεχωριστό επίπεδο, ακριβώς πάνω από το ATM επίπεδο, και ονομάζεται Επίπεδο Προσαρμογής ATM (ATM Adaptation Layer, AAL). Το AAL χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα, το Convergence Sublayer (CS) και το Segmentation and Reassembly Sublayer (SAR). Το CS περιλαμβάνει λειτουργίες πολυπλεξίας, ελέγχου λαθών, αναγνώρισης απώλειας κυψελίδων και ανάκτησης χρόνου. Το SAR στον αποστολέα χωρίζει την (μεταβλητού μήκους) πληροφορία, καθώς έρχεται από τα ανώτερα επίπεδα, σε κελιά, τα οποία παραδίδει στο ATM επίπεδο. Στον παραλήπτη, ανακατασκευάζει τις αρχικές μονάδες πληροφορίας από τα κελιά, πριν τις παραδώσει στα ανώτερα επίπεδα. Υπάρχουν τέσσερις τυποποιημένοι τύποι AAL, ανάλογα με το είδος κίνησης που υποστηρίζουν. Το AAL1 υποστηρίζει συνδέσεις CBR, το AAL2 συνδέσεις rtVBR, το AAL3/4 συνδέσεις nrtVBR, ενώ το AAL5 είναι μια απλούστερη μορφή του AAL3/4, για εφαρμογές που έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

2.2.3. ATM ως Τεχνική Πολυπλεξίας και Αλγόριθμος Ελέγχου Κίνησης

Ως τεχνική πολυπλεξίας, η ATM έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την τεχνική του Σύγχρονου Τρόπου Μετάδοσης (Synchronous Transfer Mode, STM). Ένας παραδοσιακός STM πολυπλέκτης διαιρεί το χρόνο σε σταθερού μεγέθους χρονοθυρίδες και τις κατανέμει εκ περιτροπής μεταξύ των πολλών καναλιών που θέλουν να μοιραστούν την ίδια έξοδο (διαδικασία όμοια με την TDM πολυπλεξία). Η STM τεχνική πολυπλεξίας οργανώνει τον χρόνο σε περιοδικά πλαίσια που αποτελούνται από χρονοθυρίδες. Σε κάθε χρονοθυρίδα ενός STM πλαισίου κατανέμεται και μία κλήση η οποία αναγνωρίζεται από την θέση της χρονοθυρίδας μέσα στο πλαίσιο. Οι χρονοθυρίδες κατανέμονται σύμφωνα με το μέγιστο ρυθμό μεταφοράς (peak cell rate) της κλήσης. Έτσι η STM πολυπλεξία καθίσταται πολύ ικανοποιητική μόνο όταν το δίκτυο που την εφαρμόζει εξυπηρετεί υπηρεσίες που απαιτούν σταθερό ρυθμό μεταφοράς (π.χ., μόνο κανάλια τηλεφωνίας). Το πρόβλημα με αυτή την τεχνική είναι η απώλεια χρόνου, όταν ένα (ή περισσότερα) κανάλι που χρησιμοποιεί την χρονοθυρίδα δεν έχει δεδομένα για

αποστολή. Έτσι εμφανίζονται χρονοθυρίδες χωρίς να περιέχουν δεδομένα (idle slots) ενώ την ίδια στιγμή άλλες συνδέσεις έχουν ανάγκη για περισσότερες χρονοθυρίδες στο ίδιο πλαίσιο. Αντίθετα, η τεχνική πολυπλεξίας ATM καταχωρεί τις χρονοθυρίδες κατ' απαίτηση, εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση του χρόνου για όλα τα είδη πληροφορίας. Η ATM τεχνική είναι ιδανική όταν το δίκτυο θέλει να εξυπηρετήσει εκρηκτικές (bursty) πηγές πληροφορίας, όπου δεν απαιτείται συνεχής κράτηση bandwidth, καθώς οι πηγές για μεγάλα χρονικά διαστήματα είναι ανενεργές. Οι πηγές λαμβάνουν το ζητούμενο bandwidth (αν το επιτρέπουν οι ελεύθεροι πόροι του δικτύου) όταν έχουν πληροφορία προς μετάδοση και το απελευθερώνουν αμέσως μετά το πέρας της μετάδοσής τους (στατιστική πολυπλεξία).

Για να αντιμετωπισθεί αποδοτικά η συμφόρηση στο δίκτυο, υπάρχει ανάγκη για αλγορίθμους ελέγχου της κίνησης (traffic control algorithms), οι οποίοι πρέπει να μπορούν να προσαρμοσθούν εύκολα στις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας για τις διάφορες συνδέσεις. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές φωνής έχουν αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με την μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης κελιού καθώς και για το delay jitter. Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές δεδομένων συνήθως απαιτούν να υπάρχουν πολύ χαμηλές πιθανότητες εμφάνισης σφαλμάτων στο δίκτυο ώστε να μην αναγκάζονται να επαναμεταδίδουν συχνά τα χαμένα κελιά τους, ενώ αντίθετα έχουν ελάχιστες απαιτήσεις όσον αφορά την καθυστέρηση των κελιών τους.

Ένας αλγόριθμος ελέγχου κίνησης χωρίζεται σε δύο τμήματα:

1. Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης (Call Admission Control, CAC)
2. Έλεγχος Παραμέτρων Χρήσης (Usage Parameter Control, UPC)

Με τον Έλεγχο Αποδοχής Κλήσης, το δίκτυο αποφασίζει εάν θα αποδεχθεί μιας νέα σύνδεση ή όχι. Η απόφαση μπορεί να βασισθεί πάνω:

- α) Στα χαρακτηριστικά της κίνησης που η σύνδεση σκοπεύει να εισάγει στο δίκτυο
- β) Στις απαιτήσεις ποιότητας παρεχόμενης υπηρεσίας (QoS) που έχει η σύνδεση
- γ) Στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου.

Τα χαρακτηριστικά της κίνησης και οι απαιτήσεις για την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας καθορίζονται από ένα σύνολο παραμέτρων οι οποίες δηλώνονται από τον

χρήστη όταν κάνει αίτηση για την εγκαθίδρυση μιας σύνδεσης. Οι πιο συνηθισμένες παράμετροι είναι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης (mean cell rate), ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (peak cell rate), το μέγιστο μέγεθος έκρηξης (maximum burst size), η μέγιστη ανοχή καθυστέρησης κελιού (maximum cell delay tolerance) και η μέγιστη ανοχή στην απόκλιση καθυστέρησης κελιού (maximum cell delay variation tolerance). Με βάση αυτές τις παραμέτρους, ο CAC αλγόριθμος αποφασίζει αν πρέπει να κάνει αποδεκτή την νέα σύνδεση ή όχι. Ο αλγόριθμος δεν πρέπει να είναι υπερβολικά αυστηρός, αφού κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε χαμηλή χρήση των πόρων του δικτύου, αλλά ούτε και υπερβολικά επιεικής, αφού κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε συμφόρηση. Αν η σύνδεση γίνει αποδεκτή, θεωρείται ότι το δίκτυο και ο χρήστης έχουν συμφωνήσει σε ένα συμβόλαιο κίνησης. Με βάση το συμβόλαιο αυτό, το δίκτυο είναι υποχρεωμένο να ικανοποιεί τις απαιτήσεις QoS του χρήστη και ο χρήστης είναι υποχρεωμένος να λειτουργεί βάσει των παραμέτρων περιγραφής της κίνησής του που έχει δηλώσει στο δίκτυο [9].

Βέβαια, στα ATM δίκτυα η κράτηση εύρους ζώνης γίνεται δυναμικά, με συνέπεια να μην υπάρχει τρόπος να εμποδιστεί μια σύνδεση από το να παραβιάσει το συμβόλαιο κίνησής της και να μεταδώσει με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που έχει δηλώσει. Αυτό μπορεί να συμβεί όχι μόνο εξαιτίας κακής πρόθεσης του χρήστη, αλλά και λόγω πιθανού κακού υπολογισμού που έχει κάνει ο χρήστης για το εύρος ζώνης που του χρειάζεται. Τα ATM κελιά που αντιστοιχούν στο επιπλέον εύρος ζώνης μπορεί να προκαλέσουν συμφόρηση στο δίκτυο, γι' αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού για τις παραμέτρους χρήσης του δικτύου. Αυτός ο μηχανισμός (usage parameter control mechanism, UPC mechanism) ελέγχει την κίνηση την οποία εισάγει ο χρήστης στο δίκτυο, και ο στόχος του είναι να προστατεύσει το δίκτυο και τους υπόλοιπους χρήστες από παραβιάσεις των συμβολαίων κίνησης κάποιων χρηστών, είτε ηθελημένα είτε αθέλητα.

2.3 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:

2.3.1. Ασύρματη Τηλεφωνία (Cordless Telephony)

Παρέχουν περιορισμένη εμβέλεια, άρα και μικρή ισχύς 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.

2.3.2 Κυψελωτά Δίκτυα Φωνής

Χαρακτηρίζονται από ευρεία (δημόσια) κάλυψη, επιτρέπουν μεγάλες ταχύτητες στην κίνηση των χρηστών και υποστηρίζουν κυρίως τηλεφωνία (φωνή) η 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.

2.3.2.1 Κυψελωτά Δίκτυα Φωνής Πρώτης Γενιάς

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).

2.3.2.2 Κυψελωτά Δίκτυα Φωνής Δεύτερης Γενιάς

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 VSEL (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 Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Duplex, FDD). Οι συχνότητες της 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. Στα DAMPS η τεχνική FDD διαιρεί το διαθέσιμο φάσμα σε δύο ζώνες: στη 824-849MHz των ανοδικών, και στη 869-894MHz των καθοδικών συχνοτήτων. Οι συχνότητες του αμφίδρομου ζεύγους απέχουν 45MHz. Στο DAMPS έχουν οριστεί δύο πρότυπα διαμόρφωσης και πολύπλεξης ανά διαθέσιμη συχνότητα, το IS-54 και το IS-95. Στο IS-54 σε κάθε συχνότητα εύρους 30KHz χρησιμοποιείται διαμόρφωση $\pi/4$ DQPSK, αποδίδοντας 48,6Kbps ανά συχνότητα φάσματος (αποδοτικότητα 1,62bps/Hz) και εφαρμόζεται η τεχνική TDMA, η οποία παράγει πλαίσια των 3 χρονοθυρίδων, κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται για ένα κανάλι φωνής. Το σύνολο των διαθέσιμων αμφίδρομων συχνοτήτων για τους παροχείς υπολογίζεται σε 832 (ήτοι $894-869/0.03=832$). Στο IS-95 κάθε συχνότητα έχει εύρος 1250KHz, οπότε το σύνολο των διαθέσιμων αμφίδρομων συχνοτήτων για τους παροχείς υπολογίζεται σε 20 (ήτοι $894-869/1.25=20$). Στο IS-95 εφαρμόζεται η τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης με Διάρθρωση Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA). Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, οι χρήστες δύναται να επικοινωνήσουν στην ίδια συχνότητα χρησιμοποιώντας τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (Spread Spectrum, SS). Στις τεχνικές SS αυξάνεται η συχνότητα του διακριτού στο χρόνο σήματος βασικής ζώνης, με ταυτόχρονη εξάπλωση των αρμονικών του, χωρίς απώλειες στην ισχύ του. Αν το διαθέσιμο εύρος για εξάπλωση είναι αρκετά μεγάλο, τότε το πλάτος του σήματος μειώνεται δραστικά. Στο IS-95

εφαρμόζεται η τεχνική Ευθείας Συχνότητας SS (Direct Frequency SS, DSSS), ενώ υπάρχει η εναλλακτική CDMA τεχνική της Περιοδεύουσας Συχνότητας SS (Frequency Hopping SS, FHSS). Στην CSSS του IS-95 η εξάπλωση φάσματος αναφέρεται στην εξάπλωση της ισχύος μετάδοσης σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης. Τα βασικής ζώνης δυαδικά δεδομένα, πριν τη μετάδοσή τους, διαπερνούν μια υψηλής ταχύτητα X-OR διάταξη που περιέχει ένα κώδικα ψευδοτυχαίου θορύβου (Pseudo Noise, PN), η οποία εξαπλώνει την ακολουθία στο φάσμα. Τα υψηλής ταχύτητας δεδομένα της εξόδου της διάταξης διαμορφώνονται κατά QPSK και κατόπιν μεταδίδονται στο ασύρματο μέσο. Στο IS-95, η συχνότητα της διάταξης PN είναι 1,288MHz. Σε κάθε μια από τις 20 διαθέσιμες συχνότητες υποστηρίζονται 64 διακριτοί ορθογώνιοι κώδικες PN (γνωστοί και ως Walsh codes), ένας κώδικας Walsh ανά κλήση [15]. Οι ορθογώνιοι κώδικες έχουν μηδενικό συντελεστή συσχέτισης μεταξύ τους. Το 1993, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communication Committee FCC) των ΗΠΑ ανταποκρινόμενη στον κορεσμό των συχνοτήτων του AMPS και στην αυξανόμενη ζήτηση, διέθεσε πρόσθετα 120MHz στην περιοχή των 1850-1990MHz για υπηρεσίες κυψελωτής τηλεφωνίας. Για να αποφευχθούν αλληλοπαρεμβολές με τη μη αδειοδοτημένη ενδιάμεση ζώνη, η επιτροπή FCC προέβη σε ρύθμιση των επιπέδων μεταδιδόμενης ισχύος των μη αδειοδοτημένων συσκευών. Όσο αφορά τις μεθόδους πολυπλεξίας, διαμόρφωσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του PCS1900 υιοθετήθηκαν τρία διαφορετικά παράγωγα. Το πρώτο, που αναφέρετε και ως IS-136 ή DAMPS1900, δανείστηκε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του IS-54. Το δεύτερο χρησιμοποίησε CDMA τεχνικές και αρκετά χαρακτηριστικά του IS-95. Το τρίτο χρησιμοποίησε τις μεθόδους του Ευρωπαϊκού DCS1800. Και το Ιαπωνικό JDC χρησιμοποιεί τεχνική FDD, για να διαχωρίσει τις ανοδικές (ζώνη 940-956MHz) από τις καθοδικές συχνότητες (ζώνη 810-826MHz) [16]. Οι συχνότητες ενός αμφίδρομου ζεύγους μετάδοσης απέχουν 130MHz, ενώ κάθε συχνότητα έχει εύρος 25KHz, επομένως 640 συχνότητες μπορούν να διατεθούν στους παροχείς κυψελωτών υπηρεσιών κατά FDMA. Χρησιμοποιείται διαμόρφωση $\pi/4$ DQPSK αποδίδοντας 42Kbps ανά κανάλι φάσματος 30KHz (αποδοτικότητα 1,4bps/Hz). Σε κάθε συχνότητα εφαρμόζεται TDMA, σύμφωνα με την οποία ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια των 3 χρονοθυρίδων, κάθε μία από τις οποίες δεσμεύεται για ένα κανάλι φωνής. Στο

αρχικό φάσμα της περιοχής των 900MHz προστέθηκαν 24MHz στην περιοχή των 1400MHz για να ικανοποιηθεί η αυξημένη ζήτηση για κυψελωτή τηλεφωνία.

2.3.3 Κυψελωτά Δίκτυα Δεδομένων

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

2.3.3.1 Κυψελωτά Δίκτυα Δεδομένων 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς

Το MOBITECH [17], αναφέρεται ως ένα από τα πρώτα εγχειρήματα κυψελωτών συστημάτων μετάδοσης δεδομένων. Αν και σχεδιάστηκε και λειτούργησε ως σύστημα εντοπισμού (paging), αναπτύχθηκε με την τελική του μορφή αρχικά στη Σουηδία στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ενώ γρήγορα επεκτάθηκε στη Βόρεια Αμερική (ΗΠΑ και Καναδάς) και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Το MOBITECH καθιερώθηκε ως de-facto πρότυπο, 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. 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 κυψελωτής 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 κυψελωτών 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 κυψελωτό 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 Digital Sense Multiple Access (DSMA), που είναι βασισμένη στην καθιερωμένη μέθοδο ανίχνευσης καναλιού πολλαπλής προσπέλασης CSMA (Carrier Sense Multiple Access) του Ethernet.

Στην κατηγορία των συστημάτων κυψελωτής μετάδοσης δεδομένων συγκαταλέγεται και το ARDIS (Advanced Radio Data Information Service). Αποτελεί τη συνένωση δύο ιδιωτικών κυψελωτών ασύρματων δικτύων, της IBM και της Motorola [11]. Η ανάπτυξή του ως κυψελωτό δίκτυο ευρείας χρήσης άρχισε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, και συνολικά αναπτύχθηκαν 1300 σταθμοί βάσης στις ΗΠΑ, καλύπτοντας 400 μητροπολιτικές περιοχές. Στο ενσύρματο δίκτυο, η επικοινωνία των σταθμών βάσης με το δίκτυο κορμού (32 ελεγκτές δικτύου, και 4ARDIS hosts) πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλων SNA και X.25. Στην ασύρματη ζεύξη ο εξοπλισμός λειτουργεί στο φάσμα των 800MHz με τεχνική FDD (οι ανοδικές συχνότητες είναι απομακρυσμένες κατά 45KHz από τις καθοδικές). Κάθε κανάλι έχει εύρος 25KHz, αποδίδοντας 4,8Kbps με διαμόρφωση FSK, ενώ σε ορισμένες περιοχές κάλυψης με χρήση άλλων τεχνικών

διαμόρφωσης η ταχύτητα πρόσβασης ανέρχεται σε 19,2Kbps ανά κανάλι. Όπως και στην περίπτωση του CDPD, ο μηχανισμός πρόσβασης υλοποιείται με τη μέθοδο DSMA. Στο τομέα των κυψελωτών 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 (όπως και στα συστήματα ARDIS και CDPD). Στο ενσύρματο δίκτυο χρησιμοποιούνται συνδέσεις ISDN και X.25, ενώ στα χαρακτηριστικά του συγκαταλέγεται και η υποστήριξη μεταπομπής.

2.3.3.2 Κυψελωτά Δίκτυα Δεδομένων 3^{ης} γενιάς

Στην Ευρώπη, ωστόσο, η ώθηση των κυψελωτών 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. 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 (3rd Generation, 3G). Απαιτεί ειδικές κινητές τερματικές συσκευές που θα υποστηρίζουν την ασύρματη τεχνολογία, που από τα τέλη του 2000 είναι διαθέσιμες από τις κατασκευάστριες εταιρείες. 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-VolP). Είναι βέβαιο ότι 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. Η επιτυχία του EDGE, ωστόσο, εξαρτάται κατά πολύ από το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης των δικτύων UMTS.

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].

2.3.4 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.

Τα WLANs διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση της αρχιτεκτονική τους:

1. Κεντριοποιημένης πρόσβασης WLANs
2. Δυναμικά και πολυζευκτικά (multihop) WLANs, ή WLANs ειδικού σκοπού (ad hoc)
3. Προσωποκεντρικά WLANs ή WPANs (Wireless Personal Access Networks)
4. Από σημείο σε σημείο (point – to – point) WLANs

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980, η επιτροπή FCC δημοσιοποίησε κανόνες χρήσης για ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σε διαφορετικές φασματικές περιοχές, το οποίο ονομάστηκε φάσμα ISM (Industrial, Scientific and Medical). Οι φασματικές περιοχές που αφορούσαν οι κανόνες χρήσης είναι στα 902-928MHz, στα 2.4-2.485GHz και στα 5.725-5.85GHz. Στα τέλη του 1997 η επιτροπή FCC εκχώρησε πρόσθετο φάσμα, αυξάνοντας το συνολικό εύρος σε 300MHz στην περιοχή των 5GHz [19], δεσμεύοντας τρεις περιοχές των 100MHz, ήτοι στα 5.15-5.25GHz, στα 5.25-5.35GHz και στα 5.725-5.825GHz. Το ονομαζόμενο και ως 5GHz φάσμα ορίστηκε ως η βασική ραχοκοκαλιά της εθνικής υποδομής πληροφόρησης χωρίς άδεια χρήσης (Unlicensed National Information Infrastructure – UNII) των ΗΠΑ, υπό την επωνυμία SUPERNet (Shared Unlicensed Personal Radio Network). Η επιτροπή FCC όρισε πως η υλοποίηση συστημάτων που λειτουργούν στο φάσμα ISM και SUPERNet δεν προϋποθέτει αδειοδότηση. Ωστόσο, τέθηκαν ορισμένοι περιορισμοί, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους αφορούσαν στα επίπεδα ισχύος εκπομπής.

Στην Ευρώπη, ο οργανισμός ETSI, αρκετά αργότερα, στις αρχές του 1990, δημοσιοποίησε κανόνες χρήσης για τις περιοχές φάσματος 2.4GHz και στις περιοχές 5.2GHz. Οι ζώνες χρήσης είναι πανομοιότυπες με αυτές που όρισε ο FCC, αλλά στην περίπτωση του UNII φάσματος προστέθηκαν 255MHz (ζώνη 5470-5725Hz) και 50MHz (ζώνη 5825-5875Hz). Σε αντίθεση με την επιτροπή FCC στις ΗΠΑ, ο Ευρωπαϊκός οργανισμός ETSI δια μέσου των ομάδων εργασίας του, χαράζει την πολιτική και τους κανόνες χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ενώ παράλληλα υπεισέρχεται και στις τυποποιήσεις μηχανισμών και πρωτοκόλλων. Τα μέλη του οργανισμού ETSI, ακολουθούν τις de-jure τυποποιήσεις, οι οποίες, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, πλαισιώνονται από εγχειρίδια ελέγχου συμβατότητας ως προς αυτές (conformance testing).

2.4 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 συχνοτήτων στη ραδιοεπαφή, και σημείου-προς-πολλά σημεία (point-to-multipoint), με αποτέλεσμα να απαιτείται ειδικότερη διευθυνσιοδότηση,
- η ποιότητα μετάδοσης είναι κακή, και για τον λόγο αυτό απαιτούνται ανεπτυγμένες τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης των λαθών, και
- η επιβάρυνση από το φυσικό επίπεδο είναι μεγάλη, κύρια 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.

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

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

Στην τεχνική TDMA, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται σε αυτή την διατριβή, θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2.5.

2.4.2 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].

2.4.3 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 υποστηρίζει την μετακίνηση των τερματικών σε ένα ασύρματο ATM δίκτυο. Η επέκταση αυτή περιλαμβάνει επιπλέον σηματοδοσία, 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].

2.5 Το Πρωτόκολλο 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. Κατανεμημένης 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 δέσμευσης 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 *δέσμευση* και την *μετάδοση*. Στο στάδιο δέσμευσης, 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 δέσμευση που έγινε από το σύστημα. Τα πρωτόκολλα προσαρμοζόμενης δέσμευσης είναι σχετικά πολύπλοκα αλλά έχουν πολύ καλή απόδοση, παρ' όλο που μέρος του εύρους ζώνης καταναλώνεται στην φάση της δέσμευσης.

Στα πρωτόκολλα κατανεμημένης προσαρμοζόμενης δέσμευσης ο κάθε χρήστης αποφασίζει για την κίνηση που θα εισάγουν στο δίκτυο, με βάση πληροφορίες που είναι γνωστές σε όλους τους χρήστες.

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 δέσμευση και η σάρωση.

Τα πρωτόκολλα που βασίζονται στον ανταγωνισμό (π.χ., [27]) 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 [28]. 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 αλγόριθμους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία (π.χ., [29]), 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 καταναίμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης (π.χ., [30]). 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (MAC Protocol) για ασύρματες κινητές επικοινωνίες. Με τη χρήση εκτενών προσομοιώσεων μελετούμε την απόδοση του πρωτοκόλλου κατά την ολοκλήρωση κίνησης φωνής και δεδομένων πάνω από ένα εσωτερικό (indoor) ασύρματο κανάλι υψηλής ταχύτητας. Οι μετρικές που χρησιμοποιούμε για την εκτίμηση της απόδοσης του πρωτοκόλλου είναι η πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής, η μέση καθυστέρηση πακέτων φωνής, καθώς και η μέση καθυστέρηση πρόσβασης στο σύστημα των μηνυμάτων δεδομένων στο σύστημα και η μέση καθυστέρηση γ μετάδοσης των μηνυμάτων δεδομένων.

Συνδυάζοντας μία δική μας ιδέα για τον χρονοπρογραμματισμό (scheduling) των δύο διαφορετικών τύπων κίνησης, με τροποποιήσεις πάνω σε ιδέες που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία παίρνουμε πολύ καλά αποτελέσματα πολυπλεξίας, δηλαδή χρήσης του εύρους ζώνης του καναλιού, ενώ παράλληλα ικανοποιούμε τις απαιτήσεις της φωνής και των δεδομένων όσον αφορά στην απαιτούμενη ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας.

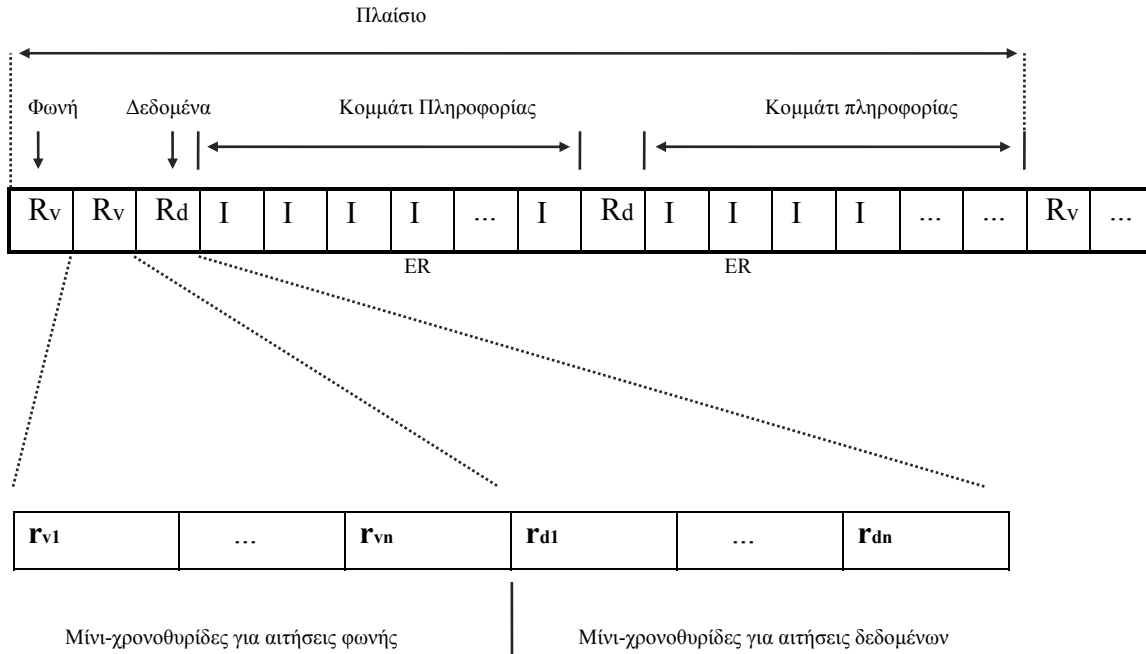
3.1 Το μοντέλο του συστήματος

Σε αυτό το σκέλος της διατριβής θα παρουσιάσουμε την δομή του πλαισίου του καναλιού (channel frame), τις ενέργειες που εκτελούν τα τερματικά φωνής και τα τερματικά δεδομένων και τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού που εκτελεί ο σταθμός βάσης. Επίσης, θα αναπτύξουμε την λειτουργία και τις διαφορές των πρωτοκόλλων για την επίλυση των συγκρούσεων ανάμεσα στα τερματικά φωνής και στα τερματικά δεδομένων, αντίστοιχα. Τέλος, θα εξηγήσουμε τα μοντέλα κίνησης φωνής και δεδομένων.

3.1.1. Δομή του Πλαισίου του Καναλιού

Ο χρόνος του καναλιού στην άνω ζεύξη (uplink, ζεύξη από τα τερματικά προς τον σταθμό βάσης) διαιρείται σε χρονοπλαίσια (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. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2 (το οποίο αναπαριστά ένα παράδειγμα της δομής των πλαισίων του

καναλιού), κάθε πλαίσιο 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 2. Ένα 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 -ιδίου- 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 μηνυματός 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. Θεωρούμε ότι τα δύο κομμάτια αιτήσεων (φωνής και δεδομένων) περιλαμβάνουν ίσο αριθμό από μίνι-χρονοθυρίδες και 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.

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 [31] και χρησιμοποιήθηκε εκτενώς στα [32,33].

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 [33] 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 [29] όσο και σε σχέση με αλγορίθμους που ακολουθούν την λογική του PRMA (π.χ., [34]) -σε αυτούς τους αλγορίθμους, 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 [31].

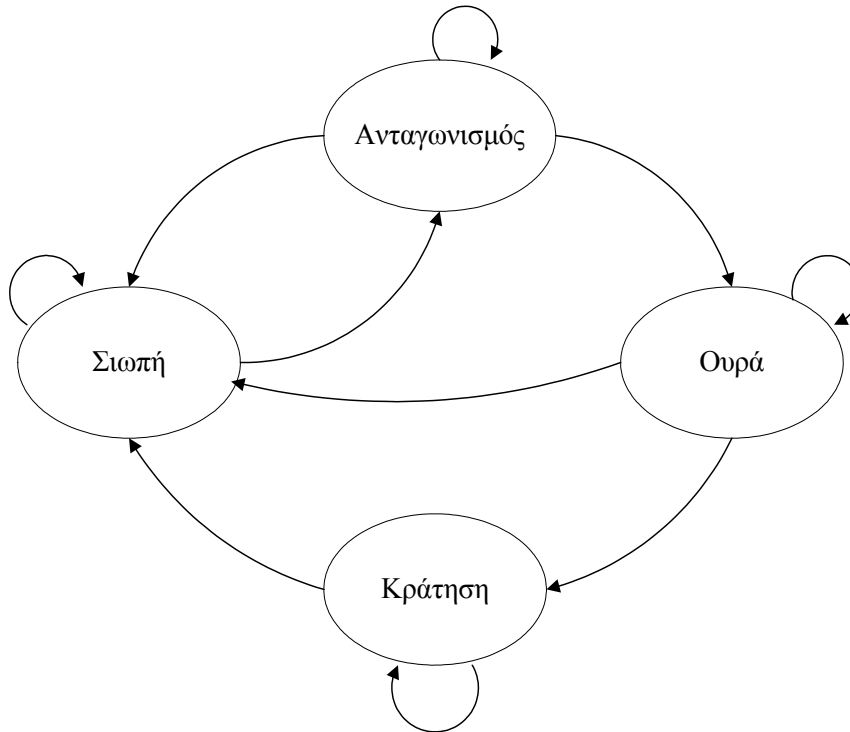
3.1.2. Ενέργειες των Τερματικών Φωνής και Δεδομένων, και Χρονοπρογραμματισμός στον Σταθμό Βάσης.

Τα τερματικά φωνής και δεδομένων που έχουν πακέτα προς μετάδοση αλλά δεν έχουν κάνει κράτηση, ανταγωνίζονται για τους πόρους του καναλιού χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο τυχαίας πρόσβασης (random access protocol) ώστε να μεταδώσουν τα πακέτα αιτήσεων 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 (ή ποιες χρονοθυρίδες) πληροφορίας θα του διατεθούν. Ένα τερματικό το οποίο δεν κατόρθωσε να μεταδώσει επιτυχημένα το πακέτο αίτησής του μέσα στα κομμάτια αιτήσεων του τρέχοντος πλαισίου, επιχειρεί να το επαναμεταδώσει στα κομμάτια αιτήσεων του επόμενου πλαισίου. Ένα τερματικό που έχει κάνει κράτηση χρονοθυρίδας πληροφορίας μεταδίδει ελεύθερα στη χρονοθυρίδα του σε συνεχόμενα πλαίσια, μέχρι να αποστείλει όλη την πληροφορία που επιθυμεί. 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.

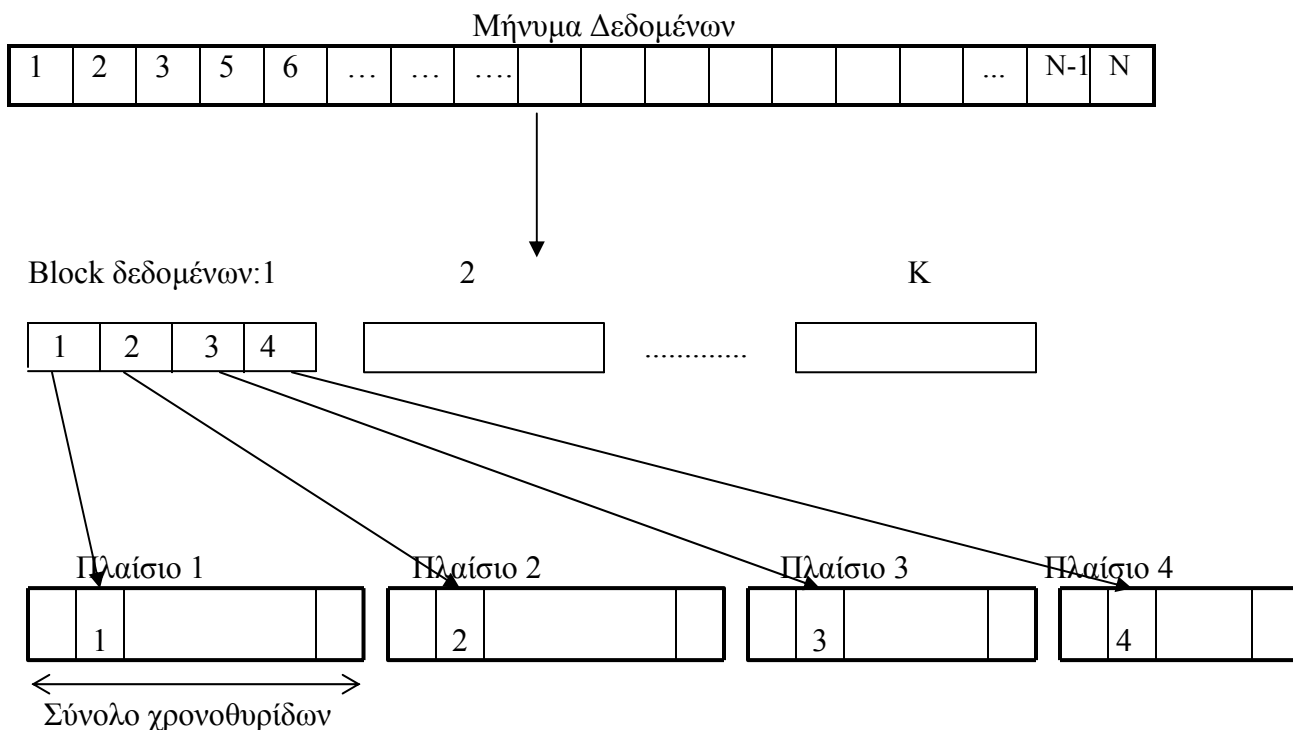


Σχήμα 3. Διάγραμμα μεταβολής καταστάσεων για ένα ενεργό τερματικό φωνής.

Υποθέτουμε ότι ο σταθμός βάσης πάντοτε εκχωρεί την πρώτη ελεύθερη χρονοθυρίδα μέσα στο πλαίσιο, και ότι η κίνηση 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 δηλαδή την δημιουργία δύο κλάσεων εξυπηρέτησης. Μέσα σε κάθε κλάση, η εξυπηρέτηση γίνεται με την μέθοδο FCFS (First Come First Served).

Για να ενισχύσουμε την προτεραιότητα της κίνησης φωνής, χρησιμοποιούμε μια διαφορετική προσέγγιση από το [35] για την δέσμευση χρονοθυρίδων από τα τερματικά δεδομένων, τροποποιώντας την ιδέα που παρουσιάζεται στο [36] -εισάγουμε την χρήση του μηχανισμού block M πακέτων. Όπως έχουμε εξηγήσει, κάθε τερματικό δεδομένων που επιτυγχάνει στην μετάδοση του πακέτου αίτησής του, λαμβάνει από τον σταθμό

βάσης μία χρονοθυρίδα στην οποία μεταδίδει τα πακέτα πληροφορίας του μηνύματός του. Με τον μηχανισμό block M πακέτων, το τερματικό δεδομένων δεν δικαιούται να μεταδίδει στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα όλα τα πακέτα του μηνύματός του, αλλά του παραχωρείται ένα block από M χρονοθυρίδες (μία χρονοθυρίδα, η ίδια, σε M διαδοχικά πλαίσια), το οποίο του επιτρέπει να μεταδώσει ένα τμήμα του συνολικού μηνύματος του. Μετά το πέρας των M χρονοθυρίδων (πλαισίων) το τερματικό δεδομένων χάνει την χρονοθυρίδα του και είναι αναγκασμένο να ξαναμπει στην διαδικασία του ανταγωνισμού στις μίνι-χρονοθυρίδες αιτήσεων, ώστε να αποκτήσει ξανά πρόσβαση στο σύστημα (όταν το επιτύχει, θα έχει και πάλι ένα M block στην διάθεσή του). Κατ' αυτό τον τρόπο, ελευθερώνονται χρονοθυρίδες πληροφορίας ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους χρήστες φωνής, οι οποίοι λόγω των αυστηρών απαιτήσεων στην καθυστέρηση των πακέτων τους έχουν μεγαλύτερη ανάγκη τις χρονοθυρίδες. Η διαδικασία περιγράφεται στο Σχήμα 4, για ένα μήνυμα δεδομένων που αποτελείται από N πακέτα. Το μήνυμα χωρίζεται σε $K=N/M$ blocks (εάν ο K δεν είναι ακέραιος, τότε το τελευταίο block περιέχει λιγότερα από M πακέτα.) Στο παράδειγμα του σχήματος έχουμε $M=4$, και τα πακέτα του πρώτου block μεταδίδονται στην ίδια χρονοθυρίδα σε 4 συνεχόμενα πλαίσια, ενώ για να μεταδοθεί και το δεύτερο block πρέπει το τερματικό δεδομένων να μπει εκ νέου στη διαδικασία της αίτησης σε επόμενο πλαίσιο. Η ιδέα αυτή, όπως παρουσιάζεται στο [36], αφορά σχετικά μικρά blocks χρονοθυρίδων και οι επιλογές του M σχετίζονται τόσο με το φαινόμενο της σύλληψης σήματος (capture) το οποίο εξετάζεται στο [36], όσο και με την κίνηση φωνής στο εκάστοτε πλαίσιο, αφού ο αλγόριθμος ακολουθεί την λογική του PRMA και επιτρέπει τον ανταγωνισμό μεταξύ τερματικών φωνής και δεδομένων. Περισσότερες λεπτομέρειες για το [36] και σύγκρισή του με το δικό μας πρωτόκολλο γίνονται στην ενότητα 3.3.2.



Σχήμα 4. Μηχανισμός M block.

3.1.3 Μηχανισμός χαμηλού φορτίου

Για την εφαρμογή ένα μηχανισμού χαμηλού φορτίου στο σύστημά μας, βασιστήκαμε στην ιδέα που παρουσιάστηκε στο [44]. Τα τερματικά δεδομένων επιχειρούν να μεταδώσουν μηνύματα που διαφέρουν μεταξύ τους σε μέγεθος και είναι, κατά μέσο όρο, πολύ μεγαλύτερα του ενός πακέτου (424 bits). Γι' αυτό το λόγο, η μη-εκχώρηση περισσότερων από μίας (που αρκεί στα τερματικά φωνής) χρονοθυρίδων ανά πλαίσιο στα τερματικά δεδομένων -αν, φυσικά, υπάρχουν ελεύθερες χρονοθυρίδες- είναι άδικη για αυτά και επιδρά αρνητικά στην απόδοση του συστήματός μας. Από την άλλη πλευρά, η εκχώρηση περισσότερων της μίας χρονοθυρίδας στα τερματικά δεδομένων θα οδηγούσε σε μείωση των διαθέσιμων χρονοθυρίδων για κρατήσεις ή αιτήσεις (μέσω των extra request slots) των τερματικών φωνής. Κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό, καθώς η επιβολή της προτεραιότητας της φωνής είναι, όπως έχουμε εξηγήσει, βασικός μας στόχος. Γι' αυτό το λόγο, εισάγουμε τον ακόλουθο μηχανισμό:

Ορίζουμε ως *χρήση του πλαισίου από την φωνή* τον λόγο

$\{(\text{κρατήσεις φωνής} + \text{αιτήσεις φωνής}) / \text{συνολικός αριθμός χρονοθυρίδων πληροφορίας στο πλαίσιο}\}$. Ο λόγος αυτός υπολογίζεται από τον σταθμό βάσης αμέσως μετά το τέλος

των χρονοθυρίδων αιτήσεων φωνής σε κάθε πλαίσιο. Αν ο λόγος είναι χαμηλότερος από ένα δεδομένο όριο, πράγμα που σημαίνει ότι η δραστηριότητα της φωνής θα είναι χαμηλή στο τρέχον πλαίσιο, τότε επιτρέπουμε στα τερματικά δεδομένων τα οποία έχουν αιτήσεις να αποκτήσουν περισσότερες από μία χρονοθυρίδες στο τρέχον πλαίσιο και μόνο. Η ιδέα αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο [35], και ο λόγος ύπαρξης του ορίου είναι η διασφάλιση ότι δεν θα εκχωρηθούν όλες οι ελεύθερες χρονοθυρίδες στα τερματικά δεδομένων, αφού είναι πιθανόν να μας χρειαστούν ως ER χρονοθυρίδες για την επίλυση ανταγωνισμού φωνής που δεν έχει τελειώσει μέσα στο κομμάτι αιτήσεων της φωνής. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι αυτή η πολιτική εκχώρησης χρονοθυρίδων είναι προσωρινή και μόνο μία χρονοθυρίδα (η πρώτη που εκχωρήθηκε) είναι εγγυημένη στα τερματικά δεδομένων για τα επόμενα πλαίσια. Αν η χρήση του πλαισίου από την φωνή στο επόμενο πλαίσιο ξεπεράσει το δεδομένο όριο, ο σταθμός βάσης αφαιρεί αμέσως όλες τις χρονοθυρίδες από τα τερματικά δεδομένων, εκτός από την πρώτη. Αν, αντίθετα, συνεχίζει να υφίσταται μια κατάσταση χαμηλού φορτίου, το τερματικό δεδομένων διατηρεί στο επόμενο πλαίσιο όσες από τις χρονοθυρίδες που είχε δεσμεύσει στο προηγούμενο πλαίσιο χρειάζεται ακόμα για να μεταδώσει τα υπόλοιπα πακέτα του μηνύματός του.

Δύο είναι οι παράμετροι του μηχανισμού χαμηλού φορτίου: η επιλογή του ορίου χαμηλής χρήσης του πλαισίου από την φωνή και του μέγιστου αριθμού χρονοθυρίδων που μπορούν να εκχωρηθούν σε τερματικά δεδομένων μέσα σε ένα πλαίσιο πρέπει να γίνει προσεκτικά, έτσι ώστε ακόμα και στην περίπτωση της χαμηλής χρήσης του πλαισίου από την φωνή, θα παραμένουν αρκετές χρονοθυρίδες πληροφορίας ελεύθερες στο τρέχον πλαίσιο για πιθανή χρήση τους από τα τερματικά φωνής ως ER χρονοθυρίδες. Πιο συγκεκριμένα, οι παραπάνω επιλογές μας θα πρέπει να βασισθούν στον συνδυασμό δύο παραγόντων:

- α. Το μέσο μέγεθος μηνύματος δεδομένων (σύμφωνα με το μοντέλο της κίνησης δεδομένων).
- β. Την χωρητικότητα του καναλιού.

Οι επιλογές μας για τις δύο παραμέτρους του μηχανισμού χαμηλού φορτίου στο ασύρματο κανάλι που εξετάζουμε θα εξηγηθούν αναλυτικά στην ενότητα 3.3.

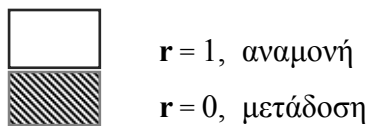
3.1.4 Πρωτόκολλα Μετάδοσης

3.1.4.1 Τερματικά Δεδομένων

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 [37]. 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 (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5), όπου σε μια δεδομένη μίνι-χρονοθυρίδα αίτησης για τερματικά δεδομένων το κάτω κελί περιλαμβάνει τα τερματικά που μεταδίδουν, και το πάνω κελί τα τερματικά που περιμένουν χωρίς να μεταδίδουν. Αν το σύνολο των τερματικών στο κάτω κελί είναι μεγαλύτερο του ενός, τότε τα τερματικά αυτά χωρίζονται πιθανοτικά σε δύο υποσύνολα (με ίση πιθανότητα), εκ των οποίων το ένα υποσύνολο παραμένει στο κάτω κελί και μεταδίδει ενώ το άλλο υποσύνολο πηγαίνει στο επάνω κελί, ενωμένο με τα τερματικά που περίμεναν.

Το τέλος του ανταγωνισμού των τερματικών για τις μίνι-χρονοθυρίδες αιτήσεων ορίζεται μοναδικά από την εμφάνιση δύο συνεχόμενων μη-συγκρούσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες για αλγορίθμους τύπου παραθύρου για την επίλυση συγκρούσεων υπάρχουν στα [26, 38].



Σχήμα 5. Οπτικοποίηση του αλγορίθμου *two-cell stack*.

3.1.4.2 Τερματικά Φωνής

Χρησιμοποιούμε και πάλι τον αλγόριθμο *two-cell stack*, εξαιτίας της απλότητας που εμφανίζει στην λειτουργία του, της σταθερότητάς του και της σχετικά υψηλής απόδοσής του σε σύγκριση με τον αλγόριθμο PRMA (Aloha) ([39]) και με αλγορίθμους που μοιάζουν με τον PRMA, όπως αυτοί που παρουσιάζονται στα [31, 34, 40]. Το πρωτόκολλο αυτό διαφέρει από τον *two-cell stack* που χρησιμοποιείται για τα τερματικά δεδομένων στο 3.1.4.1, στο ότι ένα σύνολο από

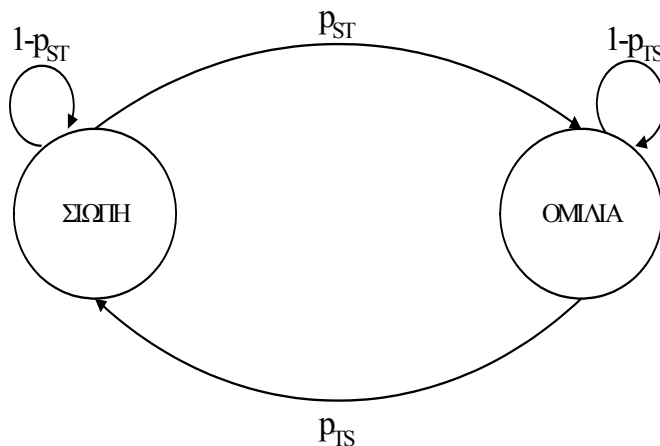
τερματικά φωνής που ανταγωνίζονται χωρίζεται πιθανοτικά σε δύο ισοπίθανα υποσύνολα στην αρχή του κάθε πλαισίου, πριν δηλαδή από την αρχή του ανταγωνισμού για την φωνή (η επιλογή αυτή έχει αποδειχθεί μέσω προσομοιώσεων να οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στον μέγιστο αριθμό τερματικών φωνής που μπορούν να εισέλθουν στο σύστημα).

Μόνο ένα από αυτά τα υποσύνολα μεταδίδεται στην πρώτη μίνι-χρονοθυρίδα για τις αιτήσεις φωνής. Το τέλος του ανταγωνισμού των τερματικών φωνής ορίζεται και πάλι μοναδικά από την εμφάνιση δύο συνεχόμενων μη-συγκρούσεων.

3.1.5 Μοντέλο για την Κίνηση Φωνής

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

1. Τα τερματικά φωνής είναι εφοδιασμένα με έναν ανιχνευτή δραστηριότητας φωνής [29,41]. 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 6.



Σχήμα 6. Το Μαρκοβιανό μοντέλο για την δραστηριότητα των πηγών φωνής.

2. Ο αριθμός των ενεργών τερματικών φωνής, N , στο σύστημα θεωρείται σταθερός για την περίοδο που μας ενδιαφέρει. Αυτή η υπόθεση γίνεται επειδή οι αλλαγές στον αριθμό των

κλήσεων στο σύστημα συνήθως γίνονται σε χρόνους της τάξης των δεκάδων δευτερόλεπτων, ενώ η διάρκεια του πλαισίου είναι της τάξης των δεκάδων ms [42].

3. 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.

4. Το όριο για την καθυστέρηση ενός πακέτου φωνής είναι ίσο με την χρονική διάρκεια δύο πλαισίων (δηλαδή είναι ίσο με 24 ms).

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

6. 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.

3.1.6 Μοντέλο για την Κίνηση Δεδομένων

Χρησιμοποιούμε ένα μοντέλο για την κίνηση δεδομένων που βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα χρήσης email από Πανεπιστήμιο της Φινλανδίας. Τα δεδομένα συνέλεξε το FUNET (Finish University and Research Network) [43]. 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 δεδομένων βρέθηκε ότι μπορεί να περιγραφεί από την κατανομή *Cauchy* (0.8,1). Ο χρόνος ανάμεσα στις αφίξεις πακέτων στο μοντέλο του FUNET είναι εκθετικά κατανεμημένος.

3.2 Παράμετροι του Συστήματος

Η μελέτη της απόδοσης του MAC πρωτοκόλλου μας γίνεται 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 300000 frames να μην είναι αρχικά όλα τα τερματικά ανενεργά).

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 μικρό, ενώ τα κέρδη από την κατάτμηση των χρονοθυρίδων σε μίνι-χρονοθυρίδες και την πολιτική κρατήσεων είναι μεγάλα).

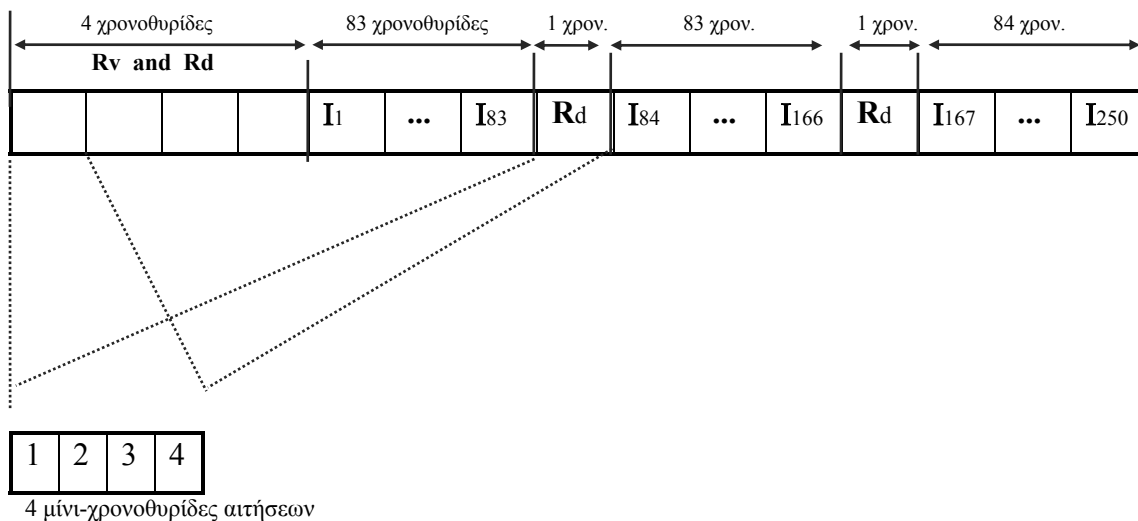
Οι πρώτες τέσσερις χρονοθυρίδες του πλαισίου αποτελούν το πρώτο κομμάτι αιτήσεων. Τα τερματικά φωνής έχουν απόλυτη προτεραιότητα πρόσβασης μέσα στις μίνι-χρονοθυρίδες αυτού του κομματιού αιτήσεων, και τα τερματικά δεδομένων αποκτούν πρόσβαση σε αυτές. Οι άλλες δύο χρονοθυρίδες αιτήσεων, οι οποίες είναι αποκλειστικά αφιερωμένες στα κομμάτια αιτήσεων δεδομένων είναι οι χρονοθυρίδες 88 και 172 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 κατανεμημένες μέσα στο πλαίσιο.

Πρέπει να σημειωθούν τα εξής:

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.

Όλα τα κομμάτια αιτήσεων φωνής βρίσκονται στην αρχή του πλαισίου, λόγω της υπόθεσης 3 του μοντέλου φωνής που χρησιμοποιούμε.

Από την προσομοίωση του μοντέλου δεδομένων προκύπτει ότι τα μηνύματα δεδομένων περιλαμβάνουν κατά μέσο όρο περίπου 78 πακέτα. Αυτό σημαίνει ότι το μέσο μέγεθος μηνύματος δεδομένων είναι ίσο με περίπου 30 Kbits.



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

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 (5 header)
Όριο καθυστέρησης πακέτου φωνής (ms)	24
Μέση διάρκεια ομιλίας (sec)	1.41
Μέση διάρκεια σιωπής (sec)	1.78
Μέγιστη ανεκτή πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής	0.01

Πίνακας 1. Πειραματικές παράμετροι του συστήματος

3.3 Αποτελέσματα και Αξιολόγησή τους

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των εκτενών προσομοιώσεων του συστήματος μας, και θα γίνει σύγκρισή του με ένα άλλο αποδοτικό πρωτόκολλο της βιβλιογραφίας, το VDI-HCC (Voice-Data Integration in a High Capacity Channel) [35], [44], δύο από τις ιδέες του οποίου έχουμε χρησιμοποιήσει στο δικό μας πρωτόκολλο (στο εξής θα αναφερόμαστε στο πρωτόκολλό μας ως VDI-AVP, Voice-Data Integration with Absolute Voice Priority).

3.3.1 Σύγκριση για πολυπλεξία φωνής

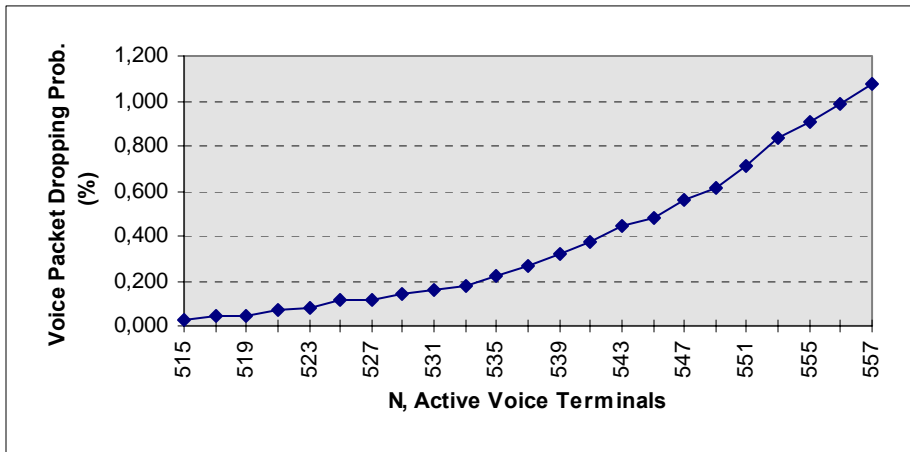
Οι διαφορές ανάμεσα στο VDI-AVP και στο VDI-HCC εστιάζουν στις περιπτώσεις όπου υπάρχει πολυπλεξία φωνής και δεδομένων, όπου και θα δείξουμε τα σημεία στα οποία το πρωτόκολλό μας υπερτερεί. Όταν στο σύστημα είναι παρούσα μόνο κίνηση φωνής, τα δύο πρωτόκολλα επιτυγχάνουν εξίσου καλά αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, η κατάλληλη χρήση ενός μικρού μόνο ποσοστού του εύρους ζώνης ως κομμάτι αιτήσεων, σε συνδυασμό με την χρήση των ER χρονοθυρίδων και με την υψηλή ταχύτητα του καναλιού οδηγούν τα δύο πρωτόκολλα στην επίτευξη ενός σχεδόν ιδανικού κέρδους πολυπλεξίας. Η μέγιστη χωρητικότητα σε τερματικά φωνής έφθασε τα 556 τερματικά, που αντιστοιχεί σε κέρδος πολυπλεξίας φωνής ίσο με $\frac{556}{256} = 2.17$.

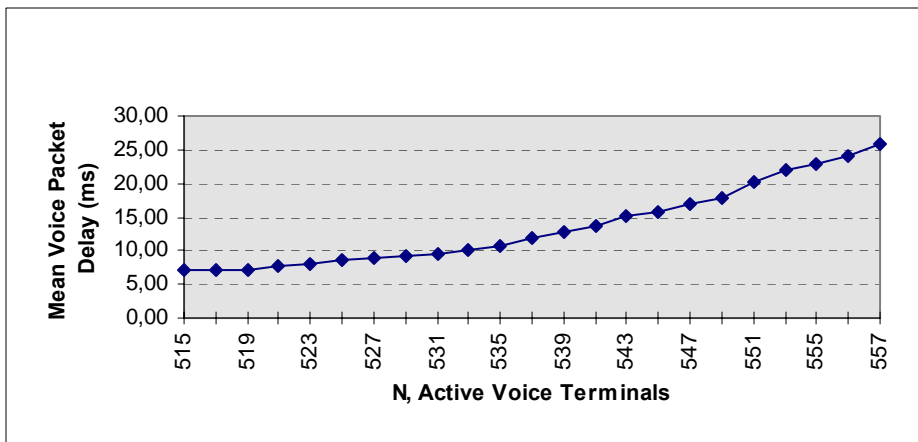
Με βάση τις παραμέτρους για την μέση διάρκεια σιωπής και την μέση διάρκεια ομιλίας ενός τερματικού φωνής (όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1), το ιδανικό (και αδύνατον να επιτευχθεί στην πράξη) κέρδος πολυπλεξίας υπολογίζεται ως $\{(1.41+1.78) / 1.41\} = 2.26$.

Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο από το εξαιρετικά υψηλό κέρδος πολυπλεξίας του πρωτοκόλλου μας, η μέγιστη χρησιμοποίηση (throughput) του εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού είναι πολύ υψηλή, φθάνοντας τα 243.5 πακέτα/πλαίσιο, που αντιστοιχούν σε χρήση του 97.4% των χρονοθυρίδων πληροφορίας του καναλιού και σε 95.1% του συνολικού εύρους ζώνης του καναλιού (αν συνυπολογισθεί και το εύρος ζώνης που είναι αφιερωμένο για τις αιτήσεις).

Στα Σχήματα 8 και 9 παρουσιάζουμε, αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής (voice packet dropping probability, P_{drop}) και για την μέση καθυστέρηση πρόσβασης στο σύστημα (δηλαδή μετάδοσης) των πακέτων φωνής.



Σχήμα 8. Πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής σε σχέση με τον αριθμό των τερματικών φωνής στο σύστημα.



Σχήμα 9. Μέση καθυστέρηση πρόσβασης πακέτων φωνής σε σχέση με τον αριθμό των τερματικών φωνής στο σύστημα.

3.3.2 Σύγκριση για πολυπλεξία φωνής και δεδομένων

Με την τροποποίηση της ιδέας του [36], όπως έχουμε εξηγήσει στην ενότητα 3.1.2, ενισχύεται έντονα η προτεραιότητα της κίνησης φωνής στο σύστημα. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι η κίνηση φωνής έχει αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά στην μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση των πακέτων της, όπως και στο ποσοστό των πακέτων φωνής που μπορούν να απωλεσθούν. Αντίθετα, η κίνηση δεδομένων αφορά αποστολή e-mails, γεγονός που σημαίνει ότι η καθυστέρηση στην μετάδοση του μηνύματος μπορεί να είναι ακόμα και της τάξης αρκετών δευτερολέπτων, χωρίς να πέφτει η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας στους χρήστες δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, στα αποτελέσματα που εξάγουμε για διάφορους συνδυασμούς κίνησης φωνής και δεδομένων δεν θέτουμε άνω όριο στην καθυστέρηση των μηνυμάτων δεδομένων (Data Message Delay, DmD). Ως κριτήριο για να μπορεί να εξυπηρετηθεί ένας συνδυασμός κίνησης φωνής και δεδομένων από το σύστημα θέτουμε μονάχα να είναι το **Pdrop<1%** για τα πακέτα φωνής. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, παρά την έλλειψη ορίου για την καθυστέρηση των μηνυμάτων δεδομένων, ακόμα και στις πιο ακραίες περιπτώσεις η καθυστέρηση δεν ξεπερνάει τα 30 sec (συνήθως είναι πολύ μικρότερη), που είναι ένας χρόνος αποδεκτός για καθυστέρηση αποστολής email.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, πως το μοντέλο κίνησης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στο [44] δεν είναι το ίδιο με το δικό μας. Στο [44], οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων των μηνυμάτων δεδομένων είναι εκθετικά κατανεμημένα, όπως και στο δικό μας μοντέλο, όμως το μέγεθός τους είναι γεωμετρικά κατανεμημένο με μέσο μέγεθος μηνύματος ίσο με 8 πακέτα (δηλαδή ίσο με το ένα δέκατο του μέσου μεγέθους μηνύματος στο δικό μας μοντέλο). Για να γίνει δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα στο VDI-AVP και στο VDI-HCC, *προσομοιώσαμε το VDI-HCC χρησιμοποιώντας το δικό μας μοντέλο κίνησης δεδομένων*. Ουσιαστικά το VDI-HCC διαφέρει από το πρωτόκολλό μας στο ότι δίνει την δυνατότητα στους χρήστες δεδομένων να κρατήσουν την χρονοθυρίδα στην οποία μεταδίδουν μέχρι να μεταδώσουν όλα τα πακέτα του μηνύματός τους.

Στον Πίνακα 2 υπολογίζουμε τον μέγιστο αριθμό τερματικών φωνής που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα ώστε **Pdrop<1%**, μεταβάλλοντας την παράμετρο M. Από την

σύγκριση των αποτελεσμάτων του VDI-AVP με το VDI-HCC για διάφορες τιμές του λ (μηνύματα/πλαίσιο) γίνεται φανερό ότι, ενώ η αύξηση της καθυστέρησης στην μετάδοση των μηνυμάτων δεδομένων δεν ξεπερνάει τα 16 sec για M μεγαλύτερο ή ίσο του 32, η αύξηση στον αριθμό των υποστηριζόμενων τερματικών φωνής είναι εντυπωσιακή, φθάνοντας μέχρι και τα 51 τερματικά ($\lambda=0.5$, $M=32$). Ο λόγος που εξετάζουμε και την περίπτωση $M=80$, τόσο στα αποτελέσματα του Πίνακα 2 όσο και στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι ότι η κατανομή Cauchy που δίνει το μέγεθος των μηνυμάτων των χρηστών δεδομένων είναι ιδιαίτερα εκρηκτική και συχνά δίνει μηνύματα πολύ μεγαλύτερα από τον μέσο όρο των 78 πακέτων.

Δεν έχουμε συμπεριλάβει στον πίνακα αποτελέσματα για τιμές του M μικρότερες του 16, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η αυστηρότητα του μηχανισμού οδηγούσε σε ιδιαίτερα μεγάλες καθυστερήσεις μετάδοσης των μηνυμάτων των χρηστών δεδομένων.

	M=16		M=32		M=48		M=64		M=80		VDI-HCC	
λ (m/fr)	V.T.	Dmd (ms)	V.T.	Dmd (ms)	V.T.	Dmd (ms)	V.T.	Dmd (ms)	V.T.	Dmd (ms)	V.T.	Dmd (ms)
0,01	554	1389	554	1467	554	1352	554	1350	554	1248	553	1184
0,05	552	1843	551	1633	550	1486	549	1357	549	1359	547	1219
0,1	550	3151	547	2054	544	1608	543	1598	543	1526	539	1264
0,2	549	22505	542	16207	535	5200	532	2655	531	2213	524	1521
0,3	549	23829	542	18761	535	15624	529	13551	525	11312	511	2447
0,4	549	23729	542	19279	535	16151	529	14238	524	12808	497	3972
0,5	549	23840	542	19224	535	16181	529	14193	524	13073	491	6835

Πίνακας 2. Μέγιστος αριθμός τερματικών φωνής που υποστηρίζει το σύστημα και μέση καθυστέρηση μηνύματος δεδομένων σαν συνάρτηση του ρυθμού άφιξης μηνυμάτων δεδομένων, M μεταβλητό.

Στη συνέχεια, επιδιώξαμε να συγκρίνουμε το VDI-AVP με το VDI-HCC σε συνθήκες μέγιστου φόρτου. Έτσι, εξετάσαμε τη συμπεριφορά των δύο συστημάτων για 430 τερματικά φωνής και $\lambda=0,75$ (μηνύματα/πλαίσιο), (η ύπαρξη 430 τερματικών φωνής στο σύστημα σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο, $430 \cdot 1.41 / (1.41 + 1.78) = 190$ τερματικά φωνής θα βρίσκονται σε ομιλία, αν στον αριθμό αυτό προστεθούν και τα $0.75 \cdot 80 = 60$ πακέτα δεδομένων που κατά μέσο όρο θα πρέπει να εξυπηρετηθούν, το άθροισμα που προκύπτει είναι ίσο με 250, ίσο δηλαδή με τον αριθμό όλων των χρονοθυρίδων πληροφορίας που υπάρχουν στο πλαίσιο).

Παρατηρούμε ότι όσο το M αυξάνει, αυξάνει και η καθυστέρηση πρόσβασης ενός μηνύματος δεδομένων στο κανάλι (Data Access Delay, DaD), ο χρόνος δηλαδή που χρειάζεται από την στιγμή που το τερματικό δεδομένων επιχειρεί να μεταδώσει μέχρι την μετάδοση του πρώτου πακέτου του μηνυματός του. Ο λόγος που *το DaD είναι μικρότερο όσο πιο μικρό είναι το M* (όσο δηλαδή «αυστηρότερο» είναι το σύστημα με τους χρήστες δεδομένων) είναι ότι είναι πιο εύκολο για ένα τερματικό φωνής που επιτυγχάνει στον ανταγωνισμό του πακέτου αίτησής του να βρει ελεύθερη χρονοθυρίδα και να εισέλθει στο κανάλι όταν το M είναι μικρό, αφού οι υπόλοιποι χρήστες δεδομένων που βρίσκονται ήδη στο κανάλι υποχρεώνονται να αφήσουν τις χρονοθυρίδες τους σε σύντομα τακτά χρονικά διαστήματα. Την ίδια συμπεριφορά με το DaD έχει και το Pdrop, το οποίο μειώνεται όσο μειώνεται το M , καθώς η αυστηρότητα απέναντι στους χρήστες δεδομένων οδηγεί σε μεγαλύτερη ευκολία πρόσβασης των τερματικών φωνής στο κανάλι. Αντίθετα, η ίδια διαδικασία αναγκαστικής επαναλαμβανόμενης εγκατάλειψης της χρονοθυρίδας τους από τα τερματικά δεδομένων οδηγεί το DmD σε αύξηση όταν ελαττώνεται το M , όπως έχουμε δει και στον Πίνακα 2. Η σύγκριση με τα αποτελέσματα του VDI-HCC φανερώνει πως το DaD του VDI-AVP παραμένει μικρότερο από το DaD του VDI-AVP για όλες τις τιμές του M , όπως συμβαίνει και για το Pdrop (στην περίπτωση του Pdrop η μείωση είναι εντυπωσιακή). Επίσης, η αύξηση του DmD στο πρωτόκολλό μας σε σχέση με το VDI-HCC είναι μικρή, της τάξης του ενός με δύο δευτερόλεπτα.

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	2027	1970	1954	1932	1921	1823
Dad (ms)	223	368	481	552	612	886
Pdrop %	0,012	0,042	0,078	0,11	0,138	0,317

Πίνακας 3. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=430 και λ 0.75 (μηνύματα/πλαίσιο).

Αντίστοιχες μετρήσεις για την συμπεριφορά του συστήματος σε μέγιστο φόρτο παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-8. Σε όλες τις περιπτώσεις ισχύουν τα σχόλια που έγιναν στον Πίνακα 3, ενώ πρέπει να σημειωθεί ιδιαίτερα ότι στον Πίνακα 4 φαίνεται πως το VDI-HCC όχι μόνο παρουσιάζει εμφανώς χειρότερα αποτελέσματα, αλλά δεν μπορεί καν να εξυπηρετήσει το συγκεκριμένο φορτίο κίνησης, αφού το $P_{drop} > 1\%$.

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	2624	2484	2372	2356	2242	2220
Dad (ms)	473	528	605	668	730	1277
Pdrop %	0,228	0,425	0,558	0,663	0,747	1,133

Πίνακας 4. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=520 και λ =0.25(μηνύματα/πλαίσιο).

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	2342	2279	2263	2253	2240	2237
Dad (ms)	299	480	595	828	874	1302
Pdrop %	0,042	0,122	0,196	0,268	0,321	0,611

Πίνακας 5. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=475 και λ =0.5(μηνύματα/πλαίσιο).

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	1635	1605	1591	1574	1562	1533
Dad (ms)	115	219	291	331	388	597
Pdrop %	0,004	0,014	0,031	0,045	0,06	0,169

Πίνακας 6. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=384 και $\lambda=1$ (μηνύματα/πλαίσιο).

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	1427	1395	1379	1367	1338	1324
Dad (ms)	108	140	197	227	269	389
Pdrop %	0,001	0,005	0,012	0,02	0,029	0,091

Πίνακας 7. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=339 και $\lambda=1.25$ (μηνύματα/πλαίσιο).

	M=16	M=32	M=48	M=64	M=80	VDI-HCC
Dmd (ms)	1268	1257	1241	1220	1217	1198
Dad (ms)	116	127	144	160	176	263
Pdrop %	0,001	0,002	0,005	0,009	0,013	0,052

Πίνακας 8. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες μέγιστου φόρτου, με αριθμό τερματικών φωνής=294 και $\lambda=1.5$ (μηνύματα/πλαίσιο).

Στην συνέχεια, εξετάσαμε την περίπτωση όπου το σύστημα δουλεύει με σχετικά χαμηλό φορτίο φωνής, και ενεργοποιείται ο μηχανισμός χαμηλού φορτίου του πρωτοκόλλου μας ώστε να μπορέσουν οι χρήστες δεδομένων να εκμεταλλευτούν τις ελεύθερες χρονοθυρίδες του πλαισίου για να μεταδώσουν πιο γρήγορα τα μηνύματά τους.

Όπως αναφέραμε και στην ενότητα 3.1.2, δύο είναι οι παράμετροι του μηχανισμού χαμηλού φορτίου: η επιλογή του ορίου χαμηλής χρήσης του πλαισίου από την φωνή και του μέγιστου αριθμού χρονοθυρίδων που μπορούν να εκχωρηθούν σε τερματικά δεδομένων μέσα σε ένα πλαίσιο. Στον μηχανισμό μας, επιλέξαμε τον μέγιστο αριθμό χρονοθυρίδων ίσο με 39 (ίσο δηλαδή με το ήμισυ του μέσου μεγέθους μηνύματος

δεδομένων, άρα ένας χρήστης δεδομένων μπορεί σε συνθήκες χαμηλού φορτίου του καναλιού να στείλει το μήνυμά του μέσα στην διάρκεια δύο πλαισίων κατά μέσο όρο). Επίσης, επιλέξαμε δύο διαφορετικά όρια χαμηλής χρήσης του πλαισίου, ώστε να συγκρίνουμε τις επιπτώσεις της μεταβολής του ορίου πάνω στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας τόσο των χρηστών φωνής όσο και των χρηστών δεδομένων: τα όρια ήταν το 96% και το 98% των χρονοθυρίδων πληροφορίας του πλαισίου, δηλαδή εξετάσαμε τις περιπτώσεις όπου λιγότερες από 240 ή 245 χρονοθυρίδες του πλαισίου είναι κατά μέσο όρο κατειλημμένες, αντίστοιχα.

Όπως γίνεται αντιληπτό, στην περίπτωση της εφαρμογής του μηχανισμού χαμηλού φορτίου, ο μηχανισμός M block δεν έχει νόημα εφαρμογής, αφού η φιλοσοφία του είναι η ενίσχυση της προτεραιότητας της κίνησης φωνής, κάτι που στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχει ανάγκη να γίνει. Ο υπολογισμός όμως για την χρήση του πλαισίου από τα τερματικά φωνής, με βάση τον λόγο που έχει οριστεί στην ενότητα 3.1.2, γίνεται σε κάθε πλαίσιο, αμέσως μετά το τέλος του πρώτου κομματιού αιτήσεων. Σε περίπτωση που το όριο (96% ή 98% στις μετρήσεις μας) ξεπεραστεί (πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη κίνηση φωνής, απλά έτυχε σε κάποια πλαίσια να περάσουν περισσότεροι του αναμενόμενου μέσου όρου χρήστες φωνής σε σιωπή), τότε αυτομάτως ενεργοποιείται ξανά ο μηχανισμός M block.

Αυτές οι οριακές περιπτώσεις είναι σπάνιες, γι' αυτό το λόγο στις συγκρίσεις που γίνονται στους παρακάτω πίνακες εμφανίζουμε μία τιμή για το VDI-AVP, αυτήν που αντιστοιχεί στο $M=48$. Πρέπει όμως να τονίσουμε ότι στην περίπτωση που εξεταζόταν στο σύστημά μας η ύπαρξη handover, η πιθανότητα μεγάλων μεταβολών στην χρήση του καναλιού θα αυξανόταν σημαντικά, οπότε η ύπαρξη του μηχανισμού M block σε συνδυασμό με τον μηχανισμό χαμηλού φορτίου κρίνεται σχεδιαστικά αναγκαία.

Οι συγκρίσεις με το VDI-HCC στους Πίνακες 9 και 10 δείχνουν πως, σε συνθήκες χαμηλού φορτίου:

1. αν δεν εφαρμοστεί ο μηχανισμός χαμηλού φορτίου, οι διαφορές ανάμεσα στα δύο πρωτόκολλα όσον αφορά στην καθυστέρηση μετάδοσης των μηνυμάτων δεδομένων είναι της τάξης των λίγων msec. Αυτό σημαίνει πως τα τερματικά δεδομένων, λόγω της ύπαρξης αρκετών ελεύθερων χρονοθυρίδων στο πλαίσιο, χάνουν λόγω του M block την

χρονοθυρίδα τους μόνο για ένα ή δύο πλαίσια, και επανέρχονται αμέσως μετά για να μεταδώσουν τα υπόλοιπα πακέτα τους και να τελειώσουν την μετάδοση του μηνύματός τους.

2.αν, για να διευκολυνθούν οι χρήστες δεδομένων, εφαρμοστεί ο μηχανισμός χαμηλού φορτίου, οι διαφορές (λόγω της σπάνιας εφαρμογής του M) είναι ελάχιστες, γεγονός που αποδεικνύει για μία ακόμη φορά πως το πρωτόκολλό μας, παρ' όλο που εξασφαλίζει ιδιαίτερα ευνοϊκή μεταχείριση στην κίνηση φωνής, εξυπηρετεί πολύ ικανοποιητικά και την κίνηση δεδομένων.

3. και στα δύο πρωτόκολλα, η μείωση του DmD με την χρήση του μηχανισμού χαμηλού φορτίου είναι δραματική.

		VDI-AVP	VDI-HCC
$\lambda=0,1$	Dmd (ms)	945	928
	Low load		
	Dmd (ms)	24,6	24
$\lambda=0,5$	Dmd (ms)	939	924
	Low load		
	Dmd (ms)	42	41
$\lambda=1$	Dmd (ms)	943	935
	Low load		
	Dmd (ms)	138	136

Πίνακας 9. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, με αριθμό τερματικών φωνής ίσο με 300 και όριο χαμηλής χρήσης πλαισίου=98%. Για το VDI-AVP, M=48.

$\lambda=0,1$		VDI-AVP	VDI-HCC
	Dmd (ms)	952	941
	Low load		
	Dmd (ms)	32,1	32
$\lambda=0,5$	Dmd (ms)	946	931
	Low load		
	Dmd (ms)	142,7	142

Πίνακας 10. Σύγκριση των δύο συστημάτων σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, με αριθμό τερματικών φωνής ίσο με 400 και όριο χαμηλής χρήσης πλαισίου 98%. Για το VDI-AVP, M=48.

Στον Πίνακα 11 συγκρίνουμε τον μηχανισμό χαμηλού φορτίου με βάση την μέση καθυστέρηση μετάδοσης μηνύματος για τιμές ορίων χαμηλής χρήσης πλαισίου 96% και 98%. Αν και οι διαφορές είναι πολύ μικρές (οι τιμές για το VDI-AVP έχουν ληφθεί και πάλι για M=48), παρατηρούμε ξανά πως το VDI-HCC υπερέχει ελάχιστα του VDI-AVP. Επίσης παρατηρούμε πως η επιλογή του ορίου να είναι ίσο με 96% είναι συντηρητική - δεν υπάρχει ανάγκη για τόσες ER χρονοθυρίδες ώστε να την δικαιολογεί, όπως φανερώνει το μικρότερο DmD που λαμβάνουμε για όριο ίσο με 98%, και στα δύο πρωτόκολλα.

$\lambda=0,1$		VDI-AVP	VDI-HCC
	96% low load		
	Dmd (ms)	24,5	24,4
	98 % low load		
	Dmd (ms)	24,2	24

Πίνακας 11. Σύγκριση των δύο συστημάτων για διαφορετικά όρια χαμηλής χρήσης πλαισίου, με αριθμό τερματικών φωνής ίσο με 300 και $\lambda=0.1$ μηνύματα/πλαίσιο.

Τέλος, θα προχωρήσουμε σε μια επί των ιδεών σύγκριση του πρωτοκόλλου μας με το BRTDMA [36], από το οποίο λάβαμε αρχικά την ιδέα για τον μηχανισμό του block των M χρονοθυρίδων. Η άμεση σύγκριση των δύο πρωτοκόλλων δεν είναι δυνατή, για τρεις λόγους:

1. Το ασύρματο κανάλι που εξετάζεται στο [36] είναι πολύ πιο αργό από το κανάλι που εξετάζουμε στο δικό μας πρωτόκολλο (1 Mbps έναντι 9.045 Mbps).
2. Στο BRTDMA εξετάζεται το φαινόμενο της σύλληψης σήματος (capture), κάτι το οποίο δεν γίνεται στο δικό μας πρωτόκολλο.
3. Στο BRTDMA, το MAC πρωτόκολλο ακολουθεί την λογική του PRMA αλγόριθμου. Δεν αφιερώνει κάποιο κομμάτι του εύρους ζώνης για αιτήσεις, θεωρεί πως όλες οι χρονοθυρίδες είναι χρονοθυρίδες πληροφορίας και επιτρέπει τον ανταγωνισμό μεταξύ τερματικών φωνής και δεδομένων για πρόσβαση στις χρονοθυρίδες του καναλιού, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα (μεγαλύτερη πιθανότητα επαναμετάδοσης σε περίπτωση συγκρούσεων) στους χρήστες φωνής.

Η σύγκριση ανάμεσα στα δύο πρωτόκολλα φανερώνει τα εξής μειονεκτήματα του BRTDMA σε σχέση με το VDI-AVP:

- α. Η χρήση του PRMA αλγορίθμου, ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος λιγότερο αποδοτικός από τον αλγόριθμο two-cell stack που χρησιμοποιείται στο VDI-AVP. Ο αλγόριθμος PRMA είναι ένας αλγόριθμος για την επίλυση των συγκρούσεων ανάμεσα στα τερματικά φωνής και δεδομένων, ο οποίος βασίζεται στην λογική του πρωτοκόλλου Aloha. Κατ' αντιστοιχία προς το Aloha, εμφανίζει αστάθεια για υψηλό φόρτο κίνησης και επιτυγχάνει χαμηλότερες αποδόσεις (throughputs) από τους αλγορίθμους τύπου δέντρου και στοίβας [27].
- β. Το δεύτερο μειονέκτημα είναι η απουσία χρονοθυρίδων για αιτήσεις, η σημασία των οποίων αναπτύχθηκε νωρίτερα.
- γ. Το τρίτο μειονέκτημα είναι ότι ο BRTDMA δεν παρέχει μηχανισμό χαμηλού φορτίου, γεγονός που οδηγεί σε υπο-χρησιμοποίηση του πλαισίου όταν η κίνηση φωνής είναι χαμηλή στο πλαίσιο, κι ενώ θα μπορούσαν οι ελεύθερες χρονοθυρίδες του πλαισίου να εκχωρηθούν στους χρήστες δεδομένων για την ταχύτερη εξυπηρέτησή τους.
- δ. Το τέταρτο και σημαντικότερο μειονέκτημα του BRTDMA είναι ότι, χρησιμοποιώντας απλώς μια μεγαλύτερη πιθανότητα επαναμετάδοσης στους χρήστες φωνής σε σχέση με τους χρήστες δεδομένων, δεν παρέχει απόλυτη προτεραιότητα στους χρήστες φωνής και οδηγεί σε πιθανές συγκρούσεις μεταξύ των χρηστών φωνής και δεδομένων, κάτι το οποίο

αποφεύγουμε εντελώς με την πολιτική των ξεχωριστών κρατήσεων για φωνή και δεδομένα που εφαρμόζουμε στο σχήμα VDI-AVP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας ασχοληθήκαμε με την σχεδίαση ενός αποδοτικού πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης για την ολοκλήρωση κίνησης φωνής και δεδομένων πάνω από ένα ασύρματο κανάλι μεγάλης ταχύτητας. *Οι στόχοι* της σχεδίασης περιελάμβαναν την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος (εκμετάλλευση του μέγιστου δυνατού ποσοστού του εύρου ζώνης του καναλιού) και την ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων των χρηστών φωνής και δεδομένων για την ποιότητα της παρεχόμενης προς αυτούς υπηρεσίας (πιθανότητα απώλειας πακέτων φωνής, μέση καθυστέρηση πακέτων φωνής, μέση καθυστέρηση πρόσβασης στο σύστημα των μηνυμάτων δεδομένων, μέση καθυστέρηση μετάδοσης μηνύματος δεδομένων). Η επίτευξη των παραπάνω στόχων είναι περίπλοκη λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού και λόγω των αντικρουόμενων μεταξύ τους φύσεων της κίνησης φωνής και της κίνησης δεδομένων. Παρόλ' αυτά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου μας μέσω εκτενών προσομοιώσεων δείχνουν πως το πρωτόκολλο επιτυγχάνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις συνδυασμού κινήσεων.

Αυτό επετεύχθη χάρη στην τροποποίηση και τον κατάλληλο συνδυασμό ιδεών που παρουσιάστηκαν στο πρόσφατο παρελθόν σε γνωστά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης της βιβλιογραφίας ([35], [36], [44]).

Η ιδέα που παρουσιάστηκε στο [36] και τροποποιήθηκε στην εργασία αυτή για τις ανάγκες του πρωτοκόλλου μας είναι η εκχώρηση ενός block από M χρονοθυρίδες στα τερματικά δεδομένων που αποκτούν πρόσβαση στο κανάλι, ώστε να μεταδώσουν αντίστοιχα M πακέτα του μηνύματός τους. Για την μετάδοση των υπόλοιπων πακέτων του μηνύματος του το τερματικό δεδομένων οφείλει να μπει ξανά στην διαδικασία ανταγωνισμού ώστε να αποκτήσει χρονοθυρίδα, γεγονός που θα του εξασφαλίσει ένα ακόμα block από M χρονοθυρίδες.

Οι ιδέες που υιοθετούμε από τα [35], [44] είναι το *μοίρασμα ορισμένων χρονοθυρίδων αιτήσεων από τα τερματικά φωνής και τα τερματικά δεδομένων με προτεραιότητα στην*

φωνή, και η χρήση ενός απολύτως δυναμικού μηχανισμού χαμηλού φορτίου για να αποφευχθούν άσκοπες καθυστερήσεις στα μηνύματα δεδομένων και να αυξηθεί η εκμετάλλευση του εύρους ζώνης του ασύρματου καναλιού.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω προσομοιώσεων, το πρωτόκολλό μας φαίνεται να επιτυγχάνει σχεδόν ιδανικά αποτελέσματα πολυπλεξίας όταν πολυπλέκονται μονάχα πηγές φωνής. Επίσης, επιτυγχάνει ιδιαίτερα υψηλή χρησιμοποίηση του ασύρματου καναλιού (υψηλότερη από τα πρωτόκολλα [35], [44] βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και επί της αρχής καλύτερη σε σύγκριση με το πρωτόκολλο [36]) όταν πολυπλέκονται κινήσεις φωνής και δεδομένων, εξασφαλίζοντας την μέγιστη προτεραιότητα των τερματικών φωνής και, παράλληλα, την ικανοποιητική εξυπηρέτηση των τερματικών δεδομένων, για όλους τους συνδυασμούς κίνησης φωνής και δεδομένων που εξετάστηκαν.

Τέλος, όσον αφορά στην πιθανή μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο, αξίζει να σημειωθεί πως η δουλειά μας μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει:

α. Ολοκλήρωση κίνησης βίντεο από traces ταινιών και videoconferencing, μαζί με κίνηση φωνής και δεδομένων. Ο μηχανισμός δέσμευσης χρονοθυρίδων για την φωνή και τα δεδομένα θα είναι ανάλογος με αυτόν που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία, ενώ ο μηχανισμός δέσμευσης χρονοθυρίδων για τους διάφορους τύπους κίνησης βίντεο θα εξαρτάται από τις απαιτήσεις τους, τόσο σε εύρος ζώνης όσο και σε ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας.

β. Επιπλέον μελέτη του συστήματός μας κάτω από διαφορετικές συνθήκες και υποθέσεις, όπως π.χ. καθυστερημένη ανάδραση από τον σταθμό βάσης προς τα τερματικά φωνής και δεδομένων, ύπαρξη σφαλμάτων μετάδοσης, ύπαρξη handover λόγω κινητικότητας των χρηστών, κ.λ.π..

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ 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, 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, 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, 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-I*, October 1992.
13. V. O. K. Li, 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, 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, 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. 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.
23. 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.
24. 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.
25. F. A. Tobagi, "Multiaccess Link Control", *Computer Network Architectures and Protocols*, P.E. Green, Jr. ed., New York: Plenum Press, 1982.
26. D. Bertsekas, R. Gallager, "Data Networks", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
27. 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.
28. D. Raychaudhuri et al, "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.
29. X. Wu et al., "Dynamic Slot Allocation Multiple Access Protocol for Wireless ATM Networks", in *Proceedings of the IEEE ICC '97*, Montreal, Canada, June 1997.
30. C.-S. Chang et al., "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.

31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. P. Koutsakis and M. Paterakis, "Near-Optimal Voice-Data Integration over Third Generation Medium and High Capacity Wireless TDMA Channels", in *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference 1999 (WCNC '99)*, New Orleans, USA.
36. J. Y. Khan, Y. Li, "Block Reservation Time Division Multiple Access (BRTDMA) Protocol for a High Capacity Wireless Network", *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 7, No. 4, 2000.
37. M. Paterakis, L. Georgiadis, P. Papantoni-Kazakos, "A Full Sensing Window RA Algorithm for Networks with Strict Delay Constraints", *Algorithmica*, Vol. 4, 1989, pp.313-328.
38. R. Rom, M. Sidi, "Multiple Access Protocols: Performance and Analysis", *Springer Verlag*, 1990.
39. 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.
40. W.C. Wong, D. J. Goodman, "A Packet Reservation Multiple Access Protocol for Integrated Speech and Data Transmission", *IEE Proceedings-I*, Vol. 139, Dec. 1992, pp.607-612.
41. P. T. Brady, "A Technique for Investigating On-Off Patterns of Speech", *Bell Sys. Tech. Journal*, Jan. 1965.
42. T. Suda, T. Bradley, "Packetized voice/data integrated transmission on a token passing ring local area network", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-37, No. 3, pp. 238-244, 1989.

43. 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.*
44. P. Koutsakis and M. Paterakis, "Highly Efficient Voice-Data Integration over Medium and High Capacity Wireless TDMA Channels ", *ACM/Baltzer Wireless Networks Journal*, Vol. 7, No.1, pp. 43-54, 2001.