

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΑΘΗΝΩΝ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
εισ. 81307  
Αρ.  
παξ.



## ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

### ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

«Ανάλυση απόδοσης του προτύπου IEEE 802.16 για εφαρμογές μετάδοσης  
πακέτων φωνής, σε καταστάσεις υψηλού φόρτου»

Παπαντωνάκος Εμμανουήλ

Επιβλέπων: Ξυλωμένος Γιώργος

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2007



## Περίληψη

Η μεγάλη επιτυχία των κυψελωδών δικτύων επικοινωνίας από τις αρχές του 1990, μας έχει δώσει σήμερα τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης νέας γενιάς. Μέσα στα πλαίσια αυτών των εξελίξεων, ένα νέο πρότυπο επικοινωνίας το IEEE 802.16, έρχεται να προσφέρει ασύρματη πρόσβαση, με πολύ υψηλές ταχύτητες, σε μεγάλες αποστάσεις και μάλιστα με πολύ μικρό κόστος υλοποίησης. Ωστόσο, με δεδομένη την κυριαρχία του DSL και του cable σε Ευρώπη και Αμερική αντίστοιχα, πολύ είναι αυτοί που αναθέτουν έναν συμπληρωματικό ρόλο σε αυτή τη νέα τεχνολογία. Πράγματι, ο μόνος τρόπος για το WiMax να κερδίσει μεριδιού αγοράς από τις κυριαρχες τεχνολογίες και να τις ανταγωνιστεί απευθείας, είναι να μπορέσει να διαφοροποιηθεί.

Αυτό το νέο πρότυπο επικοινωνίας, έχει το μεγάλο πλεονέκτημα να διαθέτει εξορισμού μηχανισμούς παροχής ποιότητας υπηρεσιών, κάτι που αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα παρεμφερών τεχνολογιών κυρίως λόγω του κόστους υλοποίησης τους. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έχουμε ως στόχο, αφενός να μελετήσουμε διεξοδικά αυτό το πολύ ενδιαφέρον πρότυπο επικοινωνίας και έτσι να διακρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του και αφετέρου να εξετάσουμε την απόδοση των μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσιών.

Με λίγα λόγια, ο βασικός στόχος μας είναι να αναλύσουμε και να αξιολογήσουμε την απόδοση του προτύπου WiMax, όταν διαχειρίζεται ροές δεδομένων από μια ανέκαθεν δημοφιλέστατη εφαρμογή όπως αυτή της μετάδοση φωνής πάνω από IP δίκτυα (VoIP), υπό καταστάσεις υψηλού φόρτου. Ο λόγος που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε εφαρμογές τύπου VoIP, είναι ότι είναι πολύ απαιτητικές σε παραμέτρους όπως καθυστέρηση και διακύμανση καθυστέρησης. Δηλαδή, αυτό που θέλουμε να ελέγξουμε είναι αν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις μιας τέτοιας εφαρμογής, όταν υπάρχει υψηλή συμφόρηση στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να πάρουμε και μια ιδέα της απόδοσης της ποιότητας υπηρεσιών στο WiMax.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	4
1.1 Πρότυπα και ιστορία .....	6
1.2 WiMax και παροχή υπηρεσιών .....	9
2. WiMax και επιχειρηματικές ευκαιρίες .....	11
2.1 Αγορές για το WiMax .....	16
2.2 Παρούσα κατάσταση του WiMax .....	19
3. Τεχνολογικά ζητήματα .....	20
3.1 Το φυσικό επίπεδο .....	22
3.2 Το MAC επίπεδο .....	30
3.3 Radio Link Control .....	35
3.4 QoS και Bandwidth Requests .....	39
3.5 Εισαγωγή στο δίκτυο .....	43
3.6 Θέματα ασφάλειας στο IEEE 802.16 .....	46
4. Απόδοση WiMax .....	47
4.1 Επιλογή λογισμικού .....	49
4.2 Δημιουργία VoIP στο NDSL Module .....	51
4.3 Προκλήσεις σχετικά με το NDSL Module .....	52
4.4 Σενάρια Πειραμάτων .....	55
4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	57
4.5.1 Παράμετροι Προσομοίωσης .....	57
4.5.2 Αποτελέσματα .....	58
4.6 Επίλογος .....	63
5. Αναφορές και Παραπομές .....	65

## 1. Εισαγωγή

Η μεγάλη επιτυχία των κυψελωδών δίκτυων τις τελευταίες δεκαετίες σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αποστολής δεδομένων μέσω αυτών, έστω και σε χαμηλές ταχύτητες, αποτέλεσε μια ισχυρή ένδειξη ότι τα ασύρματα δίκτυα είναι σε θέση έστω και μελλοντικά να προσφέρουν μια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα του τελευταίου μιλίου (*last mile problem*). Στη συνέχεια με τη δημιουργία των Wi-Fi δίκτυων, φάνηκε ότι είμαστε πιο κοντά στην επίλυση του προβλήματος.

Με τις πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας και πιο συγκεκριμένα με τη δημιουργία νέων και τη βελτίωση υφιστάμενων πρωτοκόλλων για έλεγχο πρόσβασής στο μέσο (MAC protocols), τη βελτίωση αλγορίθμων κωδικοποίησης, τη δημιουργία νέων τεχνικών για τη μείωση της πολυοδικής εξασθένισης (multipath propagation delay), είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε ασύρματα δίκτυα που επιτυγχάνουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, συγκρινόμενη με τα κυψελωτά δίκτυα.

Το πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας 802.16 του ινστιτούτου ηλεκτρονικών και ηλεκτρολόγων μηχανικών (IEEE), λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραπάνω σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις και έτσι όχι μόνο αντιμετωπίζει με επιτυχία του πρόβλημα του τελευταίου μιλίου, αλλά επιπλέον προσφέρει ευρυζωνικές ταχύτητες πρόσβασης σε επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες διατηρώντας συγχρόνως την ασφάλεια πρόσβασης σε πολύ υψηλό επίπεδο. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα και σε κινητούς χρήστες να απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες πρόσβασης ακόμα και κατά τη διάρκεια μετακίνησης τους.

Η κεντρική αποστολή της ομάδας εργασίας 802.16 της IEEE είναι να καθορίσει το μονοπάτι μετανάστευσης για ένα σύνολο από ασύρματες διεπαφές έτσι ώστε χρησιμοποιώντας ένα και μόνο κοινό MAC πρωτόκολλο, να επιτύχει ασύρματη επικοινωνία, ανεξάρτητα από το πιο φυσικό επίπεδο (physical layer) χρησιμοποιείται. Εδώ θα πρέπει να προσθέσουμε ότι ένα από τα σημαντικά προβλήματα στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η ανομοιογένης κατανομή του φάσματος παγκοσμίως, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα συμβατότητας τεχνολογιών ανά χώρα. Το IEEE 802.16 θέλει, λοιπόν να συστεγάσει περισσότερα από ένα physical layers που μπορεί να διατίθενται υπό ένα και μοναδικό κοινό MAC πρωτόκολλο. Έτσι δημιουργήσε το πρότυπο 802.16 που καθορίζει τη διεπαφή για ασύρματη επικοινωνία σε δίκτυα μητροπολιτικής έκτασης (Wireless MAN). Το νέο αυτό πρότυπο είναι επίσης γνωστό και ως WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

Η αρχιτεκτονική του IEEE 802.16 αποτελείται από δύο βασικές οντότητες: τον σταθμό βάσης (Base Station, BS) και τον σταθμό εγγεγραμμένου (Subscriber Station, SS). Ο BS είναι η κεντρική μονάδα του πρωτοκόλλου που διαχειρίζεται όλα τα αιτήματα των SS για αρχική πρόσβαση στο δίκτυο, για δημιουργία συνεδριάσεων (sessions), για την παροχή συγκεκριμένου τύπου υπηρεσιών όπως και το ότι είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση των δεδομένων σε άλλο BS ή στο κεντρικό δίκτυο του παροχέα (backbone), αλλά και για τον χρονοπρογραμματισμό της μετάδοσης των δεδομένων (scheduling). Ο SS είναι ουσιαστικά ο πληρεξούσιος του χρήστη ο οποίος αναλαμβάνει, επικοινωνώντας με τον BS, που αντιπροσωπεύει το δίκτυο, να μεταφράσει και να προωθήσει τα αιτήματά του. Ένας SS μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλούς χρήστες και με κατάλληλους μηχανισμούς να αντιστοιχίζει τα αιτήματα και τις αποκρίσεις από το BS σε κάθε χρήστη. Συνεπώς η ακολουθία ενός αιτήματος από έναν χρήστη είναι η εξής: αρχικά ο χρήστης προωθεί το αίτημά του στον SS μέσω της διεπαφής χρήστη-SS, στη συνέχεια ο SS μετατρέπει κατάλληλα το αίτημά έτσι ώστε να είναι εφικτή η επικοινωνία με τον BS και τέλος το αίτημα αποστέλλεται στον BS. Εάν το αίτημα είναι αποδεκτό αποστέλλεται θετική απάντηση στον SS, διαφορετικά αρνητική. Τέλος ο SS ελέγχει ποιόν χρήστη αφορά η απάντηση και προωθεί το μήνυμα.

## 1.1 Πρότυπα και ιστορία

	<b>802.16</b>	<b>802.16a / 802.16b / 802.16c</b>	<b>802.16e</b>
<b>Completion Date</b>	Dec 2001	Jan 2003/Jun 2004	Dec 2005
<b>Spectrum</b>	10-66GHz	2-11GHz	<6GHz
<b>Type of Spectrum</b>	Unlicensed	Un & licensed	Licensed
<b>Bit Rate</b>	32-134Mbps	75 Mbps max 20MHz channelization	5 Mbps max 5MHz channelization
<b>Modulation</b>	SC QPSK 16QAM 64QAM	256 OFDM QPSK 16QAM 64QAM	Same as 802.16a
<b>Mobility</b>	No support	No support	Pedestrian mobility
<b>Channel Bandwidths</b>	20, 25, 28 MHz	Selectable between 1.25-20MHz	Same as 802.16a
<b>Coverage</b>	8 Km	50 Km	5 Km

**Πίνακας 1.1:** Συνοπτική παρουσίαση των υποπροτύπων που έχουν δημιουργηθεί κατά καιρούς από την IEEE. Παρατίθενται τα βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά, όπως και άλλα στοιχεία σε σχέση με την κάλυψη και τις ταχύτητες πρόσβασης.

Οι εργασίες της ομάδας 802.16 ξεκίνησαν τον Αύγουστο του 1998 σε μια συγκέντρωση που οργανώθηκε από τον οργανισμό εθνικών ασύρματων ηλεκτρονικών συστημάτων (N-WEST) του αμερικάνικου εθνικού ινστιτούτου προτύπων και τεχνολογίας. Η IEEE εκτίμησε αυτή την προσπάθεια και τον Ιούλιο του 1999 συστήθηκε η ομάδα εργασίας 802.16. Το αρχικό ενδιαφέρον της ομάδας εργασίας ήταν στο μη-αδειοτημένο εύρος των 10-66GHz, με την μετάδοση να απαιτεί οπτική επαφή (Line-of-Sight, LOS). Ο λόγος της απαίτησης για οπτική επαφή είναι ότι σε αυτές τις συχνότητες, δε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις ιδιότητες της γίγηνης ατμόσφαιρας ώστε να μεταδοθεί πληροφορία αρκετά μακριά. Άρα επόμενο είναι να απαιτείται οπτική επαφή. Μέχρι τον Δεκέμβριο του 2001, ολοκληρώθηκε το πρώτο πρότυπο της ομάδας, το 802.16. Το πρότυπο αυτό προορίζόταν αποκλειστικά για χρήστες επιχειρηματικής προέλευσης και όχι για οικιακούς, κυρίως λόγω του ότι χρειαζόταν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (δηλ. μεταξύ SS και BS).

Παρότι υπήρχε διαθέσιμο φάσμα παγκοσμίως μεταξύ των 10-66GHz στο οποίο λειτουργούσε το 802.16, το πρότυπο απέτυχε να αποκτήσει σημαντική απήχηση: οι περισσότεροι κατασκευαστές δεν ήθελαν να εγκαταλείψουν τα υπάρχοντα συστήματα τους και να επενδύσουν στη δημιουργία συστημάτων σε υψηλές

συχνότητες λειτουργίας βασισμένα στο πρότυπο 802.16. Το αποτέλεσμα ήταν, πολύ σύντομα το ενδιαφέρον της ομάδας εργασίας 802.16, να επικεντρωθεί σε πιο χαμηλές συχνότητες. Έτσι τον Ιανουάριο του 2003 δημιουργήθηκε το πρότυπο 802.16a και τον Ιούνιο του 2004 το διορθωμένο ως προς κάποια σημεία 802.16d (σήμερα γνωστό και ως 802.16-2004). Και τα δύο πρότυπα, είναι τεχνολογίες τύπου σημείο-προς-σημεία (point-to-multipoint) όπως ήταν και το πρώτο, αλλά η βασική διαφορά είναι ότι λειτουργούσαν σε χαμηλότερες συχνότητες της τάξεως των 2-11GHz. Μια άλλη πολύ σημαντική διαφορά ως προς τον προκάτοχό τους 802.16, ήταν ότι δεν απαιτούσαν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη ώστε να γίνει η μετάδοση. Έτσι τα 802.16a και 802.16d, απευθύνονταν πιο άμεσα προς τους οικιακούς χρήστες, με συνέπεια να δοθεί ένα επιπλέον κίνητρο στους κατασκευαστές να δημιουργήσουν εξοπλισμό συμβατό με το 802.16.

Η όλη επιτυχία των 802.16a και 802.16d, όπως και η στροφή του ενδιαφέροντος της ομάδας της IEEE σε τεχνολογίες πιο άμεσες προς τον τελικό χρήστη και ιδιαίτερα προς τον οικιακό, την οδήγησε στη δημιουργία του 802.16e τον Δεκέμβριο του 2005. Το 802.16e είναι επίσης τύπου Point-to-multipoint, που λειτουργεί χωρίς της απαίτηση για LOS (NLOS τεχνολογία). Λειτουργεί σε ακόμα χαμηλότερες συχνότητες και προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες για κινητικότητα. Έτσι το 802.16e δίνει τη δυνατότητα σε χρήστες μεσαίας κινητικότητας (της τάξεως των 70-80 mi/h) να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο με ταχύτητες της τάξεως των μερικών Mbps. Οπότε γίνεται εφικτό το σενάριο πρόσβασης στο δίκτυο και από κινητές συσκευές που διαθέτουν WiMax κάρτα δικτύου όπως PDAs, notebook και laptops.

Την παρούσα στιγμή (Ιούνιος 2007), η ομάδα εργασίας 802.16 ασχολείται με τη βελτίωση της τεχνολογίας, εργαζόμενη για την παραγωγή νέων προτύπων όπως τα 802.16-f/g/h/i/j/k/m.

## IEEE 802.16

Το πρώτο πρότυπο της IEEE λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες στο εύρος 10-66GHz. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται οπτική επαφή μεταξύ των SS και του BS. Εδώ οι BS μπορούν να προσφέρουν ασύρματη κάλυψη έως 8 χιλιόμετρα με ταχύτητες που φθάνουν τα 70Mbps. Σε αυτές τις συνθήκες, η διαμόρφωση που έχει επιλεγεί είναι αυτή του μοναδικού φέροντα (single-carrier modulation). Επειδή η αρχιτεκτονική είναι τύπου Point-to-multipoint, ο BS αρχικά μεταδίδει ένα σήμα πολυπλεξίας στον χρόνο (Time Division Multiplexing, TDM) και ο κάθε SS δεσμεύει σειριακά χρονικές σχισμές (time slots) για την μετάδοση.

## **IEEE 802.16a**

Το 802.16a έχει θεμελιώδεις διαφορές σε σχέση με το αρχικό πρότυπο. Οι κυριότερες διαφορές είναι ότι λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες, στο φάσμα των 2-11GHz και το ότι είναι τεχνολογία NLOS. Σε αυτές τις συχνότητες, χωρίς οπτική επαφή δημιουργούνται νέα προβλήματα όπως της πολυοδικής εξασθένισης. Έτσι νέες μέθοδοι κωδικοποίησης και διαμόρφωσης θα έπρεπε να προταθούν. Το 802.16a καθορίζει τρία διαφορετικά πρότυπα ασύρματης διεπαφής, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στους κατασκευαστές να διαφοροποιήσουν τις υπηρεσίες τους. Καθορίζονται τρεις διαφορετικές προδιαγραφές για το φυσικό επίπεδο:

- Μοναδικού φέροντα (Wireless MAN-SC)
- Ορθογώνιας πολύπλεξης συχνότητας (Wireless MAN-OFDM): στην οποία χρησιμοποιείται ορθογώνια πολύπλεξη συχνότητας με χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) 256 σημείων. Αυτή η διαμόρφωση προορίζεται για αδειοδοτημένες περιοχές φάσματος.
- Ορθογώνιας διαίρεση συχνότητας για πολλαπλή πρόσβαση (Wireless MAN-OFDMA) με FFT 2048 σημεία. Εδώ η πολλαπλή πρόσβαση παρέχεται κατευθύνοντας ένα υποσύνολο από πολλούς φέροντες σε συγκεκριμένους δέκτες.

Το 802.16a υπόσχεται ταχύτητες έως 75Mbps σε αποστάσεις που μπορούν να φθάσουν ακόμα και τα 50 χιλιόμετρα που όμως εξαρτάται από το ύψος στο οποίο βρίσκεται η κεραία, την ισχύ της μετάδοσης και τις κλιματολογικές συνθήκες.

## **IEEE 802.16d**

Έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το 802.16a με τη διαφορά ότι προστέθηκαν μερικές βελτιώσεις στο πρότυπο. Οι βελτιώσεις αυτές αναφέρονται κυρίως στην αύξηση της απόδοσης στο κανάλι για αποστολή πληροφορίας (uplink).

## **IEEE 802.16e**

Το mobile WiMax λειτουργεί σε ακόμα χαμηλότερες συχνότητες, δηλαδή κάτω από τα 6GHz. Επίσης όπως και τα 802.16a και 802.16d δεν χρειάζεται οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Μπορεί να επιτύχει ταχύτητες που φθάνουν έως τα 5Mbps σε αποστάσεις που δεν ξεπερνούν τα λίγα χιλιόμετρα.

## 1.2 WiMax και παροχή υπηρεσιών

Ένας από τους κεντρικούς στόχους του WiMax εκτός του να προσφέρει ένα ενοποιημένο πρότυπο ασύρματης μετάδοσης ανεξάρτητα από το μέσο, σε πολύ υψηλές ταχύτητες και σε μεσαία απόσταση, είναι και το να προσφέρει μηχανισμούς που μπορούν να εγγυηθούν στον χρήστη διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Μέχρι στιγμής το QoS ήταν μια υπόθεση που αφορούσε ενσύρματα δίκτυα όπως δίκτυα ασύγχρονης μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode, ATM). Το WiMax προσφέρει ανάλογες υπηρεσίες σε ασύρματο μέσο.

Οι υπηρεσίες παρέχονται από τον BS χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό του scheduler για να αποφασίσει ποια δεδομένα θα πρέπει να αποσταλούν σε κάθε χρονικό διάστημα. Έτσι, γίνεται εφικτή η παροχή των υπηρεσιών καθορίζοντας μόνο τις παραμέτρους του scheduler του BS. Το ίδιο το πρότυπο δεν καθορίζει, ούτε προτείνει την υλοποίηση του scheduler, δίνοντας έτσι την ευκαιρία στον κάθε κατασκευαστή να τον υλοποιήσει σύμφωνα με τις δικές του ανάγκες και τους δικούς του στόχους. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για επιπλέον διαφοροποίηση των υπηρεσιών.

Οι υπηρεσίες που περιγράφονται στο πρότυπο είναι οι εξής:

- **Unsolicited Grant Service (UGS):** για πακέτα πραγματικού χρόνου και σταθερού μεγέθους που μεταδίδονται σε περιοδικά διαστήματα. Είναι αντίστοιχο της T1 μετάδοσης.
- **Extended Real-time Polling Service (ertPS):** για ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου που δημιουργούν δεδομένα μεταβλητού μεγέθους σε περιοδική βάση. Αυτή η υπηρεσία είναι κατάλληλη για εφαρμογές μετάδοσης φωνής πάνω από IP δίκτυα (VoIP).
- **Real-time Polling Service (rtPS):** αντίστοιχο με το UGS, με τη διαφορά ότι τα πακέτα δεδομένων είναι μεταβλητού μεγέθους. Είναι κατάλληλη εφαρμογές video.
- **Non-real-time Polling Service (nrtPS):** για ροές δεδομένων μεταβλητού μεγέθους που είναι ανθεκτικές στην καθυστέρηση, αλλά απαιτείται ελάχιστη ταχύτητα μετάδοσης. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές τύπου FTP με εγγυημένη ταχύτητα μετάδοσης.

- **Best Effort (BE):** για ροές δεδομένες που είναι ανθεκτικές στην καθυστέρηση και δεν απαιτούν οποιαδήποτε εγγύηση στην ταχύτητα μετάδοσης. Παράδειγμα εφαρμογής είναι το HTTP.

Η διαδικασία που ακολουθείται για να ζητηθεί μια από τις παραπάνω κατηγορίες υπηρεσιών είναι: αρχικά ο SS αιτείται την παροχή μια από τις παραπάνω υπηρεσίες. Ο BS μέσω της διαδικασίας ελέγχου για αποδοχή της κλήσης (Call Admission Control, CAC) αποδέχεται ή όχι το συγκεκριμένο επίπεδο υπηρεσιών. Σε αρνητική περίπτωση, ο χρήστης μπορεί να επιλέγει μία από τις υπόλοιπες και να επιχειρήσει ξανά.

Όπως ήταν αναμενόμενο το πρότυπο έχει αφήσει ανοικτή την υλοποίηση της διαδικασίας του CAC όπως έχει κάνει και με τον scheduler στον BS.

## 2. WiMax και επιχειρηματικές ευκαιρίες

Το εντυπωσιακό με το WiMax είναι ότι προσφέρεται για πολλών ειδών εφαρμογές και για πολλών ειδών χρήσεις.

802.16a	802.16REVd	802.16e
<b>Fixed Outdoor</b>	<b>Fixed Outdoor</b>	<b>Limited Mobility</b>
<b>Applications</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• E1/T1 service for enterprises</li><li>• Backhaul for Hotspots</li><li>• Limited residential Broadband access</li></ul> <b>CPE</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• External box connected to PC with outside antenna</li></ul>	<b>Applications</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Indoor Broadband access for residential users (High Speed Internet, VoIP,...)</li></ul> <b>CPE</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• External box connected to PC with built-in antenna</li></ul>	<b>Applications</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• "Portable" Broadband access for consumers</li><li>• Always Best Connected</li></ul> <b>CPE</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• PC Card</li></ul>

**Εικόνα 2.1:** Βασικές εφαρμογές των διαφόρων υποπροτύπων της IEEE σε σχέση με το 802.16. Οι εφαρμογές είναι χωρισμένες σε σχέση με το εάν είναι εσωτερικού ενδιαφέροντος ή εξωτερικού. Επίσης, προτείνεται και ο τρόπος πρόσβασης προς το δίκτυο WiMax.

Το WiMax και γενικότερα τα wireless MAN προσφέρουν έναν εναλλακτικό τρόπο πρόσβασης από ότι τα ενσύρματα δίκτυα όπως digital subscriber line (DSL) ή το καλωδιακό (cable). Είναι γεγονός ότι τα ασύρματα δίκτυα είναι σε θέση να καλύψουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές χωρίς να απαιτείται κοστοβόρα υποδομή όπως συμβαίνει για παράδειγμα στο DSL. Είναι χαρακτηριστικό ότι σύμφωνα με έρευνες για να καλυφθεί, για παράδειγμα περιοχή 200 τετραγωνικών χιλιομέτρων, από έναν παροχέα DSL απαιτούνται πάνω από 11 εκατομμύρια δολάρια, ενώ για να καλυφθεί η ίδια περιοχή ασύρματα μόνο 450 χιλιάδες δολάρια. Το WiMax θα μπορούσε να είναι μια οικονομικά αποτελεσματική λύση σε περιοχές που η πληθυσμιακή πυκνότητα είναι μικρή και επομένως δεν είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση υποδομής, και γενικότερα σε περιοχές που η εγκατάσταση ενσύρματης υποδομής είναι αδύνατη για λόγους περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

Το WiMax στην πραγματικότητα μπορεί να παρέχει δύο διαφορετικού τύπου υπηρεσιών:

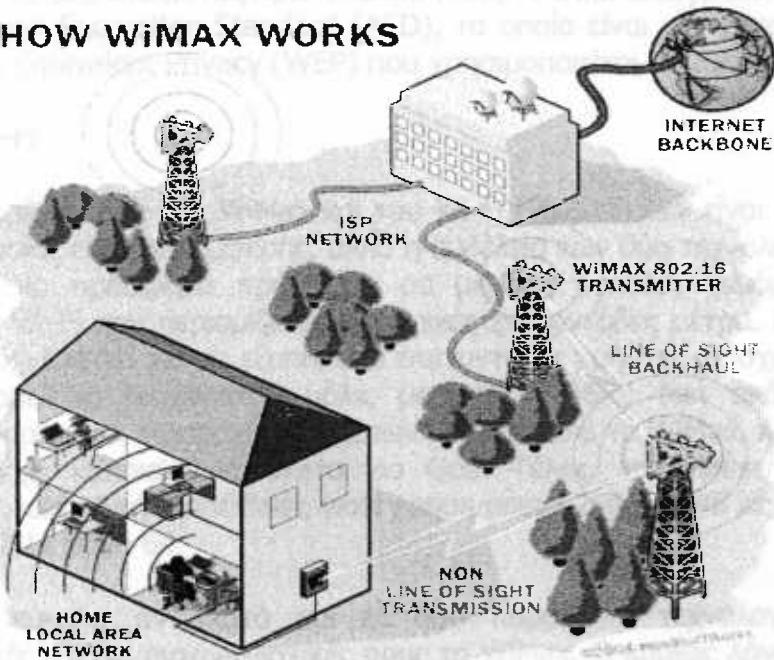
- Την NLOS υπηρεσία, όπου μια μικρή κεραία μπορεί να είναι τοποθετημένη στην κορυφή του κτιρίου του χρήστη. Στην περίπτωση αυτή, το WiMax

χρησιμοποιεί χαμηλότερες συχνότητες που είναι πιο επιρρεπής σε απώλειες και έτσι οι ρυθμοί μετάδοσης είναι μικρότεροι.

- Την NLOS υπηρεσία, στην οποία είναι τοποθετημένη σταθερή κεραία σε μεγάλο ύψος, με αποτέλεσμα τα λάθη να είναι λιγότερο συχνά και να επιτυχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης.

Με άλλα λόγια, ένα πολύ σενάριο λειτουργίας του WiMax είναι το εξής: η τεχνολογία WiMax φέρνει το δίκτυο μέσα σε ένα κτίριο και οι χρήστες εντός του κτιρίου συνδέονται σε αυτό, μέσω άλλων δικτύων όπως Ethernet ή ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless LAN). Το αποτέλεσμα είναι όλοι οι χρήστες εντός του κτιρίου να μοιράζονται την ίδια σύνδεση στο WiMax δίκτυο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την LOS τεχνολογία, διαφορετικοί BS διασυνδέονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα, είτε να επεκτείνουν την κάλυψη του δικτύου, είτε στην περίπτωση που έχουν αναλάβει να εξυπηρετούν διαφορετικές περιοχές ο καθένας τους, να αυξάνουν τη διαπερατότητα (throughput) του δικτύου. Τελικά μέσω της διασύνδεσης αυτής, τα δεδομένα φθάνουν στον παροχέα (ISP), ο οποίος μέσω του backbone δικτύου τα προωθεί στο Διαδίκτυο.

## HOW WiMAX WORKS



**Εικόνα 2.2:** Το βασικό σενάριο χρήστης του WiMax. Ο οικιακός χρήστης μέσω του SS, επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης με χρήση τεχνολογίας NLOS. Με τη σειρά του ο BS μπορεί να επικοινωνήσει με άλλον BS, συνδυάζοντας την τεχνολογία LOS, έτσι ώστε να επεκτείνει ή/και να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα φθάνουν στον ISP, ο οποίος μέσω του backbone τα παραδίδει στο Internet.

Το παραπάνω είναι ένα φιλόδοξο σενάριο, η υλοποίηση του οποίου είναι εφικτή μόνο αν είναι αρκετά προσοδοφόρα. Επομένως, είναι σημαντικό να συγκρίνουμε το WiMax με παρεμφερείς τεχνολογίες και να αποφανθούμε αν είναι ανθεκτική στο ανταγωνισμό.

## WiMax vs. WLAN

Και οι δύο αμφότερες καταφέρνουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (WiMax ~70Mbps, WLAN ~54Mbps), επίσης αυτή η ταχύτητα είναι διαμοιραζόμενη στους χρήστες. Μία από τις βασικές διαφορές είναι η εμβέλεια. Το WLAN επιτυγχάνει αυτούς τους ρυθμούς μετάδοσης μόλις μέχρι λίγες δεκάδες μέτρα, ενώ το WiMax σε δεκάδες χιλιόμετρα. Επίσης, αντιθέτως με το WLAN, το WiMax χρησιμοποιεί μηχανισμούς αίτησης για επιπλέον πόρους, γεγονός που το καθιστά πιο αποδοτικό στη διαχείριση του ασύρματου μέσου.

Μία ακόμα βασική διαφορά είναι και οι μηχανισμοί ασφάλειας της ανταλλαγής δεδομένων στο WiMax. Η συναλλαγές στο WiMax χαρακτηρίζονται από την αυθεντικοποίηση του χρήστη και του τερματικού και από την κρυπτογράφηση των δεδομένων χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως τα Data Encryption Standard (DES) ή Advanced Encryption Standard (AES), τα οποία είναι πολύ πιο ασφαλή από το Wireless Equivalent Privacy (WEP) που χρησιμοποιείται από το WLAN.

## WiMax vs. Wi-Fi

Η βασική διαφορά μεταξύ του WiMax και του Wi-Fi (802.11) δεν είναι ο ρυθμός μετάδοσης ο οποίος είναι παρεμφερής, αλλά η εμβέλεια των δύο τεχνολογιών. Το WiMax μπορεί να προσφέρει πρόσβαση σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα σε αντίθεση με το Wi-Fi που περιορίζεται σε μερικές εκατοντάδες μέτρα. Επιπλέον, το WiMax έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί εκατοντάδες χρήστες σε σχέση με το Wi-Fi που μπορεί να διαχειριστεί μόλις μερικές δεκάδες. Μία ακόμα πολύ σημαντική διαφορά είναι η παροχή υπηρεσιών που διαθέτει το WiMax. Αντιθέτως, το Wi-Fi δεν έχει κάποια δυνατότητα για QoS. Τέλος, το WiMax είναι πιο ανθεκτικό στην πολυοδική εξασθένιση γιατί χρησιμοποιεί 256 ή 2048 σημεία στον FFT, ενώ το 802.11 μόνο 64.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό και οι δύο παραπάνω τεχνολογίες είναι συμπληρωματικές και όχι ανταγωνιστικές προς το WiMax. Ο κυρίως λόγος είναι η απόσταση που τις κατατάσσει σε εσωτερικές (indoor) τεχνολογίες, ενώ το WiMax μπορεί να καταταχθεί σε τεχνολογία για εξωτερικούς σκοπούς (outdoor).

	<b>802.16REVd</b>	<b>Wi-Fi</b>	<b>Technical Difference</b>
<b>Range</b>	70 Km	<150m	<b>802.16 tolerates greater multipath, delay spread via implementation of 256 FFT vs. 64 FFT for 802.11</b>
<b>Coverage</b>	Outdoor NLOS	Optimized for indoor performance	<b>802.16 have an overall higher system gain, delivering greater penetration through obstacles</b>
<b>Scalability</b>	Designed to support hundreds of SS with hundreds of users behind each SS	Users scale from one to ten	<b>802.16 can use all available frequencies. 802.11 is limited to license exempt spectrum</b>
<b>Bit Rate</b>	5 bps/Hz peak 70 Mbps max	2.7 bps/Hz peak 54 Mbps max	<b>Higher modulations coupled with flexible error correction results in more efficient use of spectrum</b>
<b>QoS</b>	QoS built into MAC	No QoS support	<b>802.16 on demand bandwidth allocation</b>

**Πίνακας 2.1:** Συνοπτική παράθεση των διαφορών μεταξύ συγγενών τεχνολογιών μεταξύ WiMax και Wi-Fi.

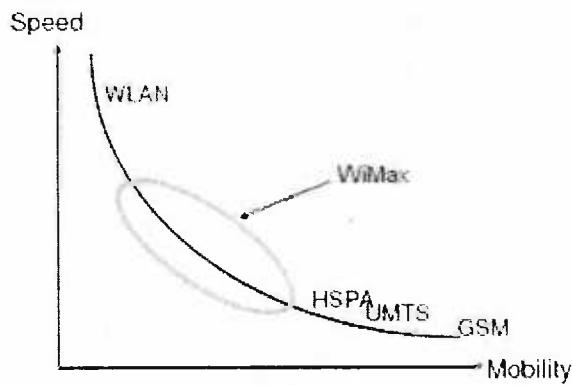
### WiMax vs. 3G

Τα κυψελωτά συστήματα τρίτης γενιάς όπως τα CDMA2000 και UMTS έχουν δημιουργηθεί για να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με μεγάλη κινητικότητα. Από την άλλη το WiMax δημιουργήθηκε με σκοπό να προσφέρει ασύρματη πρόσβαση σε υψηλές ταχύτητες αλλά ως ένα σταθερό σύστημα. Η κινητικότητα στο WiMax είναι μια επιπρόσθετη λειτουργία, η οποία προστέθηκε στο πρότυπο 802.16e. Έτσι είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με τα συστήματα 3G. Αντιθέτως με τα συστήματα 3G που έχουν σταθερό εύρος καναλιού, το WiMax δίνει την ευελιξία να επιλέξουμε εύρος μεταξύ 1.25MHz και 20MHz, γεγονός που επιτυγχάνει καλύτερη χρήση του μέσου.

Μια ακόμη διαφορά είναι ότι το WiMax είναι σε θέση να προσφέρει συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης στην αποστολή (uplink) και παραλαβή (downlink) δεδομένων σε σχέση με το 3G που κατά βάση προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς στο downlink από ότι στο uplink. Έτσι, το WiMax είναι καταλληλότερο για εφαρμογές τύπου T1. Ένα επίσης πλεονέκτημα το WiMax είναι ότι η αρχιτεκτονική του είναι

πολύ απλούστερη από το 3G και επομένως η δημιουργία ενός WiMax BS είναι αρκετά πιο οικονομική από τη δημιουργία ενός 3G BS.

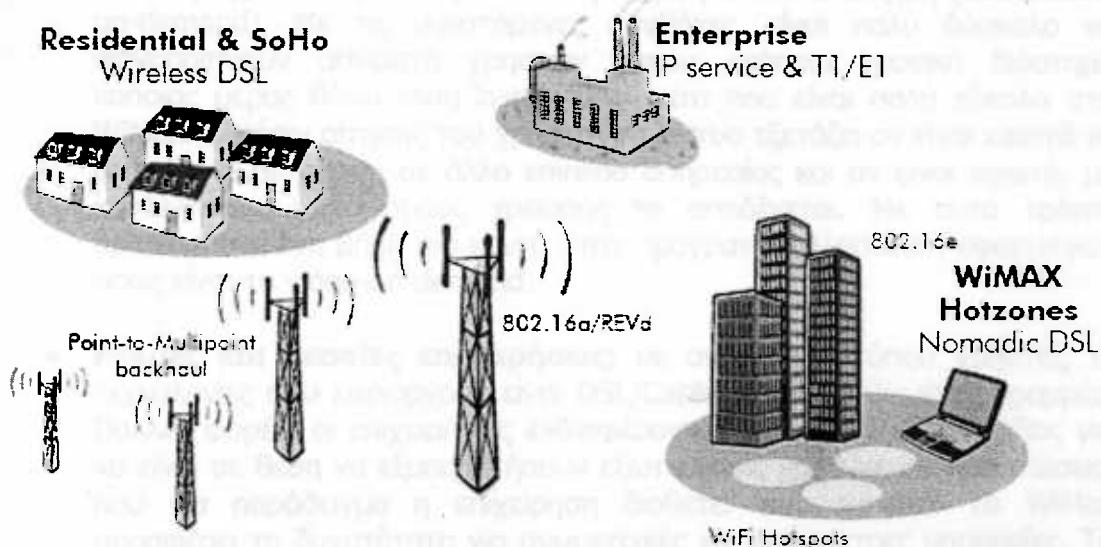
Ωστόσο, οι τεχνολογία 3G είναι σε πλήρη λειτουργία εδώ και μερικά χρόνια, και επομένως είναι λογικό να υπάρχει απροθυμία για την αντικατάσταση τους από το mobile WiMax. Επιπλέον, λόγω της προσφοράς εμπορικών προϊόντων 3G εδώ και πολλά χρόνια, έχει γίνει ήδη μεγάλη επένδυση σε εξοπλισμό και έτσι έχουν δημιουργηθεί οικονομίες κλίμακας.



**Εικόνα 2.3:** Συσχετισμός WiMax με παρεμφερείς ασύρματες τεχνολογίες: το WiMax προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης από UMTS και HSPA, αλλά επιτρέπει μικρότερη κινητικότητα.

## 2.1 Αγορές για το WiMax

Ένα μητροπολιτικό ασύρματο δίκτυο που βασίζεται στο WiMax λειτουργεί με τρόπο παρόμοιο όπως τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνίας, με τα BS να βρίσκονται σε στρατηγικά σημεία στο δίκτυο και να επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, είτε ασύρματα είτε ενσύρματα. Σε αντίθεση με τα κυψελωτά συστήματα, η τοποθεσία των BS δεν καθορίζεται από τον περιορισμό στο διαθέσιμο φάσμα, αλλά από τον περιορισμό στις ταχύτητες που θέλει να διαθέσει ένας BS στην ακτίνα που καλύπτει. Σε κάθε περίπτωση, είναι γεγονός ότι η απόσταση που καλύπτει ένας BS και η δυνατότητα για NLOS, χαρακτηρίζει το WiMax ως μια πολύ ελκυστική οικονομικά λύση που είναι σε θέση να ανταγωνιστεί πολλές από τις υπάρχουσες τεχνολογίες σε διάφορες αγορές.



**Εικόνα 2.4:** Οι διάφορες αγορές στις οποίες μπορεί να δραστηριοποιηθεί το WiMax. Η τεχνολογία μπορεί να συμμετέχει σε αγορές όπως: SOHO, μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, όπως και στην αγορά του backhaul για Hot Spots.

- Ευρυζωνική πρόσβαση σε οικιακούς και SOHO (Small Office Home Office) χρήστες:** Οι τεχνολογίες που έχουν κατακτήσει αυτή την αγορά είναι οι DSL και το καλωδιακό Internet (Cable Internet). Αυτές οι τεχνολογίες έχουν εδώ και πολλά χρόνια κυριαρχήσει σε αυτή την αγορά με αποτέλεσμα ο άμεσος ανταγωνισμός με αυτές να είναι πολύ δύσκολος. Ήδη οι ταχύτητες πρόσβασης έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Το WiMax δίνει τη δυνατότητα για έναν συμπληρωματικό τρόπο πρόσβασης σε αυτές τις αγορές σε περιπτώσεις που δεν είναι οικονομικά

προσοδοφόρο να χρησιμοποιηθούν DSL και Cable. Μια κλασική περίπτωση είναι σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές, που η πληθυσμιακή πυκνότητα δεν επιτρέπει επενδύσεις σε υποδομές DSL και Cable.

Σε περιοχές που υπάρχει κάλυψη από αυτές τις τεχνολογίες, το WiMax μπορεί να αποτελέσει λύση σε περιπτώσεις χρηστών που δεν είναι ικανοποιημένοι από τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Το WiMax έχει δημιουργηθεί περιέχοντας τη δυνατότητα παροχής QoS και έτσι είναι πιο ευέλικτο να ικανοποιήσει ανάγκες απαιτητικών χρηστών. Η πολύπλεξη με το λεγόμενο overbooking που γίνεται στις παραπάνω τεχνολογίες δεν επιτρέπει στον τελικό χρήστη να απολαμβάνει υπηρεσίες με εγγυημένους ρυθμούς μετάδοσης ή/και εγγυημένη καθυστέρηση. Το WiMax προσφέρει όπως έχουμε δει, πέντε διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών με αντίστοιχες εγγυήσεις.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα περίπτωση για το WiMax είναι το ότι μπορεί να κάνει πραγματικότητα το γνωστό ως ταχύτητα-υπό-απαίτηση (bandwidth-on-demand). Με τις υφιστάμενες συνθήκες, είναι πολύ δύσκολο να ικανοποιηθούν αιτήματα χρηστών τύπου «κάποιο χρονικό διάστημα κάποιας μέρας θέλω τόσο bandwidth» κάτι που είναι πολύ εύκολο στο WiMax. Κατόπιν αίτησης του χρήστη, το δίκτυο εξετάζει αν είναι εφικτό το αίτημα για μετάβαση σε άλλο επίπεδο υπηρεσίας και αν είναι εφικτό, με κατάλληλους μηχανισμούς χρέωσης το αποδέχεται. Με αυτό τρόπο, βρισκόμαστε ένα βήμα πιο κοντά στην πραγματική υλοποίηση εφαρμογών όπως είναι το video-on-demand.

- **Μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις:** σε αυτού του τύπου χρήστες, οι τεχνολογίες που κυριαρχούν είναι DSL/Cable και οι μισθωμένες γραμμές. Πολλές φορές, οι επιχειρήσεις ενδιαφέρονται για συμμετρικές ζεύξεις για να είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν εξωτερικούς χρήστες σε περιπτώσεις, που για παράδειγμα η επιχείρηση διαθέτει web servers. Το WiMax προσφέρει τη δυνατότητα για συμμετρικές και ασύμμετρες υπηρεσίες. Το κόστος των μισθωμένων γραμμών είναι αρκετά υψηλό, με αποτέλεσμα το WiMax να αποτελεί μια πολύ αποτελεσματικά οικονομική λύση. Επίσης, επειδή διαθέτει τα διαφορετικά επίπεδα υπηρεσιών μπορεί να εγγυηθεί την παροχή υπηρεσιών double play (τηλεφωνία και πρόσβαση) στις επιχειρήσεις, μειώνοντας έτσι εκ νέου το κόστος τους για τηλεπικοινωνίες.
- **Wi-Fi Hot Spot Backhaul:** Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια αυξάνονται ολοένα και περισσότερο οι υπηρεσίες hot spot παγκοσμίως. Σε σχολεία, πάρκα, αεροδρόμια κ.α. έχουν δημιουργηθεί στημεία όπου ο επισκέπτης μπορεί να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο από κινητές συσκευές όπως PDAs και laptop. Το WiMax αποτελεί μια πρώτης τάξεως λύση για

διασύνδεση των σημείων αυτών. Έτσι μπορεί να καλύψει το κενό μεταξύ των Wi-Fi hot spots και σε περιοχές μακριά από αυτά.



## 2.2 Παρούσα κατάσταση του WiMax

Το WiMax προβλέπεται να αποτελέσει μια πολύ καλή λύση για περιοχές που είναι δύσκολο ή/και μη προσδοφόρο να επενδύσει ένας παροχέας σε ενσύρματη υποδομή. Ωστόσο, σε περιοχές που ήδη κυριαρχούν το DSL και το Cable τα πράγματα είναι αρκετά δύσκολα. Εκεί, έχει ήδη επενδύσει σε τεχνολογία ο πάροχος με αποτέλεσμα να απολαμβάνει οικονομίες κλίμακας, γεγονός που τον καθιστά απρόθυμο να μεταβεί σε άλλη τεχνολογία. Επιπλέον, οι ταχύτητες πρόσβασης ολοένα και αυξάνονται συναντώντας όλο και περισσότερο τις ανάγκες των χρηστών. Στο μέλλον, τι στιγμή που κορεστεί η προσφορά υψηλών ταχυτήτων πρόσβασης, είναι το χρονικό σημείο στο οποίο ο ένας πάροχος θα θέλει να διαφοροποιηθεί από τον άλλο, πιθανώς παρέχοντας εγγυήσεις μετάδοσης στους χρήστες του. Είναι το σημείο, που μπορεί να κάνει την εμφάνισή του το WiMax για να προσφέρει QoS. Επιπλέον, ένα ακόμη στοιχείο για διαφοροποίηση, είναι ότι το πρότυπο από μόνο του δεν υλοποιεί αρκετά σημεία, έτσι ώστε να δίνει ένα ακόμα κίνητρο στους κατασκευαστές.

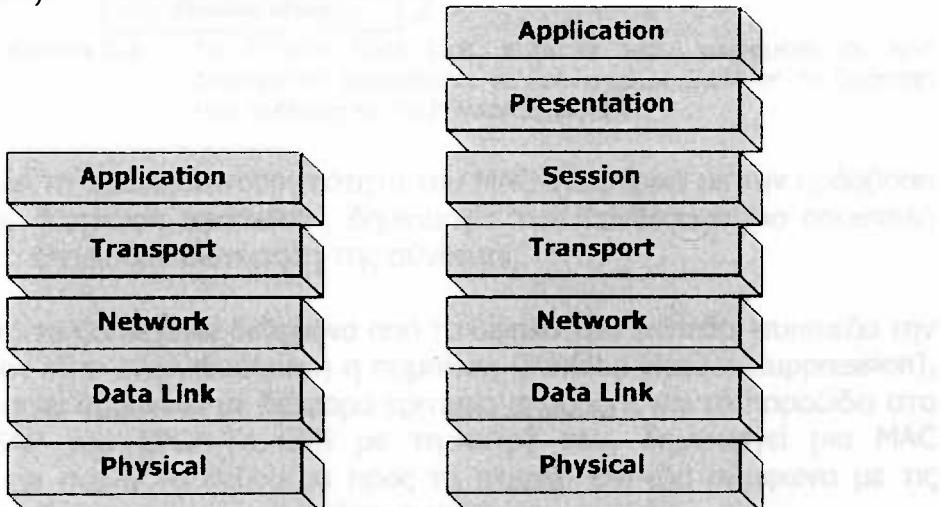
Σε κάθε περίπτωση, είναι γεγονός ότι όσο θα αυξάνονται οι παρεχόμενες υπηρεσίες (για παράδειγμα μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης) τόσο θα αυξάνονται και οι απαιτήσεις των χρηστών. Άρα είναι πιθανό κάποια στιγμή, απαιτητικές εφαρμογές όπως το video-on-demand, που έχει κάνει την εμφάνιση του κυρίως τα τελευταία χρόνια, να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των απαιτήσεων του χρήστη. Εδώ το WiMax με τα επίπεδα υπηρεσιών που μπορεί να προσφέρει, όπως το bandwidth-on-demand που εύκολα μπορεί να υλοποιήσει, πιθανώς να έχει πλεονέκτημα σε σχέση με τις υφιστάμενες τεχνολογίες.

Ωστόσο, είναι γεγονός ότι η τεχνολογία του WiMax έχει καθυστερήσει σημαντικά να εισέλθει στην αγορά και αυτό οφείλεται σε χρονικές συγκυρίες αλλά και στην αδράνεια των κατασκευαστών. Πράγματι, το χρονικό διάστημα των τελευταίων ετών χαρακτηρίζεται από την αποδέσμευση του τοπικού βρόχου (Local Loop Unbundling, LLU) στην Ευρώπη, με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να δρουν προς τις τεχνολογίες DSL/Cable. Ένας ακόμη λόγος για την καθυστέρηση αυτή είναι ότι το WiMax χρησιμοποιεί και συχνότητες φάσματος που χρειάζονται αδειοδότηση και έτσι αφενός δημιουργούνται σκέψεις στο κατά πόσο αξίζει μια τέτοια επένδυση και αφετέρου παρουσιάζονται εκ νέου καθυστερήσεις από τις διενέργειες δημοπρασιών.

### 3. Τεχνολογικά ζητήματα

Γενικότερα, το IEEE 802.16 MAC επίπεδο ενεργεί όπως ένα κλασικό MAC επίπεδο που στόχο του έχει να ελέγχει την πρόσβαση στο μέσο. Όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέσο είναι ασύρματο και έτσι θα πρέπει επιπλέον, να διαχειρίζεται αποδοτικά τους πόρους. Το IEEE 802.16 MAC χρησιμοποιεί συνδέσεις (connection oriented) ανεξάρτητα από το πιο είναι το παραπάνω επίπεδο. Έτσι κάθε SS δημιουργεί μία ή περισσότερες συνδέσεις για την επικοινωνία του με τον BS. Αυτό επιτρέπει στο WiMax να διαχειρίζεται καλύτερα τις προδιαγραφές του χρήστη σε σχέση με τις υπηρεσίες. Το IEEE 802.16 MAC έχει δημιουργηθεί με στόχο να εξυπηρετεί εκατοντάδες συνδέσεις από εκατοντάδες χρήστες και επιπλέον να ικανοποιεί τις επιλεγμένες προδιαγραφές.

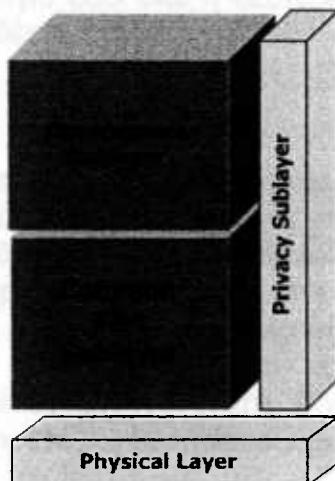
Εκτός από τον χρονοπρογραμματισμό του μέσου για την παροχή QoS, οι ενέργειες του IEEE 802.16 MAC περιλαμβάνουν λειτουργίες προσαρμογής της ζεύξης (Radio Link Control), αυτόματης επανάληψης αιτήματος (Automatic Repeat Request, ARQ) έτσι ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός λάθους (Bit Error Rate, BER).



**Εικόνα 3.1:** Αριστερά παρουσιάζεται η στοίβα του πρωτοκόλλου του Internet, ενώ στα δεξιά το μοντέλο OSI. Το IEEE 802.16 έχει δημιουργηθεί από την προτυποποίηση των επιπέδων Data Link και Physical Layer.

Το WiMax είναι ένα πρότυπο που αφορά τα κατώτερα επίπεδα της στοίβας του μοντέλου OSI ή της στοίβας του Internet. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιούνται το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link) και το φυσικό επίπεδο. Επειδή, το WiMax έχει προτυποποιηθεί για να μπορέσει να συνδέσει και να εξυπηρετήσει διαφορετικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα IP και ATM δίκτυα, έχει δημιουργήθει επιπλέον επίπεδα στο εσωτερικό του data link. Έτσι το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Media Access Control, MAC) διαιρείται σε τρία υποεπίπεδα.

Το υποεπίπεδο σύγκλισης υπηρεσιών (Service Specific Convergence Sublayer, CS) παρέχει οποιοσδήποτε μετασχηματισμό και αντιστοιχία εξωτερικών δεδομένων που λαμβάνονται από το σημείο πρόσβασης του CS (CS service access point, SAP) προερχόμενα από το επίπεδο δικτύου. Το CS τοποθετείται στην κορυφή του επιπέδου που περιέχει το κοινό κομμάτι του IEEE 802.16 MAC (Common Part Sublayer, CPS). Ουσιαστικά το CS είναι μια διεπαφή του IEEE 802.16 με τα υψηλότερα στρώματα.



**Εικόνα 3.2:** Το επίπεδο Data Link, είναι εκ νέου χωρισμένο σε τρία διαφορετικά υποεπίπεδα: το Convergence Sublayer, το Common Part Sublayer και το Privacy Syblayer.

Το CPS παρέχει τη βασική λειτουργικότητα του MAC αναφορικά με την πρόσβαση στο σύστημα, δέσμευση bandwidth, δημιουργία των συνδέσεων για αποστολή δεδομένων και έλεγχο και διατήρηση της σύνδεσης.

Πιο αναλυτικά, το CS δέχεται δεδομένα από το υψηλότερο επίπεδο, συμπιέζει την επικεφαλίδα αν είναι ενεργοποιημένη η συμπίεση (Payload Header Suppression), τα κατηγοριοποιεί σύμφωνα με διάφορα κριτήρια απόδοσης και τα παραδίδει στο κατάλληλο SAP του CPS. Το CPS με τη σειρά του, δημιουργεί μια MAC επικεφαλίδα και περνά τα δεδομένα προς το φυσικό επίπεδο σύμφωνα με τις απαιτήσεις του QoS που έχει συμφωνήσει ο χρήστης.

Επιπλέον, το τρίτο κατά σειρά επίπεδο εντός του MAC layer είναι το υπόστρωμα ασφαλείας (Privacy Sublayer) το οποίο αναλαμβάνει λειτουργίες αυθεντικοποίησης, κρυπτογράφησης και ανταλλαγή κλειδιών ασφαλείας.

### 3.1 Το φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο στο WiMax διαφοροποιείται στον τρόπο πρόσβασης στο μέσο, από την αρχική έκδοση στις επόμενες IEEE 802.16a/d. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι δύο εκδόσεις του προτύπου λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες και η μεν πρώτη είναι τεχνολογία LOS ενώ η δεύτερη δεν έχει ανάγκη για οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

#### IEEE 802.16

Στην αρχική σχεδίαση του φυσικού επιπέδου, οι συχνότητες λειτουργίας ανήκουν στο εύρος 10-66GHz, με την ανάγκη για οπτική επαφή μεταξύ SS και BS. Έτσι έχει επιλεχθεί η διαμόρφωση μοναδικού φέροντος (Wireless MAN-SC). Η αρχιτεκτονική είναι point-to-multipoint, έτσι ο BS αρχικά μεταδίδει ένα σήμα που είναι πολυπλεγμένο στο χρόνο (TDM signal) και ο κάθε SS ξεχωριστά δεσμεύει σειριακά τα slots. Η πρόσβαση στο uplink γίνεται μέσω της πολλαπλής πρόσβασης διαιρεμένου χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) στην οποία ο κάθε SS, αποστέλλει πληροφορία μόνο στα χρονικά διαστήματα που του έχουν ανατεθεί από τον BS.

Το πρότυπο έχει επιλέξει έναν ευέλικτο τρόπο για τη συνύπαρξη των καναλιών αποστολής και παραλαβής. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπει τη διαίρεση στο χρόνο (Time Division Duplexing, TDD), στην οποία το uplink και το downlink μοιράζονται το ίδιο κανάλι αλλά δεν μεταδίδουν ταυτόχρονα. Πράγματι, σε αυτή την περίπτωση συνήθως προηγούνται τα χρονικά slots για το downlink και έπονται τα slots για το uplink. Επίσης, το πρότυπο επιτρέπει και τη διαίρεση στη συχνότητα για το downlink και uplink (Frequency Division Duplexing, FDD), στην οποία το downlink και uplink λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια και θεωρητικά μεταδίδουν ταυτόχρονα.

Επίσης, υπάρχει υποστήριξη και για half-duplex FDD, στην οποία το uplink και downlink λειτουργούν σε διαφορετικά κανάλια, ωστόσο δεν μεταδίδουν και λαμβάνουν ταυτόχρονα, ώστε ο πομπός και ο δέκτης να είναι πιο απλές συσκευές. Σε κάθε περίπτωση, οι εναλλακτικές που διαθέτει το πρότυπο, προσφέρουν ευελιξία και τη δυνατότητα να χειρίζονται οι ροές δεδομένων διαφορετικά, σε περιπτώσεις που τα χαρακτηριστικά τους είναι διαφορετικά.

#### IEEE 802.16a/d

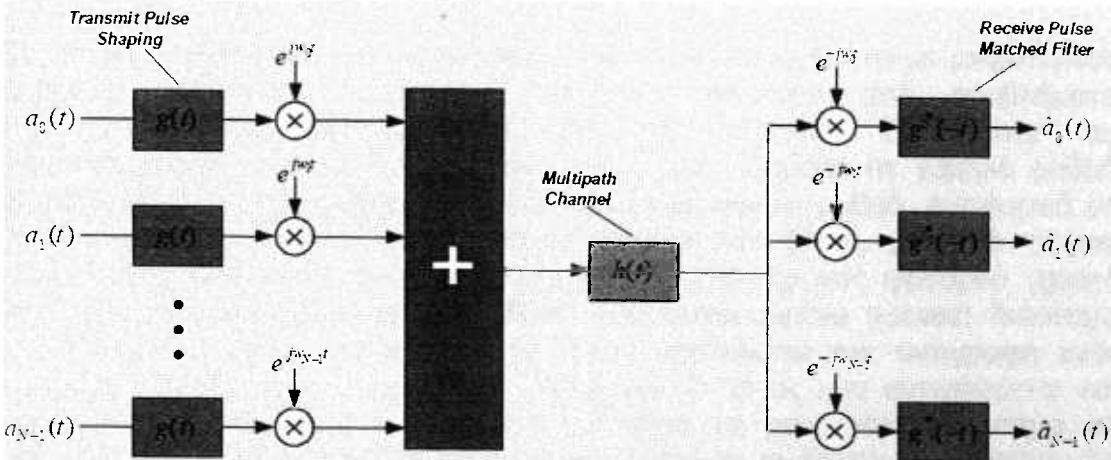
Στη συγκεκριμένη έκδοση του προτύπου, το φυσικό επίπεδο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων 2-11GHz και χωρίς την ανάγκη για οπτική επαφή. Έτσι, ενώ αρχικά οι κεραίες θα έπρεπε να είναι σε ψηλό σημείο με

οπτική επαφή, τώρα σε αυτό το πρότυπο θα μπορούσαν απλά να είναι στην οροφή ενός κτιρίου ακόμα και μέσα στο διαμέρισμα. Επόμενο είναι, να υπάρξει πολυοδική εξασθένιση που δημιουργεί σημαντικά πρόβλημα. Έτσι έχουν δημιουργηθεί τρεις διαφορετικές προδιαγραφές σε σχέση με το φυσικό επίπεδο:

- **Wireless MAN-SC:** χρησιμοποιεί διαμόρφωση μοναδικού φέροντος όπως έχει περιγραφεί.
- **Wireless MAN-OFDM:** χρησιμοποιεί πολύπλεξη με ορθογώνια διαιρεση φάσματος και με 256 σημεία στον FFT. Εδώ η πρόσβαση γίνεται χρησιμοποιώντας TDMA. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση προορίζεται για αδειοδοτημένες περιοχές φάσματος.
- **Wireless MAN-OFDMA:** χρησιμοποιεί πολλαπλή πρόσβαση με ορθογώνια διαιρεση συχνότητας και με 2048 σημεία στον FFT. Εδώ η πολλαπλή πρόσβαση είναι εφικτή απλά κατευθύνοντας ένα υποσύνολο από χρήστες σε ξεχωριστούς δέκτες.

## OFDM

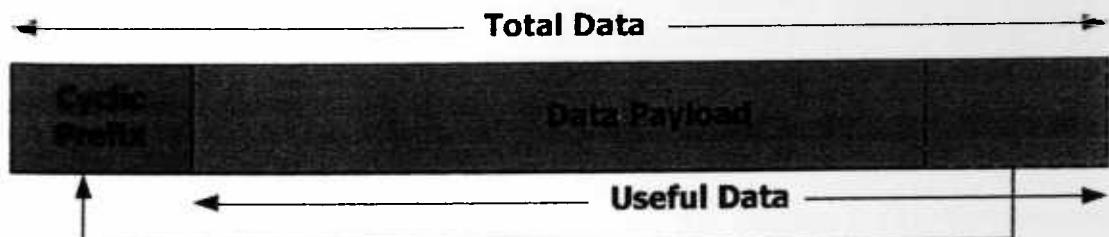
Η OFDM είναι ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών φερόντων συχνοτήτων που κωδικοποιεί δεδομένα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Αντίθετα, από τα σχήματα διαμόρφωσης με μοναδικό φέροντα όπου μόνο ένα σήμα στο χρόνο μπορεί να χρησιμοποιεί τη συχνότητα, το OFDM στέλνει πολλαπλά σήματα παράλληλα σε συχνότητες που είναι ειδικά υπολογισμένες να είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Ουσιαστικά, τα εισερχόμενα δεδομένα διαιρούνται σε πολλαπλά παράλληλα σε μικρότερες ροές δεδομένων μειωμένου ρυθμού και στη συνέχεια κάθε ροή διαμορφώνεται και μεταδίδεται ξεχωριστά ορθογώνια ως προς τις άλλες συχνότητες.



**Εικόνα 3.3:** Ο τρόπος λειτουργίας του OFDM. Κάθε σήμα που θα χρησιμοποιήσει το ίδιο κανάλι επικοινωνίας, πολλαπλασιάζετε με ορθογώνια σήματα. Στην αποκαθικοποίηση, μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier παίρνουμε το αρχικό σήμα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του OFDM είναι το επιπλέον bandwidth που αποκομίζει. Στην κλασική διαίρεση συχνότητας, το συνολικό bandwidth διαιρείται σε διάφορα υποκανάλια, τα οποία όμως περιέχονται μέσα σε διαστήματα ασφαλείας, έτσι ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές μεταξύ των υποκαναλιών. Στο OFDM επειδή οι συχνότητες των υποκαναλιών είναι κατάλληλες επιλεγμένες έτσι ώστε να είναι ορθογώνιες, αυτά τα διαστήματα ασφαλείας δεν είναι απαραίτητα και επομένως παραλείποντας τα, κερδίζουμε επιπλέον bandwidth. Επίσης, η ορθογωνιότητα επιτρέπει να υλοποιήσουμε τον κωδικοποιητή και τον ακωδικοποιητή χρησιμοποιώντας τον FFT και έτσι η επεξεργασία του σήματος να είναι ταχύτατη.

Το μεγάλο μειονέκτημα του OFDM είναι η απαιτητικότητα του για μεγάλο συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. Οποιαδήποτε έλλειψη συγχρονισμό μετατρέπει τις φερόμενες συχνότητες σε μη ορθογώνιες, δημιουργώντας το πρόβλημα γνωστό ως inter-carrier interference (ISI). Ένα από τις περιπτώσεις έλλειψης συγχρονισμού εμφανίζεται από την μετακίνηση του πομπού ή/και του δέκτη εξαιτίας του φαινόμενου Doppler. Η κατάσταση μπορεί να επιδεινωθεί σε περιπτώσεις που το φαινόμενο του multipath propagation delay είναι ισχυρό.



**Εικόνα 3.4:** Ένας από τους μηχανισμούς συγχρονισμού είναι μέσω της τεχνικής Cyclic Prefix, η οποία ουσιαστικά είναι μια αντιγραφή ενός κομματιού από το τέλος στην αρχή και έτσι μετατρέπεται ο κώδικας σε κυκλικός.

Το OFDM βασίζεται σε μια βασική παρατήρηση ότι τα σχήματα με μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης συμβόλων υποφέρουν λιγότερο από προβλήματα παρεμβολών που δημιουργούνται από το multipath. Έτσι είναι πιο αποτελεσματικό να μεταδίδουμε έναν αριθμό από σύμβολα σε χαμηλό ρυθμό παράλληλα, παρά σε μοναδική ροή δεδομένων με υψηλό ρυθμό. Αναφορικά με τη διόρθωση του συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη, μία από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις είναι η εισαγωγή ενός διαστήματος φρουρού (guard interval) μεταξύ των συμβόλων OFDM. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μεταδίδεται το cyclic prefix (CP), το οποίο αποτελείται την αντιγραφή ενός κομματιού από το τέλος του OFDM συμβόλου. Ο λόγος που αντιγράφεται και αποστέλλεται ένα κομμάτι από το τέλος είναι να μετατρέψει το σήμα σε περιοδικό το οποίο καταστείλει τις παρεμβολές από το multipath propagation. Το βασικό μειονέκτημα του CP είναι ότι δημιουργεί ένα overhead και έτσι μειώνεται το bandwidth.

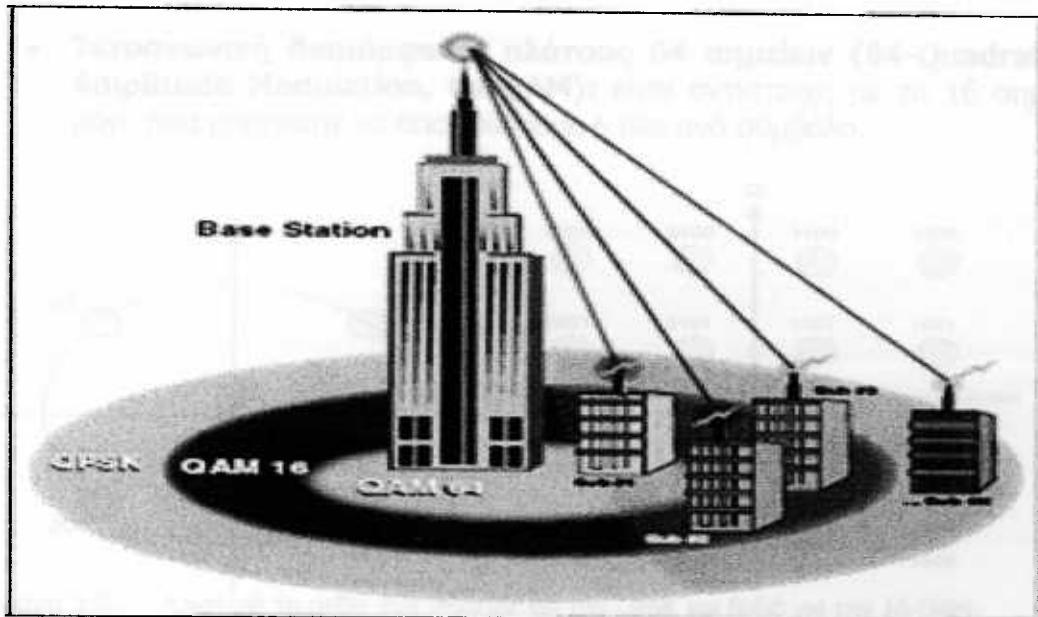
Η αποκωδικοποίηση του σήματος γίνεται χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και με τεχνικές άμεσης διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction, FEC). Η τεχνική FEC επιτρέπει στο δέκτη να διορθώσει έναν αριθμό λαθών χωρίς να ζητήσει επαναμετάδοση της πληροφορίας μιας και το μέσο είναι ασύρματο. Η τεχνική FEC, βασίζεται σε επιπλέον bits που έχουν προστεθεί ως overhead στο αρχικό μήνυμα και έτσι ο δέκτης όχι μόνο μπορεί και ανιχνεύει έναν αριθμό λαθών, αλλά μπορεί να υπολογίζει ποιο είναι το πιθανότερο μήνυμα που ήθελε να μεταδώσει ο αποστολέας.

Επειδή το σήμα που παραδίδεται στην αποστολή δεν είναι ιδανικό για την αποστολή, πρέπει να αποδέχεται διάφορες ποικιλίες λαθών, μεταξύ των οποίων οι πιο σημαντικές είναι τα στρέμματα και τα αποστολέα.

• Στρέμματα: Στρέμματα διαμορφώνονται με μετατόπιση φρέσματος (Quantization noise) κατά Μεντρού (MDS): έτσι το φρέσματος στρέμμα διατάσσεται πολλούς λαθούς στη διάσταση αλλάζοντας τη φάση του φρέσματος κάθε λαθού. Το στρέμμα που παρατηρείται χρονοποιεύνται 4 πλάσεις που αποτελούνται από θέτη 90°. Έτσι αποτυγχάνεται να απεπλένονται τα πλάσματα που δεν αποτελούνται από το φρέσματος το σύμφωνο 00, 01, 11, 10. Τα πλάσματα που δεν αποτελούνται από φρέσματος με διαφόρο φάση 90°.

• Αποστολέας: Αποστολέας πλέον 16 αποστολέας (16-QAM): έτσι το φρέσματος διατάσσεται σε 16 αποστολέα. Οι 16 αποστολές είναι τα αποτελεσματικά διαλύματα που αποτελούνται από διάφορα αλληλάστατα τη πλάσματα διαφορετικών φάσης του φρέσματος είναι συνήθως τριπλασιασμός

## Λεπτομερής ανάλυση του φυσικού επιπέδου



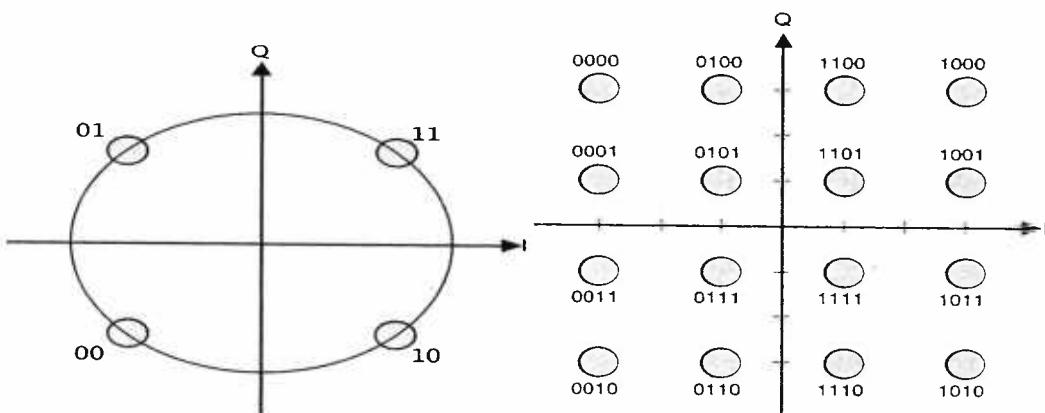
**Εικόνα 3.5:** Το μεγάλο πλεονέκτημα του WiMax σε σχέση με το φυσικό επίπεδο είναι η δυνατότητά του να μεταβαίνει από ένα burst profile σε ένα άλλο, ανάλογα με την απόσταση από τον σταθμό βάσης και από τις καιρικές συνθήκες. Κοντά στον BS, χρησιμοποιείται πιο αποδοτικό σχήμα διαμόρφωσης και έτσι απολαμβάνουμε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Διαφορετικά χρησιμοποιούμε ένα πιο ανθεκτικό στα λάθη σχήμα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του φυσικού επιπέδου στο WiMax είναι ότι τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης δεδομένων είναι προσαρμοζόμενα σύμφωνα με τις συνθήκες μετάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι η διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης μπορούν να προσαρμόζονται και να αλλάζουν για κάθε χρήστη ξεχωριστά ακόμα και σε κλίμακα χρόνου της τάξεως ενός frame. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιούνται είναι:

- **Τετραγωνική διαμόρφωση με μετατόπιση φάσματος (Quadrature Phase-Shift Keying, QPSK):** είναι το ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης που μεταλλάσσει τα δεδομένα αλλάζοντας τη φάση του φερόμενου κύματος. Συγκεκριμένα στην τετραγωνική χρησιμοποιούνται 4 φάσεις που διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $90^\circ$ . Έτσι επιτυγχάνεται να αποστέλλονται δύο bits ανά σύμβολο. Έτσι για να κωδικοποιήσουμε τα σύμβολα 00, 01, 10, 11 τα αντιστοιχίζουμε σε συνημίτονα με διαφορά φάσης  $90^\circ$ .
- **Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους 16 σημείων (16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM):** είναι το ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης που μετατρέπει τα δεδομένα αλλάζοντας το πλάτος δύο φερόντων κυμάτων. Αυτά τα δύο κύματα είναι συνήθως ημιτονοειδούς

μορφής και έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Με την 16-QAM επιτυγχάνουμε να αποστέλουμε 4 bits ανά σύμβολο.

- **Τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους 64 σημείων (64-Quadrature Amplitude Modulation, 64-QAM):** είναι αντίστοιχη με τα 16 σημεία, μόνο που μπορούμε να αποστέλουμε 6 bits ανά σύμβολο.



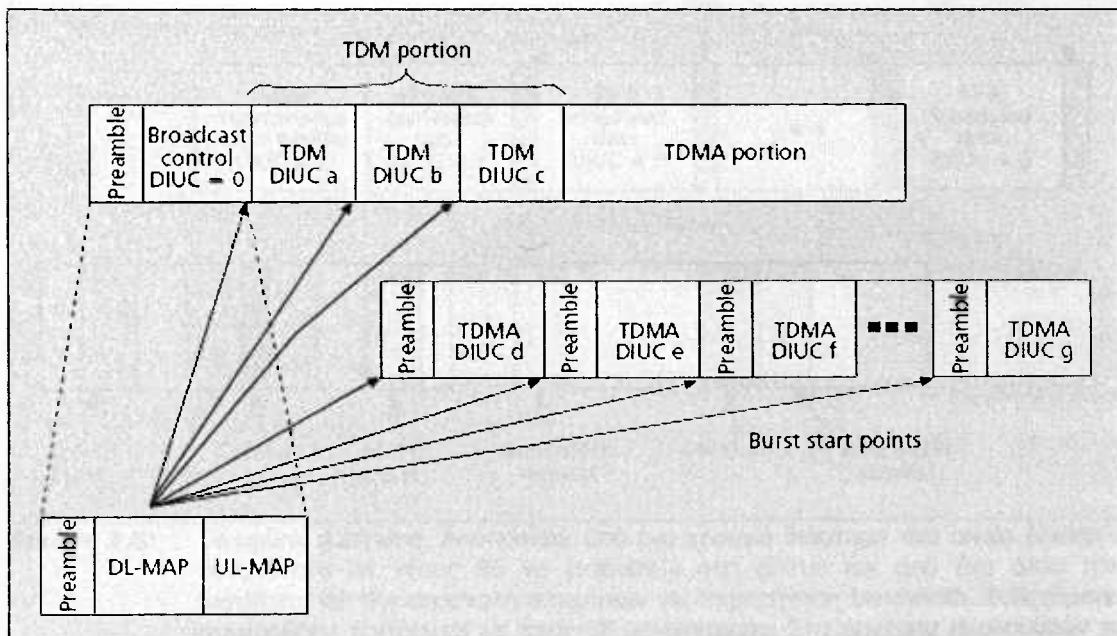
**Εικόνα 3.6:** Αριστερά το πεδίο των φάσεων για την QPSK και δεξιά για την 16-QAM.

Το WiMax διαθέτει αυτή την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα του φυσικού επιπέδου, ώστε να επιτυγχάνει υψηλότερες αποδόσεις. Όσο πιο κοντά βρίσκεται ο SS στον BS τόσο μπορεί να μεταβεί σε διαμόρφωση υψηλότερης αποδοτικότητας, έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται καλύτερα το πλεονέκτημα αυτό. Επίσης, η διαμόρφωση μπορεί να αλλάξει κατά την διάρκεια ανταλλαγής δεδομένων σε περιπτώσεις που έχουν αλλάξει οι συνθήκες τις επικοινωνίες, για παράδειγμα κλιματολογικές αλλαγές.

Όπως αναφερθεί και προηγουμένως, λόγω του ότι το μέσο είναι ασύρματο, οι επαναμεταδόσεις κοστίζουν αρκετά. Συνεπώς χρησιμοποιούνται μέθοδοι FEC για την απευθείας διόρθωση ορισμένου αριθμού λαθών. Στην περίπτωση του WiMax έχει επιλεχθεί στην φάση της αποκωδικοποίησης, η χρήση της μεθόδου Reed-Solomon GF(256). Το κάθε frame στο φυσικό επίπεδο του WiMax διαρκεί 0.5, 1 ή 2 ms. Κάθε frame διαιρείται σε φυσικά slots, με σκοπό αφενός να διαχωρίζονται οι μεταδόσεις του φυσικού επιπέδου και αφετέρου να γίνεται η δέσμευση για bandwidth. Το κάθε φυσικό slot έχει οριστεί έτσι ώστε να είναι τέσσερα QAM σύμβολα. Τέλος, το WiMax δίνει τη δυνατότητα και για FDD και για TDD αναφορικά με το uplink και το downlink. Έτσι στην πρώτη μεν περίπτωση τα subframes που αφορούν τα downlink και uplink μπορούν να μεταδίδονται παράλληλα σε διαφορετικά κανάλια, στη δεύτερη δε περίπτωση το uplink subframe ακολουθεί χρονικά το downlink subframe.

## To Downlink Subframe

To downlink subframe πάντα ξεκινά με ένα κομμάτι ελέγχου που περιέχει τα DL-MAP για το παρών frame στο downlink και το UL-MAP για το επόμενο frame στο uplink. Αμφότερα τα DL/UL-MAP έχουν στόχο να περιγράψουν τις οποιοδήποτε μεταβάσεις που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο αναφορικά με τη διαμόρφωση που επιλέγεται. Εφόσον, το WiMax δίνει την ευχέρεια στο SS να επιλέξει μεταξύ των τριών επιλογών διαμόρφωσης ανάλογα με τις ικανότητες του, τότε θα πρέπει να υπάρχει ένας συστηματικός τρόπος για να ενημερωθούν για τις αλλαγές ο BS και ο SS. Αυτός ο τρόπος είναι τα DL/UL-MAP που παρέχουν αυτή την πληροφορία. Επιπλέον, το κομμάτι ελέγχου ξεκινά από ένα νεκρό διάστημα (preamble) που βοηθά τους SS να συγχρονιστούν. Το κομμάτι ελέγχου ακολουθεί το κομμάτι στο οποίο κάθε SS, σε διαφορετικά χρονικά slots, παραλαμβάνει τα δεδομένα του σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχει ζητήσει. Αυτό είναι το TDM κομμάτι. Το DL-MAP αντιθέτως, δεν περιέχει καμία πληροφορία για το ποιος είναι ο παραλήπτης σε κάθε slot. Η πληροφορία αυτή περιέχεται στην επικεφαλίδα MAC. Έτσι κάθε SS ακούει σε όλα τα κομμάτια του downlink subframe.



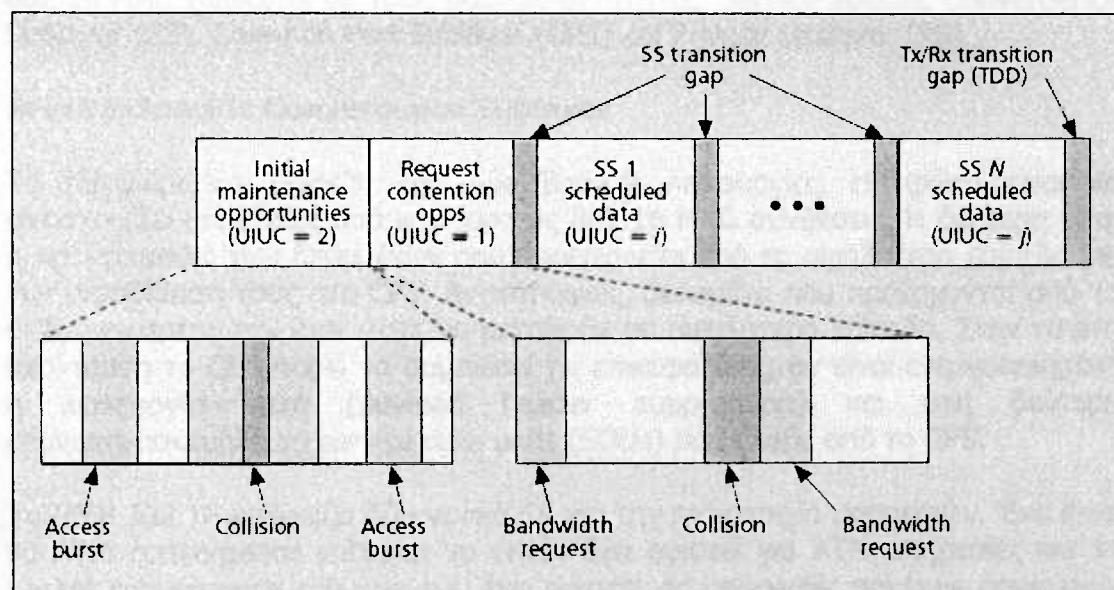
**Εικόνα 3.7:** Το downlink subframe για το 802.16. Κάθε downlink subframe αποτελείται από το preamble για συγχρονισμό και με τα DL/UL-MAP που αντιστοιχίζονται στα χρονικά slots που θίγει η αποστολή και η παραλαβή των δεδομένων.

Σε περίπτωση που τα uplink και downlink συνυπάρχουν ταυτόχρονα σε διαφορετικά κανάλια, δηλαδή στην περίπτωση που το σύστημα χρησιμοποιεί FDD, το TDM κομμάτι μπορεί να ακολουθείται και από ένα TDMA κομμάτι το οποίο προσθέτει ένα επιπλέον νεκρό διάστημα πριν από κάθε νέο προφίλ. Το

διάστημα αυτό βοηθά τον SS να απανασυγχρονιστεί και αυτό γιατί σε τέτοια συστήματα είναι εύκολο να χαθεί ο συγχρονισμός επειδή είναι πιθανό ένας SS να θέλει να μεταδώσει νωρίτερα στο frame που λαμβάνει.

## To uplink subframe

Κάθε SS μεταδίδει στο χρονικό διάστημα που του έχει ανατεθεί και σύμφωνα με το προφίλ που καθορίζεται από τον κωδικό Uplink Interval Usage (UIUC) που περιέχεται στο UL-MAP. Κάθε uplink subframe αποτελείται από ένα χρονικό διάστημα στο οποίο νέοι SS μπορούν να εισέρθουν καταθέτοντας την αίτηση του στο δίκτυο όπως και κάποιος προϋπάρχουν SS να ζητήσει τη δυνατότητα για broadcast ή multicast. Αυτό το διάστημα, ακολουθείται από ένα άλλο στο οποίο είναι η ευκαιρία για κάποιον SS να ζητήσει την επιχορήγηση επιπλέον bandwidth. Και τα δύο διαστήματα, επειδή οι διαμοιραζόμενα από όλους τους SS είναι επιρρεπή σε συγκρούσεις. Οι επίλυσή τους γίνεται με μηχανισμούς back-off αντίστοιχους με του Ethernet.



**Εικόνα 3.8:** Το uplink subframe. Αποτελείται από ένα χρονικό διάστημα στο οποίο δίνεται η δυνατότητα σε νέους SS να εισέλθουν στο δίκτυο και από ένα άλλο που διατίθεται για την αποστολή αιτημάτων για επιχορήγηση bandwidth. Ενδεχόμενες συγκρούσεις επιλύονται με back-off μηχανισμούς. Στη συνέχεια ακολουθούν τα χρονικά slots για αποστολή δεδομένων.

### 3.2 To MAC επίπεδο

Το IEEE 802.16 είναι σχεδιασμένο να προσφέρει στους χρήστες ασύρματη πρόσβαση και πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δίνοντας ταυτόχρονα μια πληθώρα από επίπεδα υπηρεσιών. Το πρότυπο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξυπηρετεί εκατοντάδες τερματικά ανά κανάλι όπως και εκατοντάδες χρήστες ανά τερματικό, με καθένα χρήστη να έχει τις δικές του απαιτήσεις σε σχέση με τις υπηρεσίες που θέλει να απολαμβάνει. Οι παρεχόμενες υπηρεσίες είναι τέτοιες ώστε να είναι κατάλληλες για εφαρμογές TDM έως και εφαρμογές χωρίς καθόλου εγγυήσεις (Best Effort). Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο, έχουν σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να διαχειρίζονται με τον αποτελεσματικότερο τρόπο το μέσο, όπως και να είναι απόλυτα ευσταθείς και κλιμακώσιμοι.

To WiMax αρχικά σχεδιάστηκε για να προσφέρει backhaul λύσεις. Έτσι το IEEE 802.16 MAC χωρίζεται σε τρεις βασικές οντότητες: Service-Specific Convergence Sublayer (CS), Common Part Sublayer (CPS) και Privacy Sublayer (PS).

#### Service-Specific Convergence Sublayer

Το συγκεκριμένο επίπεδο έχει δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι να αντιστοιχίζει υπηρεσίες από και προς τις 802.16 MAC συνδέσεις. Η δεύτερη είναι η προετοιμασία των δεδομένων που προέρχονται από το υψηλότερο επίπεδο για την μεταβίβασή τους στο CPS. Αντιστρόφως, δεδομένα που προέρχονται από το CPS, μετατρέπονται έτσι ώστε να μεταβούν σε υψηλότερο επίπεδο. Στην πρώτη περίπτωση το CS μπορεί να συμπιέσει τις επικεφαλίδες, αν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία αυτή (payload header suppression) και στη δεύτερη επανακατασκευάζει τα service data units (SDUs) που έλαβε από το CPS.

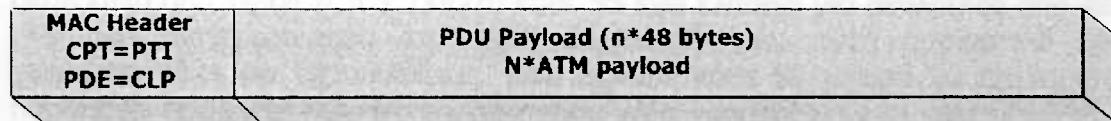
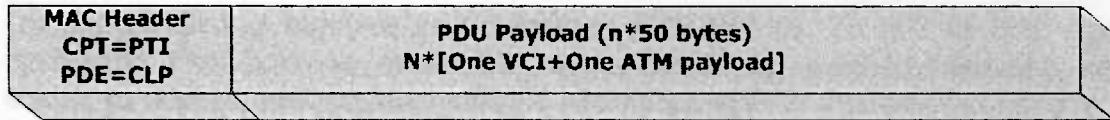
To IEEE 802.16 καθορίζει δύο γενικά CS για την αντιστοιχία υπηρεσιών. Ένα είναι το ATM convergence sublayer το οποίο έχει οριστεί για ATM υπηρεσίες και το packet convergence sublayer που έχει οριστεί για υπηρεσίες πακέτων όπως είναι IPv4, IPv6, Ethernet και ιδεατά τοπικά δίκτυα (Virtual Local Area Networks, VLAN). Έτσι η πρωταρχική αρμοδιότητα του CP είναι να αποτελεί μια διεπαφή του IEEE 802.16 MAC με το επίπεδο δικτύου και να αντιστοιχίζει τα SDUs που λαμβάνει στην κατάλληλη MAC σύνδεση.

#### Payload header suppression

Όταν η λειτουργία PHS είναι ενεργοποιημένη, πολύτιμο bandwidth κερδίζεται αφού συμπιέζοντας την επικεφαλίδα μειώνουμε το overhead. Η λειτουργία αυτή βρίσκει εφαρμογή και σε περιπτώσεις που το επίπεδο δικτύου είναι ATM και σε

περιπτώσεις που είναι packet-switched. Για να μελετήσουμε αναλυτικότερα πως δουλεύει και πόσο είναι το κέρδος, θα αναφερθούμε στην περίπτωση του ATM.

Η μονάδα δεδομένων στο ATM είναι το κελί (cell) το οποίο αποτελείται από 53 bytes εκ των οποίων τα 48 είναι το payload και 5 είναι η επικεφαλίδα. Η δρομολόγηση και διευθυνσιοδότηση στο ATM γίνεται με το συνδυασμό δύο παραμέτρων τον καθοριστή του ιδεατού μονοπατιού (Virtual Path Identifier, VPI) και τον καθοριστή του ιδεατού καναλιού (Virtual Channel Identifier, VCI). Σε κάθε βήμα της δρομολόγησης στο ATM, μία ή και τις δύο παραμέτρους στην είσοδο αντιστοιχίζεται σε μία διαφορετική τιμή της παραμέτρου στην έξοδο. Επομένως, αν το συγκεκριμένο βήμα της δρομολόγησης είναι Virtual Path Switched (VP), η παράμετρος VPI αλλάζει κατά την έξοδο. Στην περίπτωση που είναι Virtual Channel Switched (VC), ο συνδυασμός VPI/VCI αντιστοιχίζεται σε νέο συνδυασμό κατά την έξοδο. Το CS θα πρέπει να μπορεί να διακρίνει μεταξύ αυτών των δύο περιπτώσεων και να χειρίστει αναλόγως.



**Εικόνα 3.9:** Ένα MAC frame, στην περίπτωση που έχει ενεργοποιηθεί η επιλογή για συμπίεση επικεφαλίδας. Πάνω βλέπουμε τη μορφή σε περίπτωση VP και κάτω σε περίπτωση VC.

Όπως έχει αναφερθεί, όλες οι συνδέσεις στο IEEE 802.16 αναφέρονται με έναν 16-bit καθοριστή (Connection Identifier, CID). Αυτό επιτρέπει στο πρότυπο να συμπεριφέρεται σε όλες τις συναλλαγές του, σαν να πρόκειται για connection-oriented συναλλαγές και έτσι να επιτευχθεί QoS. Στην περίπτωση του VP, η παράμετρος VPI αντιστοιχίζεται σε ένα CID, επιτρέποντας στις υπόλοιπες παραμέτρους του ATM cell εκτός από τα VCI, Payload Type Indicator (PTI) και Cell Loss Priority (CLP) να παραληφθούν. Το VCI τοποθετείται μέσα στο payload του MAC πακέτου και τα PTI, CLP bit αντιστοιχίζονται στα πεδία CS Pass-Through (CPT) και Payload Discard Eligibility (PDE) bit του MAC header.

Στην περίπτωση του VC, ο συνδυασμός VPI/VCI αντιστοιχίζεται σε ένα CID. Έτσι το VCI δεν τοποθετείται στο payload και κερδίζουμε επιπλέον. Και πάλι τα υπόλοιπα πεδία του cell εκτός των PTI και CLP παραλείπονται. Τα PTI και CLP επίσης αντιστοιχίζονται στα CPT και PDE αντίστοιχα.

Ένα από τα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του ATM, είναι ότι μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε έναν άμεσο τρόπο να γνωρίζουμε αν υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο, αντιθέτως με άλλα δίκτυα όπως στο IP όπου υποθέτουμε ότι υπάρχει συμφόρηση έμμεσα με χρήση χρονομετρών (timeout). Στο ATM αυτό γίνεται απλά, με χρήση του Explicit Forward Congestion Indicator (EFCI) bit, το οποίο είναι το δεύτερο PTI bit (το πρώτο είναι 0 αν το cell περιέχει δεδομένα του χρήστη ή 1 αν είναι cell ελέγχου). Αυτή η πληροφορία δε χάνεται όταν είναι ενεργοποιημένη η λειτουργία PHS. Το δεύτερο bit του CPT αντιγράφει τη τιμή EFCI, έτσι ώστε να ενημερώσει για την παρουσία συμφόρησης. Ωστόσο, όταν τοποθετούνται πολλά cells μέσα σε ένα πακέτα MAC, μερικά από τα cells μπορεί να έχουν διαφορετική τιμή στο EFCI bit από τα άλλα. Έτσι το CS ενεργώντας ένα λογικό OR μεταξύ όλων των EFCI bits που θα τοποθετηθούν στο πακέτο, αντιγράφει το αποτέλεσμα στο δεύτερο bit του CPT.

## Common Part Sublayer

Ουσιαστικά είναι ο πυρήνας του πρωτύπου IEEE 802.16. Το 802.16 MAC έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ακολουθεί την αρχιτεκτονική point-to-multipoint και επίσης να παρέχει τους μηχανισμούς για προσφορά QoS σε εκατοντάδες χρήστες. Αυτός είναι ο λόγος που το IEEE 802.16 MAC είναι connection-oriented, ώστε να διαχειρίζεται τα επίπεδα υπηρεσιών. Η αναφορά σε κάθε σύνδεση γίνεται με μία ακολουθία από 16-bit (CID). Παρότι κάθε SS έχει κλασικά μια ακολουθία από 48-bits που αντιπροσωπεύει την MAC διεύθυνσή του, αυτή ουσιαστικά δεν χρησιμοποιείται για τις συνδέσεις, γιατί αφενός κάθε SS μπορεί να εξυπηρετεί παραπάνω από έναν χρήστης και αφετέρου κάθε χρήστης να έχει παραπάνω από μία συνδέσεις.

Κατά τη διαδικασία εισαγωγής ενός SS στο δίκτυο, δημιουργούνται τρεις διαφορετικές συνδέσεις με διαφορετική προτεραιότητα η καθεμιά, συνδέσεις που θα παραμένουν ενεργές σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης του SS στο δίκτυο. Ο λόγος που παραμένουν ενεργές είναι ότι μέσω αυτών ανταλλάσσονται χρήσιμες πληροφορίες σε σχέση με την κατάσταση της συνεδρίας και δεν χρησιμοποιούνται για την αποστολή ή λήψη δεδομένων του χρήστη. Αυτές είναι:

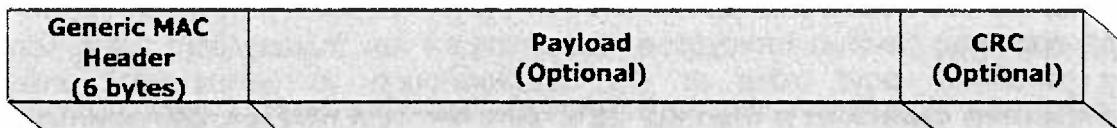
- Βασική (Basic):** Σε αυτή τη σύνδεση μεταδίδονται σύντομα αλλά και πολύ απαιτητικά στο χρόνο μηνύματα MAC, όπως είναι τα μηνύματα για έλεγχο του ασύρματου μέσου (Radio Link Control, RLC), όπως η εύρεση της κατάλληλης ισχύς για μετάδοση κ.α. Έτσι αυτή η σύνδεση έχει τη μέγιστη προτεραιότητα.
- Πρωταρχική διαχείρισης (Primary Management):** Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή μεγαλύτερου μεγέθους μηνυμάτων που είναι πιο ανθεκτικά στην καθυστέρηση όπως είναι αυτά της αρχικοποίησης της σύνδεσης και τις αυθεντικοποίησης.

- **Δευτερεύουσα διαχείρισης (Secondary Management):** Αυτή η σύνδεση χρησιμοποιείται για συγκεκριμένου σκοπού μηνυμάτων διαχείρισης όπως είναι μηνυμάτων των πρωτοκόλλων Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), Trivial File Transfer Protocol (TFTP) και Simple Network Management Protocol (SNMP).

Εκτός από αυτές τις τρεις βασικές συνδέσεις, το 802.16 MAC δημιουργεί και επιπλέον συνδέσεις για άλλους σκοπούς. Μία είναι για αρχική πρόσβαση, άλλη για multicast ή broadcast κ.α. Βέβαια, συνδέσεις δημιουργούνται και από τις ανάγκες των χρηστών για την μετάδοση δεδομένων.

## 802.16 MAC PDU Format

Το PDU (Protocol Data Unit) είναι η μονάδα δεδομένων που ανταλλάσσεται μεταξύ των MAC επιπέδων. Ένα MAC PDU αποτελείται από μια σταθερού μεγέθους επικεφαλίδα, έτσι ώστε να επιταχύνεται η διαδικασία της επεξεργασίας του PDU και από μεταβλητού μεγέθους payload. Επιπλέον, μπορεί να περιέχει και επιπλέον bits ελέγχου λαθών με κυκλικό κώδικα (Cyclic Redundancy Check, CRC). Υπάρχουν δύο τύποι επικεφαλίδας τα οποία καθορίζονται από το πεδίο Header Type (HT) αποτελούμενο από ένα bit:



**Εικόνα 3.10:** Ένα MAC PDU αποτελείται από σταθερού μεγέθους επικεφαλίδα, από μεταβλητού μεγέθους δεδομένα και προαιρετικά από CRC.

- **Γενική (Generic)**
- **Αιτήματος bandwidth (bandwidth request)**

Η γενική επικεφαλίδα μπορεί να περιέχει είτε μηνύματα διαχείρισης είτε δεδομένα από το CS. Η bandwidth request επικεφαλίδα αντιθέτως δεν περιέχει payload.

Η MAC PDU εκτός από τους δύο τύπους επικεφαλίδας, έχει και τρεις διαφορετικούς τύπους υποεπικεφαλίδας καθεμιά εξυπηρετώντας διαφορετικούς σκοπούς.

- **Διαχείρισης επιχορήγησης (grant management subheader):** χρησιμοποιείται από τον SS για να διαβιβάσει στον BS τις ανάγκες του σε bandwidth.

- **Επικεφαλίδα κατακερματισμού (fragmentation subheader):** η οποία καθορίζει την παρουσία και την προέλευση των κατακερματισμένων SDUs στο payload.
  - **Επικεφαλίδα συσκευασίας (packing subheader):** χρησιμοποιείται για να δηλώσει την παρουσία παραπάνω από ένα SDUs μέσα στο PDU.

H T	E C	Type (6 bits)	R S V	C I	EK S (2)	R S V	LEN msb (3)
		LEN lsb (8)			CID msb (8)		
		CID lsb (8)			HCS (8)		

<b>H</b>	<b>E</b>	<b>T</b>	<b>C</b>	Type (6 bits)	BW Request msb (8)
				LEN lsb (8)	CID msb (8)
				CID lsb (8)	HCS (8)

**Εικόνα 3.11:** Αριστερά η γενική τύπου επικεφαλίδα και δεξιά η επικεφαλίδα αιτήματος επιχορήγησης bandwidth.

Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ των τριών υποεπικεφαλίδων είναι ότι αυτές των grant management και fragmentation εισέρχονται αμέσως μετά από τη γενική επικεφαλίδα αν προσδιορίζεται από το πεδίο type. Αντιθέτως η υποεπικεφαλίδα packing πριν από κάθε SDU. Και αυτή η περίπτωση καθορίζεται από το πεδίο type.

### 3.3 Radio Link Control

Είναι γεγονός ότι το WiMax αποτελεί μία πολύ σύγχρονη και αποδοτική λύση για ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση. Οι αλγόριθμοι του προτύπου έχουν δημιουργηθεί με τον πλέον αποδοτικό τρόπο. Έτσι θα πρέπει να συνοδεύεται και από ένα αντίστοιχα αποδοτικό radio link control. Οι κλασικές λειτουργίες του RLC είναι ο έλεγχος της ισχύς μετάδοσης και λήψης όπως και ο καθορισμός του εύρους των τιμών στο φυσικό επίπεδο (ranging). Μία ακόμη λειτουργία του RLC στο IEEE 802.16 είναι και η δυνατότητα του φυσικού επιπέδου να μεταβαίνει από ένα προφίλ ροής δεδομένων σε ένα άλλο (burst profile).

Κατά την αρχική εισαγωγή ενός SS στο δίκτυο, το RLC του SS θα πρέπει να καθορίσει το επίπεδο ισχύος στο οποίο θα μεταδίδει όπως και το να καθορίσει το range. Για αυτό το σκοπό, στο πρώτο αρχικό τμήμα του Uplink που είναι καθορισμένο μόνο για τέτοιους είδους ενέργειες αποστέλλει ένα ranging request (RNG-REQ) μήνυμα προς τον BS. Ο BS αποστέλλει με τη σειρά του ένα ranging response (RNG-RSP) μήνυμα στο οποίο ενημερώνει τον SS για τα επίπεδα ισχύος.

Το RLC περιστασιακά αποστέλλει broadcast μηνύματα από τον BS ενημερώνοντας για τα burst profiles που έχουν επιλεγεί στο downlink και uplink. Αυτά τα profiles έχουν επιλεγεί βάσει παραμέτρων όπως είναι οι κλιματολογικές συνθήκες και οι δυνατότητες του εξοπλισμού. Όλα τα burst profiles στο downlink έχουν έναν κωδικό (Downlink Interval Usage Code, DIUC) και στο Uplink (Uplink Interval Usage Code, UIUC).

Κατά το αρχικό ranging, ο SS ζητά από τον BS να εξυπηρετηθεί στο downlink σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο profile και δηλώνει αυτή την προτίμηση απλά μεταδίδοντας το επιλεγμένο DIUC στον BS. Αυτή η προτίμηση για τον SS έχει προέρθει από μετρήσεις ποιότητας του σήματος που έχει αρχικά διενεργήσει ο SS κατά τη διαδικασία του ranging και εξαρτάται από παραμέτρους, μία από τις οποίες είναι και η απόσταση SS και BS. Ο BS έχει τη δυνατότητα είτε να αρνηθεί το αίτημα του SS είτε να το αποδεχθεί. Παρομοίως και ο BS επιβλέπει συνεχώς την ποιότητα του σήματος στο uplink που λαμβάνει από τον SS. Έτσι μπορεί να ζητήσει από τον SS να μεταβεί σε διαφορετικό burst profile στο uplink, απλά αλλάζοντας τον κατάλληλο UIUC που περιέχεται στο UL-MAP.

Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας, οι BS και SS έχουν καθορίσει τα αρχικά burst profiles για τα downlink και uplink. Ωστόσο, δεν έχουν τελειώσει και οι αρμοδιότητες του RLC. Ο λόγος είναι ότι οι συνθήκες που επικρατούν στο μέσο είναι πιθανό να αλλάξουν και έτσι να δυσχεράνουν ή να ευνοήσουν περισσότερο τη μετάδοση. Πιθανοί λόγοι για την αλλαγή των συνθηκών είναι η παρουσία νέων εμποδίων μεταξύ SS και BS εξαιτίας κλιματολογικών αλλαγών, για παράδειγμα

βροχή, χιόνι, ομίχλη ή η παρουσία φυσικών εμποδίων, ειδικότερα στην περίπτωση του mobile WiMax. Έτσι το RLC συνεχίζει να επιβλέπει την ποιότητα της σύνδεσης στο uplink και downlink σε όλη τη διάρκεια της συνεδρίας. Όπου οι νέες συνθήκες το επιβάλλουν, το RLC μπορεί να μεταβεί σε περισσότερο ανθεκτικό ή περισσότερο αποδοτικό burst profile. Έτσι με αυτή την επίβλεψη, το RLC λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες στη διάρκεια της μετάδοσης, επιχειρεί να ισορροπήσει μεταξύ ενός ανθεκτικού και ενός αποδοτικού burst profile.

Αντίστοιχα λειτουργεί το RLC και από την πλευρά του BS. Σε αυτή την περίπτωση επιβλέπει συνεχώς την ποιότητα του σήματος στο uplink. Εάν κρίνει ότι κάποιος SS θα πρέπει να μεταβεί σε άλλη burst profile στο uplink, τότε ο BS καθορίζει το κατάλληλο burst profile για το uplink του SS, απλά αλλάζοντας τον UIUC που σχετίζεται με τον αντίστοιχο SS. Η αλλαγή του burst profile είναι ιδιαιτέρως απλή διαδικασία γιατί δε χρειάζεται επιβεβαίωση από τον SS για αυτή την αλλαγή. Πράγματι, αφού ο δέκτης του SS θα λειτουργεί σε συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος είτε θα λάβει την αίτηση του BS για αλλαγή του burst profile και το UIUC στο οποίο κατοχυρώνεται είτε κανένα από τα δύο. Συνεπώς, δεν υπάρχει ενδεχόμενο ασυμφωνίας των BS και SS για το burst profile στο uplink.

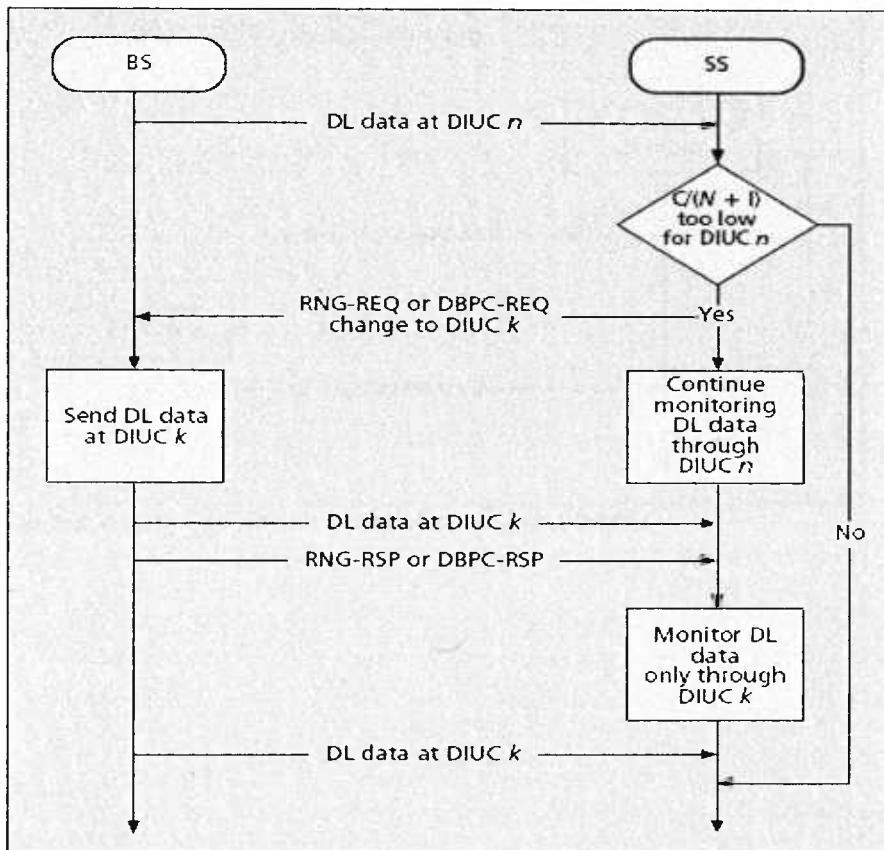
Κάτι τέτοιο δεν είναι τόσο εύκολο και για το downlink. Το γεγονός ότι το RLC στο SS είναι ο υπεύθυνος να ζητήσει την αλλαγή του burst profile στο downlink, είναι πιθανό να δημιουργήσει ασυμφωνία μεταξύ SS και BS. Έτσι η αλλαγή του burst profile στο downlink θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά. Όπως αναφέρθηκε, ο SS επιβλέπει την ποιότητα του σήματος στο downlink. Έτσι αυτός γνωρίζει πότε το downlink burst profile θα πρέπει να αλλάξει. Για την αίτηση αλλαγής υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι που εξάρτιονται από τον τρόπο που λειτουργεί ο SS σε σχέση με τις συνδέσεις του. Ο τρόπος που μπορεί να ενεργήσει ο SS για τις αιτήσεις αλλαγής του downlink burst profile είναι εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του. Υπάρχουν δύο δυνατότητες λειτουργίας ενός SS:

- **Επιχορήγηση ανά σύνδεση (Grand Per Connection, GPC)**
- **Επιχορήγηση ανά SS (Grand Per SS, GPSS)**

Και στις δύο περιπτώσεις, ο SS μπορεί να χρησιμοποιήσει μηνύματα τύπου downlink burst profile change request (DBPC-REQ) και να περιμένει την απάντηση του BS με μήνυμα τύπου DBPC response (DBPC-RSP). Επιπλέον, η πρώτη περίπτωση έχει μια επιπλέον εναλλακτική, ο SS να χρησιμοποιήσει μήνυμα τύπου RNG-REQ για να ζητήσει την αλλαγή του downlink burst profile.

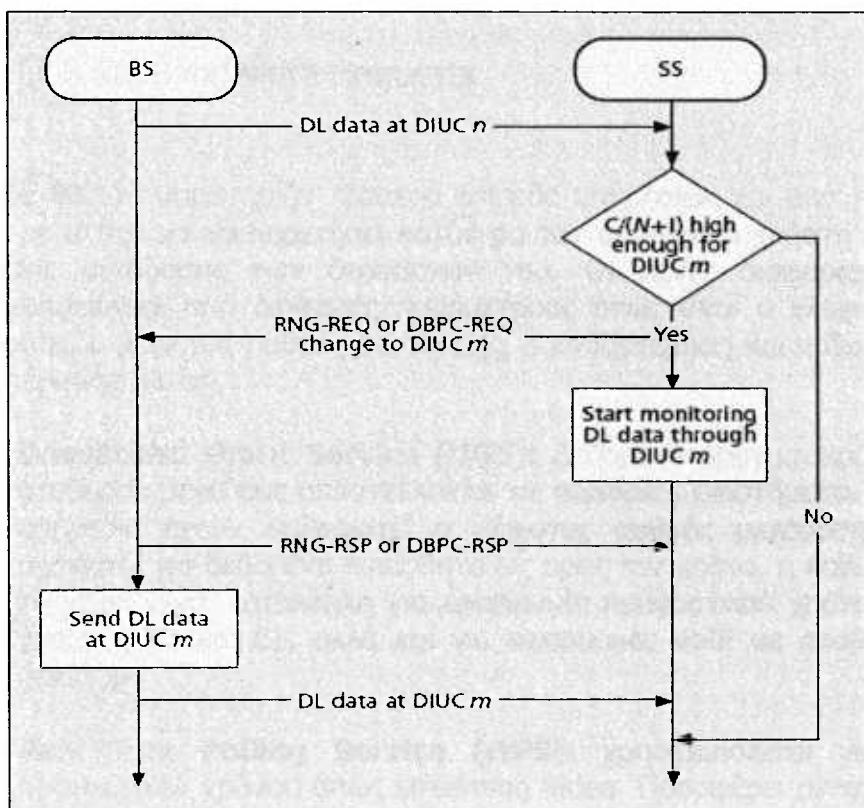
Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο ασυμφωνίας μεταξύ SS και BS, το πρωτόκολλο αλλαγής σε ένα πιο ανθεκτικό burst profile, από το πρωτόκολλο αλλαγής σε πιο αποδοτικό profile είναι διαφορετικά. Όσο αφορά την αλλαγή του burst profile σε ένα λιγότερο ανθεκτικό profile, ο SS εξετάζει σε κάθε χρονικό διάστημα το σήμα που λαμβάνει είναι αρκετά καλής ποιότητας για να μεταβεί σε λιγότερο ανθεκτικό

profile. Αν η απάντηση είναι θετική, στέλνει RNG-REQ ή DBPC-REQ στον BS με αίτημα να μεταβεί στο νέο profile. Ωστόσο, ο SS στη συνέχεια «ακούει» στο νέο profile για απάντηση και δεδομένα, κάτι που συνεχίζει να κάνει και μετά τη θετική απάντηση του BS. Ο λόγος που ο SS αλλάζει το profile του και ακούει στο νέο burst profile είναι ότι εφόσον το νέο είναι λιγότερο ανθεκτικό από το παλαιό, θα «ακούσει» σίγουρα την απάντηση από τον BS, ανεξάρτητα αν αυτή έρθει στο νέο ή στο παλαιό profile.



**Εικόνα 3.12:** Μετάβαση σε πιο αποδοτικό burst profile

Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση που μεταβαίνει σε ένα πιο ανθεκτικό profile. Ο SS αρχικά αντιλαμβάνεται ότι η ποιότητα του σήματος είναι αρκετά χαμηλή για το συγκεκριμένο profile που έχει επιλέξει. Έτσι χρησιμοποιώντας μηνύματα τύπου RNG-REQ ή DBPC-REQ ζητά από τον BS να μεταβεί σε καλύτερο burst profile. Ωστόσο, συνεχίζει να «ακούει» στο παλαιό burst profile, γιατί αν είχε μεταβεί στο νέο burst profile όπως στην προηγούμενη περίπτωση, δε θα ήταν σε θέση να λάβει δεδομένα στο παλαιό profile που ενδεχομένως να λάμβανε πριν από τα RNG-RSP ή DBPC-RSP. Επομένως, αλλάζει το profile του μόνο όταν λάβει θετική απάντηση από τον BS.



**Εικόνα 3.13:** Μετάβαση σε πιο ανθεκτικό burst profile

• **Επόμενη Βίβλη: Future Routing Selection (επόμενη):** Στην έναρξη, τα διαδικτυακά μέσα (DIUC) είναι όλα ίδια και την περίοδο της λειτουργίας μετατίθενται παρότι, οι διαδικτυακές συνδέσεις δεν αλλάζουν. Επομένως, τα εργασία που πρέπει να γίνεται είναι να διατηρηθεί το παρόν περιβάλλον προσφέροντας και την αποτελεσματικότητα της παραγωγής και την αποδοτικότητα της υπηρεσίας. Το πρώτο μέρος της παραγωγής πρέπει να γίνεται μετατίθενται παρότι, οι διαδικτυακές συνδέσεις δεν αλλάζουν.

• **Επόμενη Βίβλη: Routing Selection (επόμενη):** Στην υπόδειξη αυτή, η επόμενη βίβλη είναι η πιο δύσκολη μετατίθενται, αφού τα διαδικτυακά μέσα πρέπει να ανανεωθούν πρόσθια και επίσης να ανανεωθεί η σύνδεση καθιστάτη. Αυτό για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της παραγωγής, την αύξηση της αποδοτικότητας της υπηρεσίας, την αύξηση της αποτελεσματικότητας της παραγωγής και την αύξηση της αποδοτικότητας της υπηρεσίας.

• **Επόμενη Βίβλη: Routing Selection (επόμενη):** Η πιο δύσκολη μετατίθενται. Ο χρήστης αυτής της βίβλης πρέπει να διατηρηθεί τη διαδικτυακή σύνδεση που την προσεγγίζεται.

### 3.4 QoS και Bandwidth Requests

Το IEEE 802.16 υποστηρίζει τέσσερα επίπεδα υπηρεσιών και από την έκδοση ε πέντε, με στόχο να εξυπηρετήσει καλύτερα τον απαιτητικό χρήστη που αποζητά εγγυήσεις μετάδοσης των δεδομένων του. Οι πέντε διαφορετικές κλάσεις διαφοροποιούνται από διάφορες παραμέτρους όπως είναι ο ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter).

- **Unsolicited Grant Service (UGS):** Δεδομένα πραγματικού χρόνου και σταθερού μεγέθους αποστέλλονται σε περιοδικά διαστήματα. Σε αυτή την υπηρεσία έχουν καθοριστεί ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης και αφού πρόκειται για δεδομένα ευαίσθητα ως προς τον χρόνο, η καθυστέρηση και το jitter. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως στις γραμμές T1 και E1, αλλά και για εφαρμογές VoIP με σταθερό μέγεθος πακέτου.
- **Real-Time Polling Service (rtPS):** χρησιμοποιείται για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως streaming video. Προσφέρει μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, αλλά με εγγυημένο ελάχιστο και μέγιστο ρυθμό. Αφού είναι υπηρεσία πραγματικού χρόνου, υπάρχουν εγγυήσεις και για τη μέγιστη end-to-end καθυστέρηση. Αντιθέτως, δεν υπάρχουν εγγυήσεις για το jitter. Είναι επίσης κατάλληλη και για πρόσβαση επιχείρησης μιας που εγγυάται το ρυθμό μετάδοσης, και επεδή το μέγεθος πακέτων μπορεί να είναι μεταβλητό, επιτρέπει στους χρήστες να εκμεταλλεύονται επιπλέον bandwidth περιστασιακά αν αυτό είναι διαθέσιμο.
- **Enhanced Real-Time Polling Service (ertPS):** Είναι ένας συνδυασμός των UGS και rtPS υπό την έννοια ότι περιοδικά αποστέλλονται πακέτα, αλλά με μεταβλητό μέγεθος. Έτσι λόγω της περιοδικότητας, το ertPS παρέχει τις ίδιες εγγυήσεις με το rtPS με τη διαφορά ότι προσφέρει και εγγύηση για το jitter. Η υπηρεσία αυτή έχει δημιουργηθεί από την έκδοση ε του IEEE 802.16 και είναι κατάλληλη κυρίως για υπηρεσίες VoIP.
- **Non Real-Time Polling Service (nrtPS):** Στην υπηρεσία αυτή προσφέρεται εγγύηση μόνο για το ρυθμό μετάδοσης, αφού τα δεδομένα δεν είναι πραγματικού χρόνου και έτσι είναι ανθεκτικά στην καθυστέρηση. Μία από τις πιθανές εφαρμογές είναι το FTP με εγγύηση ταχύτητα κατεβάσματος.
- **Best Effort (BE):** Καμιά εγγύηση δεν προσφέρεται. Ο χρήστης αυτής της υπηρεσίας χρησιμοποιεί το διαθέσιμο bandwidth από τις προηγούμενες.

Είναι κατάλληλη για εφαρμογές που δεν είναι κρίσιμες στο χρόνο όπως email, web browsing και FTP.

Ο τρόπος που διαχειρίζεται το πρότυπο τις παραπάνω κλάσεις δεν είναι καλώς ορισμένος. Το επίπεδο σύγκλισης του IEEE 802.16 MAC μέσω της διεπαφής του με το επίπεδο δικτύου λαμβάνει δεδομένα, τα οποία τα αντιστοιχίζει σε συνδέσεις. Στη συνέχεια το CPS, κατατάσσει τα δεδομένα σε ουρές σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, σε κατάλληλο επίπεδο υπηρεσίας και έτσι δημιουργούνται διαφορετικές προτεραιότητες για την αποστολή. Με ποια χρονική σειρά θα γίνει η αποστολή εξαρτάται από τον scheduler του BS και του SS. Το IEEE 802.16 δεν έχει προτείνει υλοποίηση για τον scheduler, έτσι ώστε κάθε κατασκευαστής να είναι σε θέση να υλοποιήσει το δικό του και έτσι να μπορεί να διαφοροποιηθεί από τους ανταγωνιστές του. Η υλοποίηση του scheduler είναι μια πολύ σοβαρή εργασία αφού από αυτή εξαρτάται κατά πολύ η απόδοση της παρεχόμενης υπηρεσίας.

## Scheduling Services

Ανάλογα ποια υπηρεσία έχει επιλέξει ο χρήστης έχει και τις αντίστοιχες δυνατότητες για να απαιτήσει επιπλέον bandwidth. Στην περίπτωση του UGS, ο SS έχει τη δυνατότητα να ενημερώσει τον BS για ενδεχόμενη συμφόρηση, χρησιμοποιώντας τη τεχνική poll-me bit. Η σημαία επιτρέπει στον SS να ενημερώσει τον BS, μέσω του uplink, ότι έχει δημιουργηθεί συμφόρηση.

Στην περίπτωση του rtPS και erTPS λόγω του ότι αφορούν δεδομένα ευαίσθητα στο χρόνο, δίνεται η δυνατότητα στον SS σε περιστασιακές τυχαίες στιγμές να ζητήσουν επιπλέον bandwidth. Αντιθέτως στη nrtPS, ο SS μπορεί να ζητήσει επιχορήγηση μόνο στην αρχή ενός φυσικού frame, σε slots τυχαίας πρόσβασης. Τέλος, στην περίπτωση του BE, ο SS μπορεί να ζητήσει επιπλέον bandwidth οποιαδήποτε στιγμή.

## Bandwidth Requests

Το IEEE 802.16 διαθέτει δύο κλάσεις SS ανάλογα με τη δυνατότητα που έχουν να δέχονται και να χειρίζονται αιτήσεις για bandwidth για μια σύνδεση ή για ολόκληρο το SS (GPC, GPSS αντίστοιχα). Οι δύο κλάσεις έχουν επιτραπεί έτσι ώστε να δίνουν επιπλέον δυνατότητες στον κατασκευαστή σε σχέση με την απόδοση. Και στις δύο κλάσεις μια σύνδεση μπορεί να ζητήσει bandwidth και το αίτημα αυτό με τη σειρά του να διαβιβαστεί από το SS στο BS μέσω του uplink. Στην περίπτωση του GPC, το bandwidth επιχορηγείται σε σύνδεση αποκλειστικά ή οποία το έχει ζητήσει. Αντιθέτως, στη κλάση GPSS το bandwidth επιχορηγείται συνολικά στο SS.

Το GPSS SS χειρίζεται με έξυπνο και αποδοτικό τρόπο το QoS. Είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί το bandwidth σε σύνδεση η οποία δε το ζήτησε ή και ακόμα, παρότι μια σύνδεση ζήτησε επιχορήγηση σε bandwidth, ο SS να μη διαβιβάσει αυτό το αίτημα προς το BS. Για παράδειγμα, αν η κατάσταση του QoS έχει αλλάξει από τη στιγμή του αιτήματος, ο SS μπορεί να αποστείλει δεδομένα μιας σύνδεσης με μεγαλύτερο ρυθμό, αν στο παρελθόν έχει υποκλέψει από αυτή πόρους. Επίσης, παρότι μία σύνδεση μπορεί να ζητήσει επιχορήγηση bandwidth, δεν είναι αναγκαίο ο SS να διαβιβάσει το αίτημα στον BS, εάν γνωρίζει ότι την επόμενη χρονική στιγμή μια σύνδεση σταματά τη δραστηριότητά της και έτσι απελευθερώνονται πόροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύνδεση που έχει ανάγκη. Έτσι οι δύο κλασεις SS, αμφιταλαντεύονται μεταξύ αποδοτικότητας στην περίπτωση ενός GPSS SS μιας και διαχειρίζονται καλύτερα τους πόρους τους στο εσωτερικό και μεταξύ απλότητας όπως είναι στην περίπτωση ενός GPS SS.

Ανεξάρτητα από κλάση SS μελετούμε, ο μηχανισμός αίτησης για επιχορήγηση bandwidth είναι αρκετά ευέλικτος αφού λαμβάνει υπόψη ότι το μέσο επικοινωνίας είναι ασύρματο. Έτσι δεν αποστέλλει συνεχώς το αίτημά του μέχρι να γίνει αποδεκτό. Αυτός ο μηχανισμός δικαιολογείται και από το γεγονός ότι το IEEE 802.16 MAC χρησιμοποιεί ένα αυτοδιορθώμενο (self-correcting) πρωτόκολλο, παρά ένα πρωτόκολλο με χρήση επιβεβαιώσεων (acknowledged protocol). Όταν ένας SS ζητήσει bandwidth από τον BS, υπάρχουν μια πληθώρα λόγων για τους οποίους το αίτημά του δεν έχει ικανοποιηθεί. Πράγματι, είναι πιθανό ο BS να μην έλαβε το αίτημα από λάθη στο φυσικό επίπεδο, επίσης πιθανό είναι ο SS να μην έλαβε τη θετική απάντηση από λάθη, ακόμα και επίσης το αίτημα να μην ικανοποιήθηκε επειδή ο BS δεν έχει αρκετό bandwidth. Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις λαμβάνονται ως μία. Επομένως, ο SS δεν επαναλαμβάνει το αίτημά του μέχρι να λάβει επιβεβαίωση. Αντιθέτως, συνεχίζει τη λειτουργία του και επαναλαμβάνει το αίτημά του αργότερα.

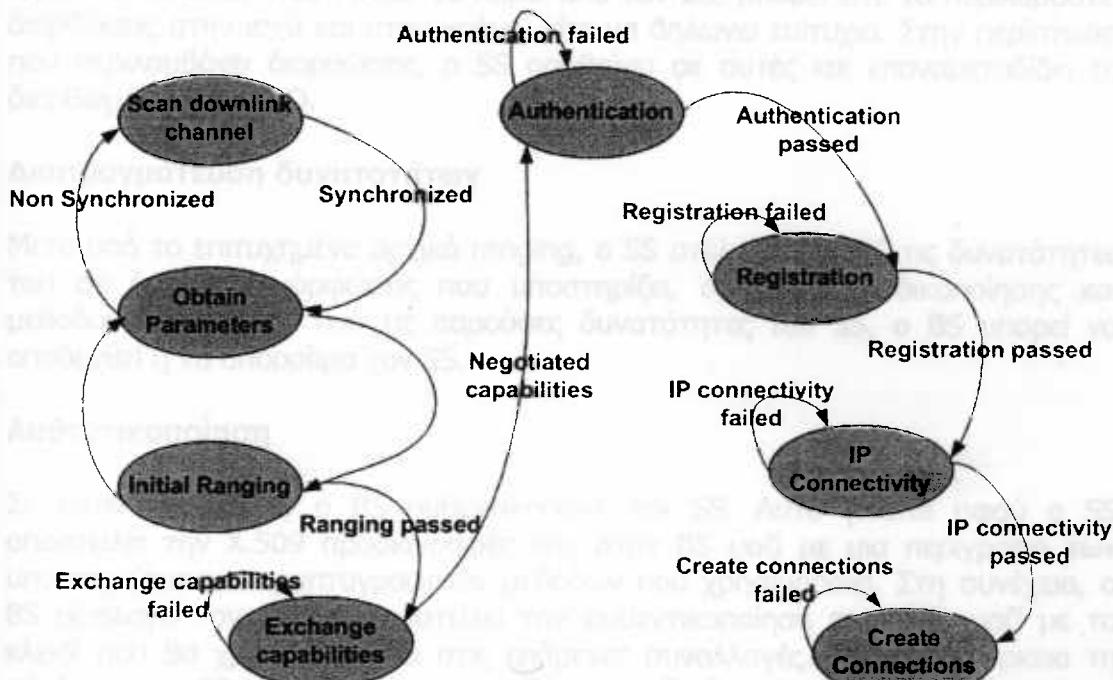
Συνολικά υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι αίτησης για bandwidth:

- **Poll-me bit:** παρουσιάζεται στη grant management επικεφαλίδα σε μια UGS σύνδεση και δηλώνει στον BS ότι υπάρχει συμφόρηση. Σε συνδέσεις διαφορετικές από UGS, δηλώνει αίτημα για ευκαιρία αίτησης bandwidth.
- **Bandwidth Request Message:** χρησιμοποιεί την επικεφαλίδα bandwidth request για τη δήλωση του αιτήματος. Στέλνεται είτε στο uplink που έχει δεσμευτεί για το SS, είτε σε ένα από τα slots για bandwidth requests. Έχει τη δυνατότητα να ζητήσει έως και 32KB ανά μήνυμα. Επιπλέον, μπορεί να είναι είτε αυξητικής έννοιας είτε συνολικά, όπως αυτό ορίζεται από την επικεφαλίδα.

- **Piggybacked Request (non-UGS):** παρουσιάζεται στην επικεφαλίδα grand management στα δεδομένα PDU της ίδια της σύνδεσης. Υπάρχει η δυνατότητα αιτήματος μέχρι 32KB και είναι πάντοτε αυξητική.

### 3.5 Εισαγωγή στο δίκτυο

Για να μπορέσει ο SS να επικοινωνήσει στο δίκτυο, θα πρέπει αρχικά να ολοκληρώσει τη διαδικασία εισαγωγής στο δίκτυο με επιτυχία. Εάν κάποιο από τα βήματα της εισαγωγής αποτύχει, ο SS επιχειρεί ξανά από την ίδια κατάσταση.



**Εικόνα 3.14:** Τα βήματα εισαγωγής σε ένα δίκτυο WiMax. Σε περίπτωση αποτυχίας, επανερχόμαστε στο προηγούμενο επιτυχημένο βήμα

### Συγχρονισμός με το downlink κανάλι

Στην περίπτωση που ένας SS έχει προγραμματιστεί να χρησιμοποιεί έναν συγκεκριμένο BS, όπως συμβαίνει στη περίπτωση που λειτουργεί στο αδειοτημένο φάσμα, επικοινωνεί με τον BS σε αυτή τη συχνότητα. Διαφορετικά αναζητά για ένα κανάλι από τη λίστα συχνοτήτων που έχουν προκαθοριστεί. Όταν ο SS βρει ένα downlink κανάλι, επιχειρεί να συγχρονιστεί μαζί του, δηλαδή να ανακαλύψει το preamble που στέλνεται περιοδικά. Στη συνέχεια, εάν ο SS συγχρονιστεί, το MAC επίπεδο πληροφορίες για τη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται.

## Αρχικό Ranging

Όταν συγχρονιστεί με το downlink κανάλι, δέχεται τα DL/UL-MAP και επιχειρεί το αρχικό ranging αποστέλλοντας μήνυμα RNG-REQ προς τον BS με την ελάχιστη ισχύ. Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται στο αρχικό διάστημα του UL-MAP που είναι προκαθορισμένο για μηνύματα RNG-REQ. Εάν δε λάβει απάντηση σημαίνει ότι η ισχύς μετάδοσης είναι μικρή και έτσι επαναλαμβάνει το μήνυμα με υψηλότερη ισχύ. Το RNG-RSP που τελικά θα λάβει από τον BS, μπορεί είτε να περιλαμβάνει διορθώσεις στην ισχύ και στον χρόνο, είτε να δηλώνει επιτυχία. Στην περίπτωση που περιλαμβάνει διορθώσεις, ο SS προβαίνει σε αυτές και επαναμεταδίδει το διορθωμένο RNG-REQ.

## Διαπραγμάτευση δυνατοτήτων

Μετά από το επιτυχημένο αρχικό ranging, ο SS στέλνει στον BS τις δυνατότητες του σε όρους διαμόρφωσης που υποστηρίζει, σχημάτων κωδικοποίησης και μεθόδους duplexing. Υπό τις παρούσες δυνατότητες του SS, ο BS μπορεί να αποδεχθεί ή να απορρίψει τον SS.

## Αυθεντικοποίηση

Σε αυτό το στάδιο, ο BS αυθεντικοποιεί τον SS. Αυτό γίνεται αφού ο SS αποστείλει την X.509 προδιαγραφές του στον BS μαζί με μια περιγραφή των υποστηριζόμενων κρυπτογραφικών μεθόδων που χρησιμοποιεί. Στη συνέχεια, ο BS αξιολογεί τον SS και αποστέλλει την αυθεντικοποίηση στον SS, μαζί με το κλειδί που θα χρησιμοποιήσει στις επόμενες συναλλαγές. Κατά τη διάρκεια τη σύνδεσης, ο SS περιοδικά επαναλαμβάνει τη διαδικασία αυθεντικοποίησης και ανταλλαγής κλειδιού για λόγους ασφαλείας.

## Εγγραφή

Μετά τη επιτυχημένη διαδικασία αυθεντικοποίησης, ακολουθεί η διαδικασία εγγραφής του SS στο δίκτυο. Ο SS στέλνει μήνυμα αίτησης εγγραφής στον BS και ο BS αποκρίνεται στο αίτημα αυτό. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο BS ενημερώνεται από τον SS για διάφορες παραμέτρους όπως την IP έκδοση που χρησιμοποιεί, αν υποστηρίζει CRC και ARQ.

## IP συνδεσιμότητα

Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο την απόκτηση IP διεύθυνσης για τον SS. Ο SS χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο DHCP για να πάρει διεύθυνση όπως και να ενημερωθεί για διάφορες παραμέτρους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας TFTP αποκτά λειτουργικές πληροφορίες.

## Διαδικασία δημιουργίας συνδέσεων

Σε αυτό το σημείο, ο SS είναι έτοιμος να δημιουργήσει με τον BS συνδέσεις για την ανταλλαγή δεδομένων.



### 3.6 Θέματα ασφάλειας στο IEEE 802.16

Κάθε τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης και ιδιαιτέρως αυτήν που προσφέρει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης, θα πρέπει εμπεριέχει ισχυρά πρωτόκολλα ασφαλείας, τα οποία εγγυώνται στους χρήστες ασφάλεια και εμπιστοσύνη για τις συναλλαγές τους. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχουν μηχανισμοί που θα αποτρέπουν τους κακεντρεχείς χρήστες να εισέλθουν στο δίκτυο και να υποκλέψουν πόρους. Το WiMax χρησιμοποιεί έναν αριθμό από πολύ ανθεκτικούς αλγορίθμους για να αποτρέψει τα παραπάνω φαινόμενα. Σε κάθε SS είναι εγκατεστημένη μια ψηφιακή πιστοποίηση X.509 από τον κατασκευαστή όπως και η πιστοποίηση του ίδιου του κατασκευαστή. Οι πιστοποιήσεις αυτές αποστέλλονται στον BS και χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ της MAC διεύθυνσης του SS και του δημοσίου του κλειδιού Rivest-Shamir-Adleman (RSA).

Ο BS αξιολογεί τις πιστοποιήσεις που έχει δεχθεί από τον SS και καθορίζει από αυτές, το επίπεδο πρόσβασης του SS στο δίκτυο. Στην περίπτωση που ο SS είναι εξουσιοδοτημένος να εισέλθει στο δίκτυο, τον αυθεντικοποιεί περιλαμβάνοντας στην απάντηση του και ένα κλειδί αυθεντικοποίησης (Authorization Key, AK), το οποίο είναι κρυπτογραφημένο με το δημόσιο κλειδί του SS. Περιοδικά ο SS ανανεώνει αυτή την πληροφορία για λόγους ασφαλείας.

Κατά τη διάρκεια των συναλλαγών, το IEEE 802.16 εγγυάται την μυστικότητα των δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Private Key Management (PKM). Το PKM στηρίζεται στις πιστοποιήσεις X.509 και στην κρυπτογράφηση RSA για την αυθεντικοποίηση. Τα δεδομένα κρυπτογραφούνται χρησιμοποιώντας τουλάχιστον 56 bits στη μέθοδο κρυπτογράφησης Data Encryption Standard (DES), ενώ τα κλειδιά ανταλλάσσονται χρησιμοποιώντας το 3DES. Τέλος τα μηνύματα του PKM πρωτοκόλλου, πιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο Hashed Message Authentication Code (HMAC).

Συνεπώς, σε αυτή την εποχή δεύτερης γενιάς της επικοινωνίας του 802.16 στο WiMax, Για αυτόν το σκοπό θα είστεται να διατίθεται μια μηχανική εκφραστή την να μελετήσει. Επιλέγεται, λοιπόν, μιας από τις διαδικασίες επιλογής της Voice over Internet Protocol (VoIP). Το VoIP δύναται να έχει άσχημα με την αποδοτικότητα της προσέλευσης σε κατεύθυνση διεύρυνσης που με τη σειρά του στοιχειώνειν αυτό μέτρο.

Έπειτα, βοηθούμε ταύτοχρονα να μετατίθεται τη συμπεριφορά και την απόδοση του WiMax, όπως χαρίζεται ως ένας μεταρρυθμιστικός τοπού του VoIP μέσω μεταστήσεως μηχανικής φόρτου του δικτύου. Η λήψη λόγω αυτής που είναι να επιτύχει τίνα να ελέγχουν τη συμπεριφορά του WiMax σε αποτέλεσμα

#### 4. Απόδοση WiMax

Το WiMax όπως είδαμε εξ αρχής είναι ένα σύγχρονο πρότυπο επικοινωνίας που επιτρέπει στους χρήστες του, ασύρματη πρόσβαση σε πολύ υψηλές ταχύτητες και σε μεγάλες αποστάσεις. Για παράδειγμα στην περίπτωση των προτύπων 802.16a/d μπορούμε να απολαμβάνουμε ταχύτητες πρόσβασης που φθάνουν μέχρι τα 75 Mbps και σε αποστάσεις μέχρι και 50 χιλιόμετρα συναρτήσει, βέβαια, με την ισχύ και το ύψος της κεραίας. Παρότι αυτοί οι ρυθμοί μετάδοσης είναι πολύ δελεαστικοί, η τάξη τους είναι συγκρινόμενοι με τους ρυθμούς μετάδοσης που επιτυγχάνουμε με τεχνολογίες όπως το xDSL. Για παράδειγμα στο ADSL2+ μπορούμε να έχουμε ταχύτητες πρόσβασης που φθάνουν θεωρητικά τα 24 Mbps. Η ταχύτητα μετάδοσης που επιτυγχάνεται εξαρτάται από την απόσταση από το DSLAM και από την ποιότητα της γραμμής.

Το γεγονός αυτό, δηλαδή των παρεμφερών ταχυτήτων μετάδοσης στις τεχνολογίες DSL και WiMax είναι ικανό να αποτρέψει επιχειρήσεις που έχουν ήδη επενδύσει σε τεχνολογία DSL, να εγκαταλείψουν αυτή την τεχνολογία και να στρέψουν το ενδιαφέρον τους στο WiMax. Ένας από τις αιτίες που μπορούμε να δώσουμε τα κατάλληλα κίνητρα στους ιδιώτες να στραφούν σε αυτή την τεχνολογία είναι η παροχή υπηρεσιών του WiMax. Το QoS ήταν ανέκαθεν ένα από τα μακρινά όνειρα στο Διαδίκτυο και έτσι κατά καιρούς έχουν γίνει προσπάθειες για να αναπτύξουμε μηχανισμούς παροχής υπηρεσιών, είτε μέσω χρήσης υλισμικού (για παράδειγμα στους δρομολογητές) είτε με τη δημιουργία αλγόριθμων. Ωστόσο το κλασσικό Διαδίκτυο δεν προσφέρει QoS και ο βασικότερος λόγος είναι ότι πολυπλέκοντας τους χρήστες από τη μία, δεν τους δίνουμε τη δυνατότητα να χαίρονται εγγυήσεων στις επικοινωνίες τους, αλλά από την άλλη δημιουργούμε οικονομίες κλίμακας.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του WiMax είναι ότι κάνει την καλύτερη χρήση ενός τόσο δύσκολου μέσου όπως είναι το ασύρματο και επιπλέον είναι ικανό να προσφέρει QoS, μιας και αυτό βρίσκεται εκ φύσεως μέσα στο πρότυπο. Συνεπώς σε αυτή την εργασία θελήσαμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του QoS στο WiMax. Για αυτόν το σκοπό θα έπρεπε να διαλέξουμε μια συγκεκριμένη εφαρμογή για να μελετήσουμε. Επιλέξαμε, λοιπόν, ίσως μία από τις δημοφιλέστερες εφαρμογές, το Voice over Internet Protocol (VoIP). Το VoIP δεν είναι κάπι ιδιαίτερο ως έννοια, απλά είναι η μετατροπή της φωνής σε πακέτα δεδομένων που με τη σειρά τους ταξιδεύουν στο δίκτυο.

Έτσι, θεωρήσαμε πολύ ενδιαφέρον να μελετήσουμε τη συμπεριφορά και την απόδοση του WiMax, όταν χειρίζεται ροές δεδομένων από εφαρμογές τύπου VoIP υπό καταστάσεις υψηλού φόρτου του δικτύου. Με λίγα λόγια αυτό που θέλουμε να επιτύχουμε είναι να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του WiMax σε εφαρμογές

VoIP, όταν το δίκτυο είναι αρκετά φορτωμένο. Ο λόγος που το VoIP είναι κατάλληλη προς έλεγχο εφαρμογή, είναι ότι είναι πολύ ευαίσθητη σε καθυστερήσεις των πακέτων (delay) και σε μεγάλες διακυμάνσεις της καθυστέρησης (jitter) των πακέτων. Υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο στην καθυστέρηση που μας επιτρέπει να μην την αντιλαμβανόμαστε όταν συνομιλούμε. Αυτό το όριο είναι τα 250ms. Όταν η καθυστέρηση ξεπερνά αυτό το όριο, οι συνθήκες συνομιλίας δυσχεραίνουν, αφού αυτές οι καθυστερήσεις αρχίζουν και γίνονται αισθητές από τον άνθρωπο. Ακόμα, όμως και στην περίπτωση που η καθυστέρηση είναι μικρή αλλά το jitter είναι μεγάλο, υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθούν προβλήματα στη συνομιλία. Ο λόγος είναι, ότι αν η διακύμανση είναι μεγάλη θα πρέπει να ενταμιεύουμε τα πακέτα για να μπορούμε να τα μεταδίδουμε με σωστό τρόπο τα δεδομένα. Ο σημαντικότερος όμως λόγος είναι ότι ακόμα και η σιωπή είναι τρόπος έκφρασης σε μια τηλεφωνική συνομιλία. Έτσι αν τα πακέτα έχουν μεγάλη διακύμανση, αλλάζει η έννοια της σιωπής με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να μεταδώσουμε το ίδιο εννοιολογικώς μήνυμα.

Εφόσον έχουμε αποφασίσει ότι ο στόχος μας είναι να αναλύσουμε την απόδοση του WiMax σε σχέση με το VoIP, έχουμε τρία βασικά βήματα μέχρι να επιτύχουμε το στόχο μας:

- Επιλογή του κατάλληλου λογισμικού που θα υλοποιεί με ορθό και αποδοτικό τρόπο το πρότυπο IEEE 802.16. Επίσης, το λογισμικό για να είναι πληρέστερο θα πρέπει να υλοποιεί τα περισσότερα και σημαντικότερα σημεία του προτύπου
- Καθορισμός του τρόπου που θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό έτσι ώστε να υλοποιήσουμε την εφαρμογή του VoIP
- Σχεδιασμός και υλοποίηση κατάλληλου σεναρίου προσομοίωσης έτσι ώστε να πάρουμε ορθά και ενδιαφέροντα προς την επιστημονική κοινότητα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο καθορισμός των μεγεθών που είναι ενδιαφέροντα για μέτρηση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

## 4.1 Επιλογή λογισμικού

Το λογισμικό που θα επιλέγαμε, θα θέλαμε να υλοποιεί με τον καλύτερο τρόπο το πρότυπο του WiMax, σύμφωνα με τα κριτήρια που παραθέσαμε προηγουμένως, έτσι ώστε να το τοποθετήσουμε στον προσομοιωτή και να πάρουμε τα αποτελέσματά μας. Εξαρχής είχαμε τέσσερις βασικές επιλογές αναφορικά με την επιλογή του καταλληλότερου λογισμικού (module):

- Το module του εθνικού ίνστιτούτου προτύπων και τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology, NIST). Το module αυτό είναι πολύ καλογραμμένο και εμπεριστατωμένο, αλλά θα έπρεπε να απορριφθεί λόγω του ότι δεν υλοποιούσε τις ροές υπηρεσιών (service flow) και το QoS που βασικά μας ενδιέφερε.
- Το module του προηγμένου ίνστιτούτου επιστήμης και τεχνολογίας της Κορέας (Korean Advanced Institute of Science and Technology, KAIST). Και αυτό όμως το module θα έπρεπε να απορριφθεί μιας και υλοποιούσε μόνο best effort υπηρεσίες και έτσι ήταν ακατάλληλο για την μελέτη μας.
- Το WiMax module της OPNET. Και αυτή η λύση απορρίφθηκε, αλλά για άλλο λόγο. Το βασικό πρόβλημα με αυτό το λογισμικό είναι ότι χρησιμοποιούσε έναν εμπορικό προσομοιωτή. Επειδή θέλαμε τα αποτελέσματά μας να είναι εύκολα ελέγχιμα από την επιστημονική κοινότητα, δε θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν εμπορικό προσομοιωτή.
- Το module του εργαστηρίου δικτύων και κατανεμημένων συστημάτων (Networks & Distributed Systems Laboratory, NDSL) του τμήματος επιστήμης υπολογιστών, του πανεπιστημίου του Chang Gung. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του λογισμικού σε σχέση με τα προηγούμενα είναι ότι είχε υλοποιημένο τον μηχανισμό του QoS και έτσι ήταν το καταλληλότερο για την εργασία μας.

### Χαρακτηριστικά του NDSL Module

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του NDSL module είναι ότι αποτελεί ένα κομμάτι λογισμικού που τοποθετείται πάνω στον Network Simulator-2 (ns-2), ένα εργαλείο προσομοίωσης που είναι πολύ δημοφιλές στους πανεπιστημιακούς κύκλους. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματά μας θα ήταν ακόμα πιο εύκολα ελέγχιμα για την ορθότητά τους από κάθε ενδιαφερόμενο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα με το ns-2 είναι ότι είναι open source και έτσι μας επιτρέπει να αλλάζουμε στοιχεία και παραμέτρους του προσομοιωτή κατά βούληση.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα αναφορικά με το NDSL module ήταν ότι υλοποιούσε όλες τις λειτουργίες του υποεπιπέδου σύγκλισης (Convergence Sublayer) και του κοινού υποεπιπέδου (Common Part Sublayer), δίνοντας μας επιπλέον την δυνατότητα να έχουμε ασφάλεια και αυθεντικοίση στις συναλλαγές μας. Ωστόσο, ο βασικότερος λόγος που το επιλέξαμε είναι ότι υλοποιούσε και τις πέντε κλάσεις παροχής υπηρεσιών: UGS, rtPS, ertPS, nrtPS, BE. Έτσι, θα μπορούσαμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του VoIP σε συνδυασμό και με άλλες εφαρμογές που χρησιμοποιούσαν άλλες υπηρεσίες.

Ένα από τα χαρακτηριστικά του module είναι ότι για το κομμάτι του χρονοπρογραμματιστή (Scheduler) χρησιμοποιούσε έναν αλγόριθμο εκ περιτροπής με γύρους και βάρη (Weighted Round Robin) και έτσι έδινε μεγαλύτερη προτεραιότητα στο UGS από ότι στο rtPS κ.ο.κ. επιτρέποντας ταυτόχρονα στην υπηρεσία BE να λαμβάνει τουλάχιστον ένα μικρό κομμάτι από το bandwidth. Όσο αφορά το Call Admission Control, υλοποιούσε ένα πολύ απλό αλγόριθμο του τύπου: «αν υπάρχει διαθέσιμο bandwidth, επιτρέπω στον Suscriber station να συνδεθεί και να αποστείλει ή να δεχθεί δεδομένα». Η υλοποίηση ενός τόσο απλού μηχανισμού Call Admission Control έχει τα θετικά του και τα αρνητικά του. Έχει το πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά απλός και έτσι δεν υπεισερχόμαστε σε πολλές λεπτομέρειες, αλλά από την άλλη δεν είναι ο καταλληλότερος για να προβλέψουμε μελλοντική ζήτηση bandwidth.

#### 4.2 Δημιουργία VoIP στο NDSL Module

Το επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να δημιουργήσουμε μια εφαρμογή VoIP στο module. Η λύση είναι πολὺ απλή. Δεδομένου ότι η κλάση υπηρεσίας ertPS μας δίνει εγγυήσεις και για το jitter σε σχέση με τις υπόλοιπες (εκτός της UGS), την καθιστά καταλληλότερη από τις υπόλοιπες για εφαρμογές VoIP. Εδώ είμαστε τυχεροί και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απευθείας την κλάση ertPS μιας και είναι υλοποιημένη από το module. Ένα θετικό στοιχείο με την κλάση ertPS του NDSL module, είναι ότι είναι υλοποιημένη ως μια ON/OFF πηγή παραγωγής δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε χρονικό διάστημα είτε:

- βρισκόμαστε σε κατάσταση ομιλίας και έτσι αποστέλλονται δεδομένα, είτε:
  - βρισκόμαστε σε κατάσταση σιωπής και έτσι δεν αποστέλλονται δεδομένα

Το πλεονέκτημα αυτής της πηγής δεδομένων είναι ότι μπορούμε να κάνουμε επιπλέον συμπίεση δεδομένων και έτσι να εξοικονομήσουμε ρυθμό μετάδοσης.

Επίσης το NDSL module μας δίνει εγγυήσεις για τις παραμέτρους της μετάδοσης που μας ενδιαφέρουν:

- Η μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση είναι 50 ms (delay < 50 ms)
  - Η μέγιστη διακύμανση της καθυστέρησης είναι μικρότερη από 30 ms (jitter < 30 ms)
  - Ενώ ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 8 Kbps έως 64 Kbps που είναι αρκετό για VoIP εφαρμογή

Επίσης, το ertPS έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα από τις nrtPS και BE κάτι βέβαια επιθυμητό.



### 4.3 Προκλήσεις σχετικά με το NDSL Module

Το NDSL module εξαρχής φαινόταν να ήταν το πιο ολοκληρωμένο λογισμικό από όλα τα άλλα. Υλοποιούσε σχεδόν όλες τις λειτουργίες του CPS και CS και επιπλέον υλοποιούσε και το QoS, που ήταν το ζητούμενο. Ωστόσο, η κατάληξη δεν ήταν τόσο ευοίωνη όσο αρχικά φαινόταν ότι θα ήταν. Ο λόγος ήταν ότι το λογισμικό είχε μια πληθώρα από λάθη και από προγραμματιστικά σφάλματα, με αποτέλεσμα η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων να περιορίζεται τόσο που να φθάνει σε επίπεδα αχρηστίας.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα με NDSL module, ήταν πρόβλημα μνήμης. Η δέσμευση μνήμης που έκανε το λογισμικό, ήταν τέτοια που δεν μας επέτρεψε να πάρουμε αποτελέσματα για μεγάλες τιμές των διαφόρων παραμέτρων. Είναι χαρακτηριστικό ότι για να διενεργήσουμε μόλις έξι δευτερόλεπτα προσομοίωσης με 32 Subscriber Stations, θα έπρεπε να καταναλώσουμε 320 MB μνήμης! Ένα εξωφρενικά μεγάλο μέγεθος μνήμης. Αυτό το πρόβλημα, μας περιόριζε σε μικρά πειράματα και έτσι αυτό είχε ως συνέπεια να μην μπορούμε να εξάγουμε αξόλογα αποτελέσματα, αφού τα πειράματά μας θα έπρεπε να διαρκούν ένα εύλογο χρονικό διάστημα για να καθιστούν αξιόπιστα.

Το παραπάνω πρόβλημα, είναι πραγματικά λεπτομέρεια σε σχέση με αυτά που συναντήσαμε στην πορεία. Ένα από αυτά είναι ότι η διαδικασία του κατακερματισμού (fragmentation) των πακέτων γινόταν πάντα σε ένα πολύ μικρό μέγεθος πακέτου, τα 108 bytes, παρότι το πρότυπο ορίζει ως μέγιστο μέγεθος πακέτου τα 2KB. Έτσι, μεγάλα πακέτα θα έπρεπε να σπάσουν σε πολλά μικρότερα. Το fragmentation και το defragmentation είναι με λίγα λόγια η εξής διαδικασία: όταν φθάνουν πακέτα από το επίπεδο δικτύου στο επίπεδο ζεύξης, το μέγιστο επιτρεπτό μέγεθος του πακέτου που επιτρέπεται να περάσει από το δίκτυο μπορεί να είναι μικρότερο από το μέγεθος του πακέτου που μόλις παρελήφθη. Έτσι αυτό το πακέτο πρέπει να σπάσει σε μικρότερα για να μπορέσει να ταξιδεύσει στο δίκτυο. Όταν φθάσει στον παραλήπτη, θα πρέπει να επανασυγκροτηθεί και έτσι να επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση.

Βέβαια το γεγονός ότι το fragmentation γινόταν σε μικρό μέγεθος, δεν αποτελεί από μόνο του πρόβλημα. Όμως, το λογισμικού στερούσε από την λειτουργία της επανασυγκρότισης (defragmentation)! Επομένως, τα πακέτα διαιρούταν σε μικρότερα στον αποστολέα, όμως στο παραλήπτη δεν επανασυγκροτούντουσαν. Έτσι ο παραλήπτης, είχε την εντύπωση ότι λάμβανε πολύ λιγότερα πακέτα από όσα πραγματικά εστάλησαν. Αν για παράδειγμα, ο αποστολέας έσπαγε το αρχικό πακέτο σε ένα αριθμό από μικρότερα πακέτα, τότε ο παραλήπτης λάμβανε μόνο το πρώτο, αφού αυτό είχε τη σωστή επικεφαλίδα και θα αγνοούσε τα υπόλοιπα. Αυτό είχε ως συνέπεια, να προκύπτουν πλασματικοί αριθμοί σε σχέση με την

απώλεια πακέτων που σε καμία περίπτωση δε συμφωνούσε με την πραγματικότητα.

Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πρόβλημα που συναντήσαμε στην πορεία είναι σε σχέση με την υπηρεσία Best Effort. Κάποια στιγμή αντιληφθήκαμε ότι η BE δεν ήταν υλοποιημένη ως έπρεπε. Με άλλα λόγια θέλουμε να πούμε ότι δεν είχε την πραγματική έννοια του best effort. Για παράδειγμα στο TCP/IP, γνωρίζουμε ότι αρχικά ξεκινούμε να αποστέλλουμε δεδομένα περνώντας αρχικά από την κατάσταση του slow start, στη συνέχεια αυξάνουμε τον ρυθμό μέχρι να γίνει η πρώτη απώλεια πακέτου, μειώνουμε τον ρυθμό, τον ξαναυξάνουμε κ.ο.κ. Σε κάθε περίπτωση κάνουμε ότι καλύτερο μπορούμε σε σχέση και με την κατάσταση του δικτύου από θέμα συμφόρησης. Το BE στο NDSL module δεν είχε την ίδια έννοια. Αντιθέτως, σε σταθερά χρονικά διαστήματα αποστέλλαμε μεταβλητού μεγέθους δεδομένα. Δηλαδή, ουσιαστικά ήταν υλοποιημένη σαν nrtPS, αλλά με μικρότερη προτεραιότητα. Επομένως, για να υπερκεράσουμε το πρόβλημα θα έπρεπε να δημιουργήσουμε μια δική μας υλοποίηση BE.

Ένα άλλο από τα προβλήματα ήταν ότι κάθε SS ξεκινούσε την αποστολή των δεδομένων, πριν ακόμα επιτύχει στο στάδιο της εισαγωγής στο δίκτυο. Έτσι για τα πρώτα δευτερόλεπτα, όσα πακέτα έστελνε ο SS, ήταν χαμένα αφού ακόμα δεν είχε πρακτικά συμμετέχει στο δίκτυο. Αυτό το γεγονός και πάλι δημιουργούσε πλασματικές απώλειες, μιας και αυτά τα πακέτα δε χανόντουσαν από συμφόρηση αλλά από λανθασμένη υλοποίηση των SS.

Έτσι λοιπόν, το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα αυτής της εργασίας αναλώθηκε στο να επιχειρήσουμε να διορθώσουμε αυτό που οι περισσότεροι θα θεωρούσαν ως ο ορισμός του άναρχου κώδικα (Spaghetti Code). Χαρακτηρίζουμε έτσι των κώδικα για πολλούς λόγους. Καταρχήν, δεν τηρούσε καμία από τις αρχές προγραμματισμού μιας οντοκεντρικής γλώσσας, παρότι ήταν γραμμένο σε μια από αυτές (C++). Ο οντοκεντρικός προγραμματισμός επιβάλει το πρόγραμμά μας να είναι χωρισμένο σε κλάσεις, όπου κάθε κλάση επικοινωνεί με την άλλη μέσω μεθόδων που θεωρούμε ότι προσφέρει κάποια είδους υπηρεσία, αποκρύπτοντας τις λεπτομέρειες υλοποίησης από τον «πελάτη». Στο συγκεκριμένο λογισμικό, ουσιαστικά είχαμε μόνο μια κλάση και έτσι είχαμε μια σειρά από 3.000 γραμμές κώδικα με πλήρη αναρχία: οι μέθοδοι, οι συναρτήσεις και οι μεταβλητές ήταν όλες μπερδεμένες μεταξύ τους, με συνέπεια πολλές από τις προσπάθειες συμμόρφωσης του κώδικα να πέφτουν στο κενό.

Επίσης, χαρακτηριστικό είναι το γεγονός, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις δεν χρησιμοποιούνταν ούτε καν μεταβλητές, αλλά αριθμοί (magic numbers). Για να αντιληφθούμε λίγο καλύτερα το πόσο μπορεί να δυσκολεύσουν αυτές οι πρακτικές την κατανόηση ενός κώδικα, θα παραθέσουμε το εξής γεγονός: υπάρχουν κάποια σημεία του κώδικα όπου γίνεται διαίρεση μια μεταβλητής με ένα αριθμό το 200. Το θέμα είναι να βρεθεί η κατάλληλη φαντασία για να

αντιληφθεί κάποιος τα ακριβώς εκφράζει αυτό το 200. Έτσι, λοιπόν κάποια στιγμή αντιληφθήκαμε ότι αυτό το 200, πρέπει να εκφράζει το μέγεθος του πακέτου. Πιθανότατα, αρχικά οι συγγραφείς του λογισμικού, είχαν θεωρήσει ότι τα πακέτα είχαν σταθερό μέγεθος ίσο με 200 και στη συνέχεια, αφού δούλεψε το λογισμικό, αμελήσαν να διορθώσουν αυτό το νούμερο. Έτσι, θα έπρεπε να ψάξουμε σε πέντε με δέκα διαφορετικά σημεία του κώδικα για διορθώσουμε το λάθος.

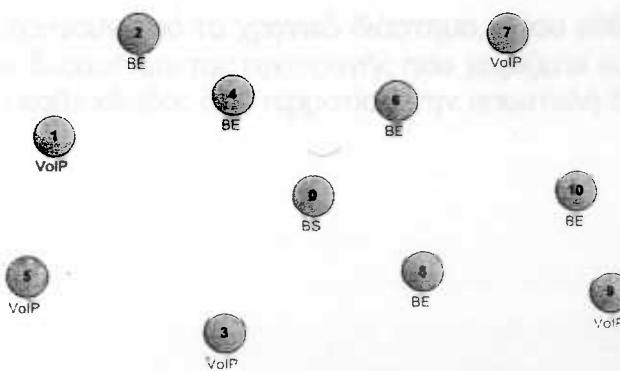
Ένα ακόμα εντυπωσιακό χαρακτηριστικό της αναρχίας γραφής του λογισμικού, είναι ότι υπήρχαν μέχρι και ολόκληρες κλάσεις που δεν χρησιμοποιούταν. Και πάλι μια λογική εξήγηση, είναι ότι αρχικά τις χρησιμοποιούσαν και όταν εγκατέλειψαν τη χρήση τους, ξέχασαν να τις διαγράψουν, με αποτέλεσμα να παραμείνουν στο λογισμικό.

Πριν παραθέσουμε ένα τελευταίο πρόβλημα που συναντήσαμε στο NDSL module, ας εξηγήσουμε πώς περίπου δουλεύει ο network simulator για να μπορέσουμε καλύτερα να αντιληφθούμε την αναρχία στο τρόπο γραφής. Για να προγραμματίσουμε στο ns, χρησιμοποιούμε τη γλώσσα προγραμματισμού tcl, η οποία χρησιμοποιεί έναν μεταφραστή για να επικοινωνήσει απευθείας με προγράμματα C++. Όσες μεταβλητές επιτρέπουμε να φαίνονται από τη tcl, μπορούμε να το δηλώσουμε με κατάλληλο τρόπο στη C++. Είναι καλή προγραμματιστική πρακτική, να επιτρέπουμε σε αρκετές μεταβλητές και μεθόδους να φαίνονται από τη tcl, γιατί μπορούμε να τις καλούμε και να θέτουμε τιμές κατά τη διαδικασία της εκτέλεσης του tcl κώδικα. Το πρόβλημα με το NDSL module, είναι ότι δεν άφηνε καμία μεταβλητή και καμία μέθοδο να είναι ορατή από tcl, και έτσι κάθε φορά που θέλομε να πειράξουμε μια μεταβλητή για debugging ή για να δούμε τις διαφορές στα αποτελέσματα, θα έπρεπε να μπούμε στο κώδικα της C++, να κάνουμε τις αλλαγές, να ξανακάνουμε compile το λογισμικό και να δούμε τις αλλαγές. Μια τέτοια διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα, με συνέπεια να περιορίζει τις προσπάθειες μας για debugging.



#### 4.4 Σενάρια Πειραμάτων

Μετά από αυτή την πληθώρα των προβλημάτων που συναντήσαμε, εξαιρώντας βέβαια όσα προβλήματα δεν έχουμε ακόμα συναντήσει, έχουμε δύο βασικές επιλογές: η μία είναι να πετάξουμε το λογισμικό και να γράψουμε το δικό μας WiMax module και η δεύτερη είναι να δημιουργήσουμε κατάλληλη σενάριο πειράματος. Η πρώτη λύση, θα πρέπει να αποκλειστεί γιατί απαιτεί διπλάσιο χρόνο από αυτόν που είχαμε εξαρχής για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Άρα, θα καταφύγουμε στη δεύτερη λύση. Θα επιχειρήσουμε να δημιουργήσουμε ένα σενάριο, που όσο γίνεται περισσότερο, θα αποφεύγει τα προβλήματα του κώδικα, έτσι ώστε να πάρουμε όσο περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα γίνεται, αδιαφορώντας για τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων μας. Έτσι, λοιπόν, δημιουργήσαμε το παρακάτω σενάριο:



**Εικόνα 4.1:** Παράδειγμα του βασικού σεναρίου mixed mode. Οι SS είναι τυχαία κατανεμημένη στο χώρο, ο οποίος διαχειρίζεται από έναν BS. Κάθε SS τρέχει είτε μια εφαρμογή VoIP, είτε εφαρμογή από μία από τις άλλες υπηρεσίες.

- **Mixed Mode:** στο πείραμα αυτό κάθε ένας SS έχει την επιλογή είτε να τρέξει μια εφαρμογή VoIP χρησιμοποιώντας την υπηρεσία ertPS, είτε να τρέξει μια άλλη εφαρμογή χρησιμοποιώντας μία, συγκεκριμένη κάθε φορά, από τις υπόλοιπες υπηρεσίες. Έτσι σε κάθε χρονικό διάστημα υπάρχει ίσος αριθμός από SSs που τρέχουν VoIP και ίσος αριθμός SSs που τρέχουν εφαρμογή από τις υπόλοιπες υπηρεσίες
- **Single Mode:** στο πείραμα αυτό επιτρέπουμε μόνο σε έναν SS να τρέχει εφαρμογή VoIP και όλοι οι υπόλοιποι τρέχουν εφαρμογές από τις άλλες υπηρεσίες, την ίδια κάθε φορά

Όλογος που θεωρήσαμε αυτά τα δύο είδη πειράματα, είναι ότι θα θέλαμε να διακρίνουμε σε ποια περίπτωση από τις δύο θα πιεστεί περισσότερο το VoIP.

Ο βασικός περιορισμός του σεναρίου είναι ότι θα πρέπει σε κάθε υπηρεσία να χρησιμοποιήσουμε το UDP πρωτόκολλο. Ο λόγος είναι ότι αφενός το BE δεν έχει τη σωστή έννοια ώστε να χρησιμοποιήσουμε το TCP και αφετέρου, σε άλλες περιπτώσεις το NDSL module έκανε packing τις επιβεβαιώσεις μαζί με τα δεδομένα με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διαχωριστούν και σε άλλες, η απουσία του defragmentation θεωρούσε πολλές από τις επιβεβαιώσεις λανθασμένες.

Προχωρώντας τώρα στο σενάριο, θεωρούμε ότι κάθε ένας SS ξεκινά να μεταδίδει σε τυχαίο χρονικό σημείο καθορισμένο από ένα αρχικό διάστημα. Έτσι μετά από κάποια δευτερόλεπτα, όλοι οι SSs θα πρέπει να είχαν ξεκινήσει την αποστολή των δεδομένων σε τυχαίο χρονικό σημείο. Όλογος που προσθέσαμε τυχαιότητα στην έναρξη της αποστολής δεδομένων, όπως και στην απόσταση των SSs από τον σταθμό βάσης, είναι ότι θέλαμε να προσδώσουμε μεγαλύτερη εγκυρότητα στα αποτελέσματά μας.

Οι μετρήσεις ξεκινούν από το χρονικό διάστημα, όπου κάθε SS έχει ξεκινήσει την αποστολή των δεδομένων της εφαρμογής που χειρίζεται και σταματά στο χρονικό διάστημα πού κάθε κόμβος έχει τερματίσει την αποστολή δεδομένων.

## 4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

### 4.5.1 Παράμετροι Προσομοίωσης

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση για το MAC επίπεδο και για το φυσικό είναι αυτές που χρησιμοποιούνται εξορισμού από το NDSL module. Τις παραθέτουμε στον παρακάτω πίνακα:

Parameters	Value
<b>MAC Layer</b>	
<b>DL/UL ratio</b>	3:2
<b>No. of OFDMA symbols per frame</b>	49
<b>No. of QPSK symbols per frame</b>	48 (data portion)
<b>No. of subchannels</b>	30
<b>CWmin</b>	32 opps
<b>CWmax</b>	1024 opps
<b>Ranging opp. Per Frame</b>	12 OFDMA symbols
<b>Max no. of ranging retry</b>	10
<b>Bandwidth request opp. Per frame</b>	12 OFDMA symbols
<b>Initial ranging CID</b>	0
<b>Basic CIDs</b>	1-1000
<b>Primary CIDs</b>	1001-2000
<b>Transport/secondary mgmt CIDs</b>	2001-65278
<b>Broadcast CID</b>	65535
<b>SFID range</b>	1-4294967295
<b>Physical Layer</b>	
<b>Spectrum</b>	5.0 GHz
<b>Bandwidth</b>	20 MHz
<b>QPSK 1/2</b>	4.99 Mbps
<b>QPSK 3/4</b>	7.48 Mbps
<b>16-QAM 1/2</b>	9.97 Mbps
<b>16-QAM 3/4</b>	14.96 Mbps
<b>64-QAM 2/3</b>	19.95 Mbps
<b>64-QAM 3/4</b>	22.44 Mbps
<b>QPSK 1/2</b>	-79 dBm
<b>QPSK 3/4</b>	-76 dBm
<b>16-QAM 1/2</b>	-72 dBm
<b>16-QAM 3/4</b>	<b>-69 dBm</b>

-65 dBm
-63 dBm

Πίνακας 4.1: Παράθεση των παραμέτρων προσσομοίωσης για το φυσικό και MAC επίπεδο.

Επιπλέον, χρησιμοποιήσαμε και διάφορες παραμέτρους αναφορικά με τα χαρακτηριστικά προσσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι κάθε SS είναι τυχαία κατανεμημένος στο χώρο, χρησιμοποιώντας γεννήτρια ομοιόμορφης κατανομής για την παραγωγή αριθμών. Επίσης, θεωρήσαμε ότι κάθε εφαρμογή, ξεκινά σε ένα τυχαίο χρονικό σημείο, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το σημείο στο οποίο κάθε εφαρμογή θα πρέπει ήδη να έχει ξεκινήσει, έχει οριστεί να είναι τα δύο δευτερόλεπτα. Έτσι ο άξονας του χρόνου, μέχρι αυτό το σημείο, έχει χωριστεί σε ίσα χρονικά διαστήματα, μέσα στα οποία θα ξεκινήσει κάθε εφαρμογή, έχοντας προσθέσει και μια απόκλιση της τάξεως των 50ms. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιούμε γεννήτρια αριθμών ομοιόμορφης κατανομής.

Ο χώρος στον οποίο διαδραματίζεται η προσσομοίωση έχει διαστάσεις 400 x 400 με τον σταθμό βάσης να έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του χώρου (200, 200). Ο συνολικός χρόνος της προσσομοίωσης είναι καθορισμένος στα έξι δευτερόλεπτα. Στον παρακάτω πίνακα, παραθέτουμε συνοπτικά τις παραμέτρους για την προσσομοίωση.

Parameters	Value
Simulation time	6 sec
Max time application started	2 sec
Start point divergence	50 ms
Mode	Single, Mixed
Topology	Random
Dimension	400x400
BS location	(200, 200)
Radio propagation model	Two-ray ground
queue type	Drop Tail (max 50 pkts)
antenna model	Omni-Antenna

Πίνακας 4.2: Παράμετροι προσσομοίωσης

#### 4.5.2 Αποτελέσματα

Υπήρχαν διάφορες παράμετροι που θα μπορούσαμε κάθε φορά να διαφοροποιήσουμε για τη συλλογή των αποτελεσμάτων. Όμως ο αρχικός μας στόχος ήταν να μετρήσουμε την απόδοση του WiMax, σε καταστάσεις υψηλού φόρτου. Επομένως, είναι πολύ λογική η επιλογή να αντιπαραθέσουμε τις τιμές από διάφορες μετρικές όπως η καθυστέρηση και το jitter, με τον αριθμό των

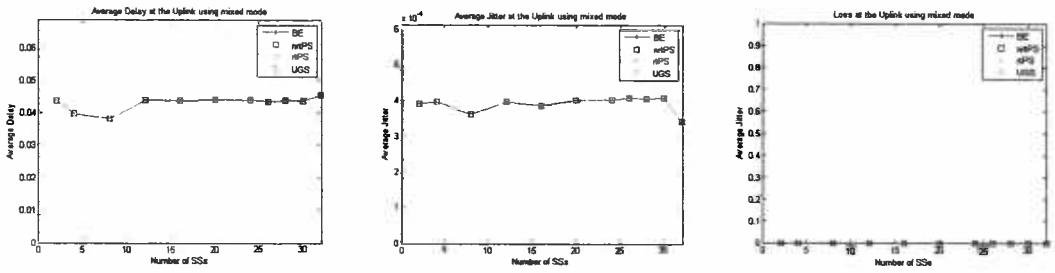
κόμβων. Πράγματι, το να αυξομειώνουμε το χρόνο, δεν θα μπορούσε να μας ωφελήσει, παρά μόνο στην περίπτωση που θα θέλαμε να μεγαλώσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας. Και πάλι, όμως, η μεγάλη κατανάλωση του λογισμικού σε μνήμη, δεν μας επέτρεψε να προχωρήσουμε πολύ στον χρόνο. Επομένως, σε κάθε πείραμά μας ενδιέφερε η μέτρηση απόδοσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση, οι μετρικές που αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε για να ποσοτικοποιήσουμε την απόδοση του WiMax, είναι η καθυστέρηση (delay), η διακύμανση της καθυστέρησης (jitter) και η απώλειες σε πακέτα (loss). Η επιλογή αυτών των μετρικών φαίνεται εύλογη μιας και επηρεάζουν άμεσα την απόδοση εφαρμογών τύπου VoIP και επιπλέον κάθε εφαρμογή (VoIP ή όχι) θεωρήσαμε ότι χρησιμοποιεί το UDP πρωτόκολλο.

Στα πειράματά μας, θα μετρήσουμε την απόδοση του WiMax, σε δύο κατηγορίες από εφαρμογές: μία είναι η απόδοση του VoIP, όταν η «ανταγωνιστική» εφαρμογή χρησιμοποιεί μία από τις υπόλοιπες υπηρεσίες (BE, nrtPS, rtPS, UGS) και η άλλη είναι η απόδοση της ανταγωνιστικής υπηρεσίας, όταν συνυπάρχει με εφαρμογές VoIP. Ο λόγος που μας ενδιαφέρει η απόδοση και της ανταγωνιστικής υπηρεσίας είναι ότι θέλουμε να δούμε και τη συνολική συμπεριφορά του προτύπου, όταν διαχειρίζεται εφαρμογές VoIP.

Τέλος, τα πειράματά μας περιλαμβάνουν τις δύο διαφορετικές συνθήκες συμφόρησης: mixed/single mode, και την ανάλυση στην απόδοση όταν χρησιμοποιούμε το downlink ή το uplink. Βεβαίως, το uplink έχει περισσότερο ενδιαφέρον αφού εκεί υπάρχει ο μηχανισμός polling του WiMax.

## Απόδοση του VoIP

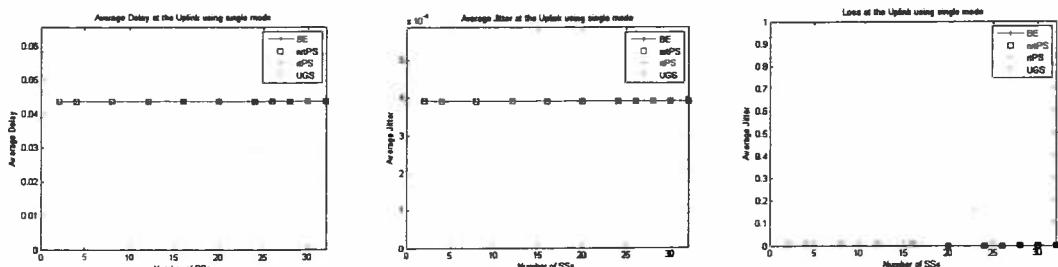
Εξαρχής δηλώσαμε ότι αυτό που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε για το VoIP είναι το delay και το jitter. Ο λόγος είναι ότι αυτή η εφαρμογή είναι πολύ ευαίσθητη σε αυτές τις παραμέτρους και για να δουλέψει αποδοτικά θα πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες απαιτήσεις σε αυτά τα μεγέθη. Επίσης, μας ενδιαφέρει και το loss, αφού υπάρχει περίπτωση να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις, αλλά το loss να μη μας επιτρέπει να έχουμε μια ικανοποιητική συναλλαγή. Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, παρουσιάζουμε την απόδοση του WiMax αναφορικά με το VoIP για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν συναρτήσει του αριθμού των SS που συμμετέχουν στο δίκτυο και του είδους της ανταγωνιστικής υπηρεσίας.



**Εικόνα 4.2:** To delay, jitter και loss για το VoIP στην περίπτωση του mixed mode

Με μια πρώτη ματιά, μπορούμε να πούμε ότι η απόδοση του WiMax, όταν χρησιμοποιεί εφαρμογές VoIP είναι ιδιαίτερως ικανοποιητική, μιας και ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις. Πράγματι, το delay είναι μικρότερο από 50ms, όπως είχε καθοριστεί από το λογισμικό και το jitter είναι της τάξεως των 0.4ms, ενώ το loss είναι μηδενικό σε κάθε περίπτωση. Όμως, αν παρατηρήσουμε πιο διεξοδικά τις γραφικές παραστάσεις, μας προβληματίζει η ομοιότητα των αποτελεσμάτων σε κάθε επιλογή της ανταγωνιστικής υπηρεσίας. Με άλλα λόγια, η απόδοση του WiMax σε delay, jitter και loss είναι ακριβώς η ίδια, ανεξάρτητα από το εάν η ανταγωνιστική υπηρεσία είναι BE ή UGS. Η λογική, επιβάλει ότι όσο πιο απαιτητική είναι η ανταγωνιστική υπηρεσία, τόσο περισσότερα θα είναι τα πακέτα της VoIP, που θα πρέπει να τοποθετηθούν σε ουρές έτσι ώστε να χρειάζεται πιθανώς μερικά από αυτά να καθυστερήσουν και πιθανώς ορισμένα να χαθούν. Αντιθέτως, ανεξαρτήτου ανταγωνιστικής υπηρεσίας, τα αποτελέσματα σε delay, jitter και loss είναι ακριβώς τα ίδια. Αν σε αυτό συμπεριλάβουμε και το φαινόμενο ότι οι τιμές σε αυτές τις μετρικές είναι περίπου οι ίδιες ανεξάρτητα από τον αριθμό των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο, αντιλαμβανόμαστε ότι δεν έχουμε καταφέρει να πιέσουμε αρκετά το δίκτυο. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη νέων κόμβων, κάτι όμως, που δεν μας επιτρέπει να κάνουμε η υλοποίηση του module από το NDSL λόγω της απαίτησης για μνήμη.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε την απόδοση του προτύπου στην περίπτωση της κατηγορίας πειραμάτων single mode:



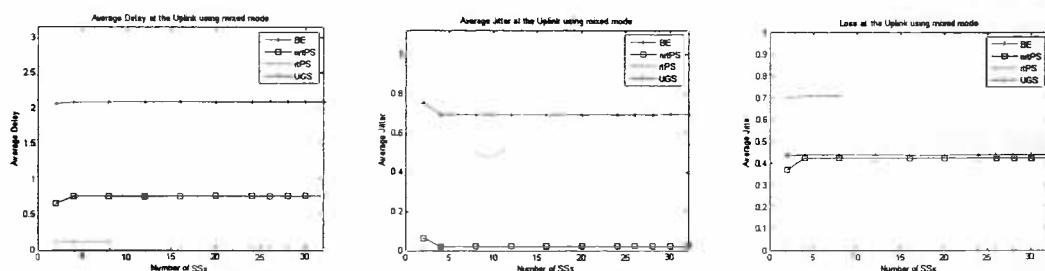
**Εικόνα 4.3:** To delay, jitter και loss για το VoIP στην περίπτωση του single mode

Τα αποτελέσματα σε αυτή την κατηγορία πειραμάτων είναι ακόμα καλύτερα από την προηγούμενη περίπτωση. Ο λόγος είναι ότι εφόσον έχουμε μοναδική εφαρμογή VoIP, αυτή πιέζεται λιγότερο από την περίπτωση όπου συνυπάρχει με παρεμφερείς εφαρμογές. Ωστόσο, τα προβλήματα στα αποτελέσματα που αναφέραμε προηγουμένως, ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση.

Για να μπορέσουμε να έχουμε μια συνολική και πιο πλήρης εικόνα για την απόδοση του WiMax θα πρέπει να δούμε τη συμπεριφορά του προτύπου και στην ανταγωνιστική υπηρεσία, όταν συνυπάρχει με εφαρμογές VoIP.

### Απόδοση της Ανταγωνιστικής Υπηρεσίας

Και σε αυτή την περίπτωση μας ενδιαφέρουν οι ίδιες μετρικές, delay, jitter και loss και ο λόγος είναι ότι μελετούμε εφαρμογές που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο UDP. Τα αποτελέσματα προέρχονται από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις:



**Εικόνα 4.4:** Απόδοση της ανταγωνιστικής υπηρεσίας σε μετρικές delay, jitter και loss στην περίπτωση του mixed mode

Αρχικά, ας μελετήσουμε την πρώτη γραφική παράσταση που αναφέρεται στο delay της ανταγωνιστικής υπηρεσίας. Με την πρώτη ματιά, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο scheduler του NDSL module, διατηρεί τις προτεραιότητες μιας και η καθυστέρηση της εφαρμογής που χρησιμοποιεί την υπηρεσία BE είναι μεγαλύτερη από αυτήν της nrtPS, αυτή είναι μεγαλύτερη από το delay της rtPS και η τελευταία με τη σειρά της μεγαλύτερη από την καθυστέρηση της UGS, που είναι μηδενική. Όμως αν παρατηρήσουμε πιο προσεκτικά τις γραφικές παραστάσεις, εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι το delay στις περισσότερες υπηρεσίες και ιδιαίτερα στην BE, είναι υπερβολικά μεγάλο, της τάξης των 2 sec, αν αναλογιστούμε ότι ο χρόνος προσομοίωσης σε κάθε περίπτωση είναι 6 sec.

Ωστόσο, αυτό δεν είναι το σημαντικότερο πρόβλημα με τα αποτελέσματα της ανταγωνιστικής υπηρεσίας. Ας πάρουμε για παράδειγμα την τελευταία γραφική παράσταση που αναφέρεται στο loss, και ας παρατηρήσουμε τις τιμές για την

υπηρεσία BE. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των SS που συμμετέχουν στο δίκτυο, το loss είναι σταθερό, ίσο με 43% περίπου. Το αποτέλεσμα αυτό, δημιουργεί ερωτηματικά για δύο κυρίως λόγους. Ο ένας είναι ότι δεν παρατηρούμε, διαφοροποίηση στα αποτελέσματα (και για τις τρεις μετρικές), όσο προσθέτουμε κόμβους στο δίκτυο, γεγονός ιδιαιτέρως περίεργο αφού υποτίθεται ότι όσο προσθέτουμε SS, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ανάγκες για bandwidth και έτσι σε μια υπηρεσία όπως το BE, χωρίς εγγυήσεις, τόσο περισσότερα θα πρέπει να είναι τα πακέτα που είτε καθυστερούν, είτε/και χάνονται. Αντιθέτως, εδώ δεν παρατηρούμε το αναμενόμενο, αλλά μια σταθερότητα και στις τρεις μετρικές.

Ένας δεύτερος λόγος είναι ότι το loss είναι το ίδιο μεγάλο ακόμα και στην περίπτωση που έχουμε λίγους κόμβους στο δίκτυο. Πράγματι ακόμα και αν έχουμε έναν SS που τρέχει VoIP και έναν άλλον με εφαρμογή που χρησιμοποιεί υπηρεσία BE, το loss για την ανταγωνιστική υπηρεσία, είναι 43% περίπου. Αυτό, αντιβαίνει με την κοινή λογική, που θέλει όταν τρέχουμε εφαρμογές που απλά ζητούν 2\*64 Kbps, κάτι αρκετά μικρό με τις δυνατότητες του δικτύου, να μην μπορούν να εξυπηρετηθούν σωστά. Για λόγους επαλήθευσης, καταφύγαμε στο πείραμα, να έχουμε μόνο έναν κόμβο με μια BE, έτσι ώστε να δικαιολογήσουμε αυτό το φαινόμενο. Και πάλι το loss ήταν 43%, γεγονός που αποδεικνύει ότι το module του NDSL, έτσι που έχει δημιουργηθεί είναι εντελώς ακατάλληλο για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα για το downlink και για το πείραμα τύπου single είναι ακριβώς τα ίδια και έτσι δεν παρατίθενται.

## 4.6 Επίλογος

Εξαρχής η πανεπιστημιακή κοινότητα και όχι μόνο, είχε αντιληφθεί τα μεγάλα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του WiMax. Αυτό κυρίως γιατί αυτό το νέο πρότυπο προσέφερε ασύρματη πρόσβαση, σε υψηλές ταχύτητες και μεγάλες αποστάσεις. Όμως, από την αρχή αυτής της εργασίας, είχαμε αντιληφθεί ότι το WiMax μπορεί να αποτελέσει μια εμπορική λύση μόνο συμπληρωματικά σε σχέση με το DSL και το cable που έχουν ήδη επικρατήσει, μιας και η επένδυση σε αυτές τις τεχνολογίες αποτελεί ακλόνητος παράγοντας για ενδεχόμενη στροφή προς το WiMax. Η μόνη περίπτωση, για να μπορέσει να ανταγωνιστεί απευθείας αυτή η τεχνολογία, άλλες παρεμφερείς, είναι να βασιστεί στο QoS. Έτσι και εμείς στα πλαίσια αυτής της εργασίας, στρέψαμε το ενδιαφέρον μας σε μια πολύ δημοφιλή εφαρμογή όπως το VoIP, μιας και μας ενδιαφέρουν οι απαιτήσεις της σε QoS.

Το πρόβλημα είναι ότι δεν καταφέραμε να παράγουμε αξιόπιστα αποτελέσματα και ο μοναδικός λόγος είναι ότι βασιστήκαμε σε ένα κομμάτι λογισμικού το οποίο τελικά αποδείχθηκε κάτι περισσότερο από απαράδεκτο. Το θέμα, όμως είναι ότι δεν είχαμε μόνο εμείς βασιστεί στην ορθότητα του NDSL module, αλλά και το συνέδριο στο οποίο κατατέθηκε το paper της συγκεκριμένης υλοποίησης (WNS2'06, Pisa, Italy), γεννώντας ερωτηματικά σε σχέση με την ορθότητα των εργασιών που μπορούν να παρουσιαστούν σε συνέδρια. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του NDSL module ήταν μονόδρομος, αφού το βασικό ζητούμενο ήταν η αξιολόγηση του WiMax σε σχέση με το QoS.

Ένα από τα θέματα που μας είχαν προξενήσει εντύπωση όταν ξεκινούσαμε την παρούσα εργασία, ήταν ότι εδώ και αρκετό καιρό δεν υπήρχε ένα κομμάτι λογισμικού που υλοποιούσε με ορθό και αποδοτικό τρόπο, τα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του προτύπου. Η εντύπωση αυτή γίνεται ακόμα μεγαλύτερη αν αναλογιστούμε ότι η πρωτοποίηση του 802.16a ολοκληρώθηκε πριν από κάτι παραπάνω τρία χρόνια. Επομένως, η δημιουργία του NDSL module φάνταζε ως μία ιδανική επιλογή, μιας και είχε την εγγύηση της παρουσίας σε ένα μεγάλο συνέδριο. Όπως είδαμε, τελικά τα αποτελέσματα δεν ήταν όσο αρχικά ευοίωνα ήταν.

Συνεπώς, μία από τις προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπίσει κάποιος που έχει στόχο να ασχοληθεί με το WiMax, είναι να δημιουργήσει ένα module, το οποίο αφενός θα υλοποιεί όσα περισσότερα από τα χαρακτηριστικά του προτύπου και αφετέρου να είναι ορθό και αποδοτικά γραμμένο. Στη συνέχεια, ο ίδιος ή κάποιος άλλος θα πρέπει να δημιουργήσει πειράματα κατάλληλα έτσι ώστε να εξάγει χρήσιμα αποτελέσματα. Τέλος, δοκιμάζοντας διάφορους scheduler, να βρεθεί σε θέση να προτείνει τον καταλληλότερο για διαφορετικές απαιτήσεις. Όλα αυτά, θα πρέπει να συμβούν και μάλιστα έγκαιρα, έτσι ώστε να πιστεί

αφενός η ακαδημαϊκή κοινότητα και αφετέρου οι επιχειρήσεις και οι τελικοί χρήστες για την σημαντικότητα του προτύπου WiMax.

## 5. Αναφορές και Παραπομπές

1. IEEE 802.16 Working Group, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," IEEE Std. 802.16-2004, October 2004.
2. The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator, Jenhui Chen , Chih-Chieh Wang, Frank Chee-Da Tsai, Chiang-Wei Chang, October 2006.
3. —, "Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2-11 GHz," IEEE Std. 802.16a, Apr. 2003.
4. —, "Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands," IEEE Std. 802.16e, Dec. 2005.
5. Jenhui Chen and Wei-Kuang Tan, "Predictive Dynamic Channel Allocation Scheme for Improving Power Saving and Mobility in BWA Networks," *ACM/Springer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2006.
6. C. Eklund *et al.*, "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access," *IEEE Commun. Mag.*, 40(6):98–107, June 2002.
7. B. Fong, N. Ansari, A.C.M. Fong, G.Y. Hong, and P.B. Rapajic, "On the Scalability of Fixed Broadband Wireless Access Network Deployment," *IEEE Commun. Mag.*, 42(9):12–21, September 2004.
8. Wang, H.; Li, W.; Agrawal, D.P., "Dynamic admission control and QoS for 802.16 wireless MAN," Wireless Telecommunications Symposium, 2005 , vol., no.pp. 60- 66, 6-7 April 2005.
9. Hawa, M.; Petr, D.W., "Quality of service scheduling in cable and broadband wireless access systems," Quality of Service, 2002. Tenth IEEE International Workshop on, vol., no.pp. 247- 255, 2002.
10. K. Cho, and J. Lee, "Performance Analysis of the Dynamic Reservation Multiple Access Protocol in the Broadband Wireless Access System," *Lecture Notes in Computer Science* 3398: pp. 250-259, 2005.

11. IEEE 802.16.2-2001, "IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks — Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems," Sept. 10, 2001.
12. J. Chen, W. Jiao, and H. Wang. A service flow management strategy for IEEE 802.16 broadband wireless access systems in TDD mode. In IEEE International Conference on Communications, volume 5, pages 3422–3426, May 2005.
13. M. Hawa and D.W. Petr. Quality of service scheduling in cable and broadband wireless access systems. In IEEE International Workshop on Quality of Service, pages 247–255, May 2002.

