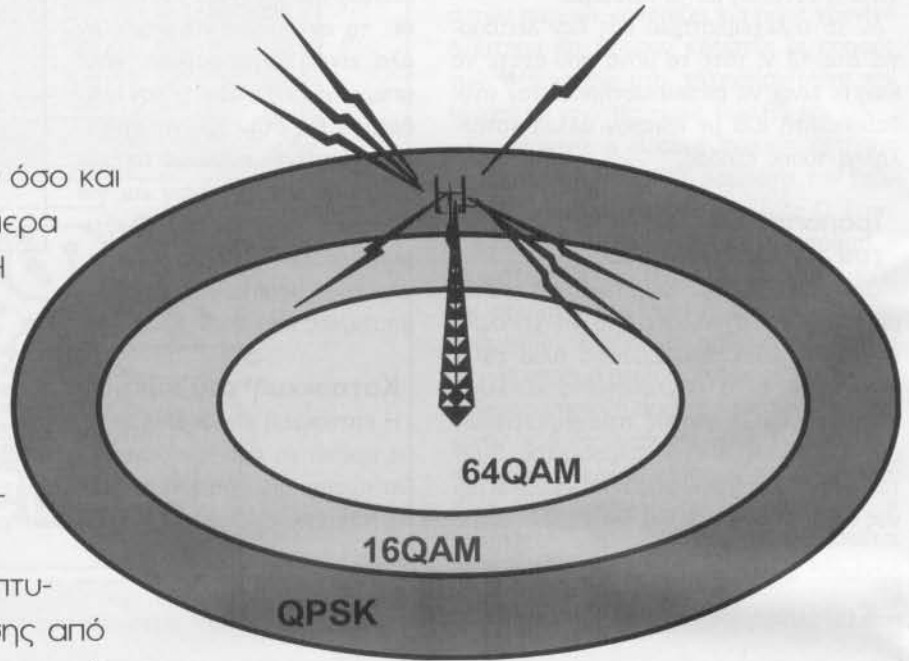


Εισαγωγή στο WiMAX

Η ασύρματη μεταφορά δεδομένων με μεγάλες ταχύτητες, αναμένεται πολύ σύντομα

Από τον Vim Rouwet

Τόσο η τεχνολογία του 802.11 (WiFi) όσο και αυτή του UTMS/3G θεωρούνται σήμερα ώριμες και σχεδόν καθιερωμένες. Η τεχνολογίες UTMS και 3G προσφέρουν στον τελικό χρήστη υψηλά επίπεδα ανεξαρτησίας κίνησης και κάλυψης, αλλά δυστυχώς στερούνται της υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων με χαμηλό κόστος, γεγονός που άφησε ένα χώρο ανάπτυξης του WiFi (υποβοηθούμενου επίσης από την μεγάλη ανάπτυξη στις δυτικές κοινωνίες των καλωδιακών ευρυζωνικών συνδέσεων γενικά, και του ADSL ειδικά). Το επόμενο λογικό βήμα στην εξελισσόμενη αναζήτηση μεγαλύτερου εύρους διαμεταγωγής και καλύτερων χαρακτηριστικών δείχνει προς το WiMAX και το πρότυπο 802.16, σε μία προσπάθεια ανάπτυξης μίας ασύρματης ευρυζωνικής σύνδεσης η οποία θα είναι σε θέση να προσφέρει την κάλυψη του UTMS/3G και την ικανότητα διαμεταγωγής του WiFi. Το άρθρο που ακολουθεί παρέχει στον αναγνώστη ορισμένες εισαγωγικές έννοιες σχετικά με το WiMAX, ενώ ταυτόχρονα θέτει προς προβληματισμό ορισμένες σχεδιαστικές προκλήσεις σχετικά με την ανάπτυξη του WiMAX.



Σχήμα 1. Η βέλτιστη μέθοδος διαμόρφωσης εξαρτάται από τις συνθήκες του καναλιού, οι οποίες μεταξύ άλλων καθορίζονται από την απόσταση μεταξύ του τερματικού χρήστη και του σταθμού βάσης.

switched network), που σύντομα θα τα δούμε να πηγαίνουν παρέα. Σχεδιασμένο έτσι ώστε να υποστηρίζει IP, το 802.16 είναι σε θέση να φέρει πολλά οφέλη στους παρόχους δικτυακής πρόσβασης.

Μία σύντομη εισαγωγή στο WiMAX

Τα πρότυπα 802.16 της IEEE είναι σχεδιασμένα με σκοπό την επί 24-ώρου βάρσωσης σύνδεση ευρείας ζώνης τόσο για στατικούς (πρώτη γενιά 802.16-2004), όσο και για μετακινούμενους χρήστες (802.16e). Έχοντας την δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών τάξεων ποιότητας υπηρεσιών (QoS, Quality of Service), ένα δίκτυο 802.16 μπορεί να υποστηρίξει κινητή τηλεφωνία, μεταφορά δεδομένων με υψηλές ταχύτητες και μεταφορά εικόνας (video) ασύρματα. Τα πρότυπα 802.16 έχουν ήδη επικυρωθεί από το φόρουμ WiMAX (Worldwide Interopera-

bility for Microwave Access, Παγκόσμια λειτουργικότητα για μικροκυματική πρόσβαση), επικύρωση η οποία εξασφαλίζει τόσο την συμβατότητα μεταξύ των συσκευών όσο και την προώθηση του προτύπου. Με την δυνατότητα που έχει να προσφέρει τρεις διαφορετικές οικονομικές πηγές από μία μόνον διεύθυνση IP, το τριπλό παιχνίδι φωνής εικόνας και δεδομένων αποτελεί το "άγιο δισκοπότηρο" για τον κάθε πάροχο τηλεπικοινωνιών. Το κλειδί για την επίτευξη του στόχου είναι το πρωτόκολλο IP και ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων (packet

Η ταχεία ανάπτυξη αυτού που καλούμε "γρήγορο internet" οδήγησε σε μία έκρηξη για μόνιμη δικτυακή σύνδεση τόσο στο γραφείο όσο και στο σπίτι. Παρότι ένα κάποιο ποσοστό της σύνδεσης αυτής παρέχεται από συστήματα όπως είναι το ADSL, τα καλωδιακά μόντεμ ή ακόμη και οι απλές τηλεφωνικές συνδέσεις (dial up), δυστυχώς οι συγκεκριμένες μορφές πρόσβασης δεν είναι διαθέσιμες σε όλες τις περιοχές. Η μέγιστη για παράδειγμα απόσταση που μπορεί να καλύψει μία σύνδεση ADSL περιορίζεται στα 5 με 6 χιλιόμετρα, και μάλιστα με σημαντικά πεσμένη ποιότητα σύνδεσης.

Τα καλώδια δίκτυα δεν είναι άμεσα διαθέσιμα σε όλες τις χώρες, ενώ τέλος οι κοινές τηλεφωνικές συνδέσεις με μόντεμ έχουν περιορισμένο ρυθμό διαμεταγωγής. Η απάντηση σε όλα τα παραπάνω προβλήματα είναι η Ασύρματη Πρόσβαση Ευρείας Ζώνης (Broadband Wireless Access, BWA), η οποία είναι σε θέση να παράσχει μία ασύρματη δικτυακή σύνδεση πακέτων βασισμένη στο πρωτόκολλο IP, με ταχύτητες επιπέδου ADSL και σε κυψέλες με ακτίνα μέχρι τα 10 χιλιόμετρα (περισσότερα περί αυτού αργότερα).

Η επιτυχία του BWA είναι μέχρι στιγμής περιορισμένη. Το πρόβλημα έγκειται βασικά στο ότι παρ' ότι, υπάρχουν πολλοί πάροχοι BWA, δεν έχει ακόμη θεσπιστεί καμία βιομηχανική τυποποίηση. Το γεγονός αυτό επιφέρει δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτα απ' όλα η επιλογή μεταξύ των διαφορετικών λύσεων είναι σύνθετη και δύσκολη διαδικασία, λόγω των υπάρχουσών διαφορών στο σύνολο των προσφερόμενων χαρακτηριστικών και την υλοποίηση. Δεύτερον, το κόστος του εξοπλισμού για τον τελικό χρήστη παραμένει υψηλό, δεδομένου ότι ο συνολικός όγκος των πωλήσεων παραμένει χαμηλός και δεν δικαιολογεί την χρήση ολοκληρωμένων μαζικής παραγωγής.

Με το ξεκίνημα της ομάδας εργασίας του 802.16, η IEEE έθεσε ως βασικό στόχο να δημιουργηθεί ένα συνολικά αποδεκτό πρότυπο για το BWA. Η πρώτη έκδοση του προτύπου εξεδόθη τον Απρίλιο του 2002, ενώ σε τακτική βάση ακολούθησαν διάφορες προσθήκες. Ο ρόλος του φόρουμ WiMAX μπορεί να συγκριθεί με αυτόν της συμμαχίας Wi-Fi για το 802.11: δεν εμπλέκεται άμεσα στην διαδικασία τυποποίησης, αλλά προωθεί το πρότυπο και δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές να εκτελέσουν δοκιμές συμβατότητας για το υλικό που παράγουν. Εάν αυτές είναι επιτυχείς το υλικό θα μπορεί να δηλώνεται ως "πιστοποιημένο κατά WiMAX".

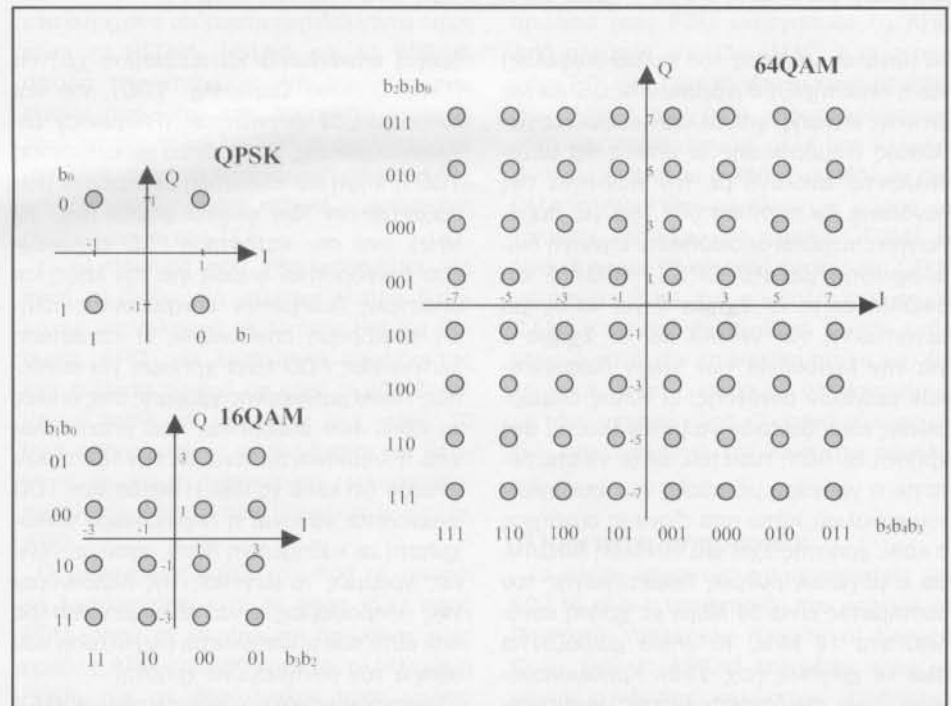
Αυτή τη στιγμή υπάρχει μία μεγάλη ποιικιλία στην αγορά συστημάτων BWA η οποία περιλαμβάνει από συστήματα συμβατά με σταθμούς βάσης 3G (τα οποία δίνουν στον χρήστη την δυνατότητα διασύνδεσης μεταξύ κόμβων που χρησιμοποιούν ακριβές μισθωμένες γραμμές), μέχρι συστήματα για οικιακή ή επαγγελματική πρόσβαση όπου το BWA ανταγωνίζεται τόσο τις τρέχουσες λύσεις (ADSL, καλώδιακή, dial-up), όσο και τις μελλοντικές (PON). Το BWA είναι επίσης σχεδιασμένο έτσι ώστε να παράσχει δυνατότητα σύνδεσης με εταιρικές μισθωμένες γραμμές T1+, με εγγυημένο εύρος ζώνης και διασύνδεση μεταξύ κομμι-

κών σημείων 802.11. Αυτή τη στιγμή έχουν ήδη κυκλοφορήσει διάφορες εκδόσεις του προτύπου 802.16, αλλά για όλες τις προαναφερθείσες εφαρμογές το πρότυπο που έχει επικυρωθεί από το φόρουμ WiMAX είναι το 802.16-2004 (παλιότερα γνωστό ως 802.16d).

Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές, η δυνατότητα μετακίνησης δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση. Υποστηρίζοντας όμως συνθήκες γρήγορης μεταγωγής και εναλλαγής καναλιών, η τελευταία έκδοση του προτύπου (καλούμενη και 802.16e) παρέχει την δυνατότητα κινητής χρήσης. Προσθέτοντας λοιπόν υποστήριξη κινητής χρήσης σαν συμπλήρωμα στο 802.16-2004, ανοίγει μία ολόκληρη αγορά στους πάροχους για να προσφέρουν συνδέσεις IP υψηλών ταχυτήτων στους μετακινούμενους χρήστες. Το γεγονός αυτό ωθεί το πρότυπο 802.16 πέρα από την αρχική του σχεδίαση (η οποία στόχευε σε μία μάλλον πε-

αγορά VoIP δεν είναι μόνον το GSM/3G αλλά και το 3G, αναπτύσσοντας πρότυπα στα οποία περιλαμβάνονται τα HSDPA και HSUPA.

Η βασικές συχνότητες για λειτουργία 802.16 με πρόσβαση εκτός ευθείας οπτικής επαφής (Non Line of Sight, NLOS) (όπου ο σταθμός βάσης δεν είναι υποχρεωτικό να "βλέπει" τον χρήστη για να έχουμε μία λειτουργική σύνδεση), κυμαίνονται μεταξύ 2,4 GHz (ΗΠΑ), 3,5 GHz (Ευρώπη) και 5,6 GHz. Από όλες τις παραπάνω περιοχές συχνοτήτων, μόνον η ζώνη των 5,6 GHz ανήκει σε περιοχή όπου δεν χρειάζεται αδειοδότηση. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές οι πάροχοι θα πρέπει να καταβάλουν τέλη αδειοδότησης, παρόμοια με τα τέλη που καταβάλλουν για το σύστημα 3G. Το πρότυπο 802.16-2004 είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί τόσο σε υποχρεωτικά αδειοδοτούμενη όσο και σε μη αδειοδοτούμενη ζώνη, ενώ το 802.16e λειτουργεί

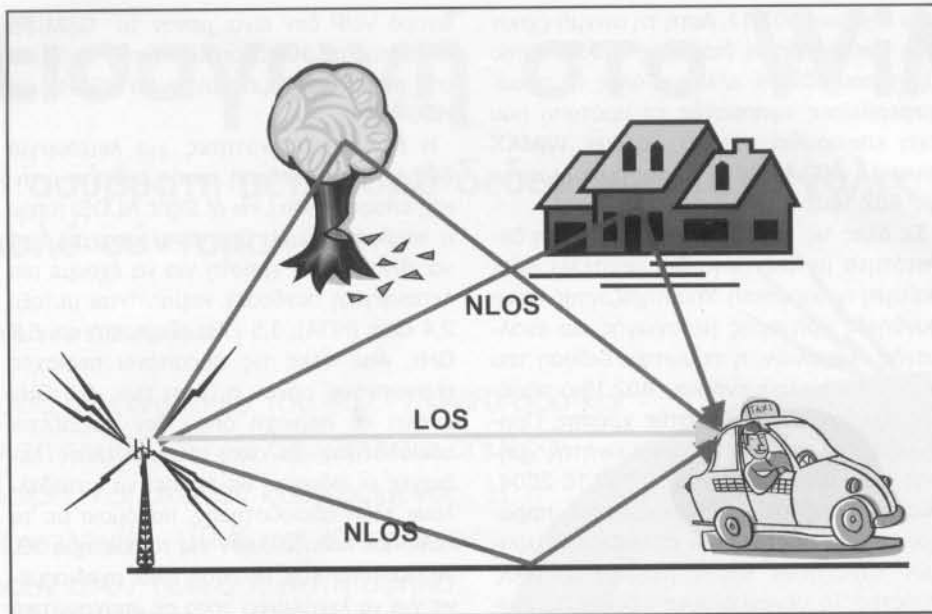


Σχήμα 2. Διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης (QPSK έως και 64QAM) που χρησιμοποιούνται στο 802.16e. Για επεξήγηση των όρων παραπέμπουμε στην διεύθυνση: www.blondertongue.com/QAM-Transmodulator/QAM_defined.php

ριθωριακή αγορά), στον ανταγωνιστικό κόσμο του UMTS/3G. Για να αναφέρουμε ένα παράδειγμα, η υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) του 802.16 επιτρέπει στον πάροχο να αναπτύξει τηλεφωνικές συνδέσεις επάνω σε IP (Voice over IP, VoIP) δημιουργώντας ένα κινητό σύστημα τηλεφωνίας σταθερής χρέωσης. Να σημειώσουμε ότι ο ανταγωνισμός για την συγκεκριμένη

μόνον σε αδειοδοτούμενη ζώνη. Η λειτουργία σε αδειοδοτούμενη ζώνη επιτρέπει στον πάροχο να χρησιμοποιεί μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής και περιορίζει το ποσοστό των παρεμβολών.

Η μέγιστη απόσταση από τον σταθμό βάσης (Base Station, BS) και την τερματική μονάδα του χρήστη (Service Station, SS) στο 802.16 είναι περίπου 10 Km. Το σχετι-



Σχήμα 3. Περιγραφή των πολλαπλών διαδρομών. Η κάθε διαδρομή από τον πομπού προς τον δέκτη διανύει ελαφρά διαφορετική απόσταση, καταλήγοντας σε διαφορές χρόνου (παράμορφωση) στον δέκτη (NLOS = Χωρίς οπτική επαφή, LOS = Οπτική επαφή).

κά μεγάλος μέγεθος του κελιού (κυψέλης) και η υποστήριξη συνδέσεων NLOS (εκτός οπτικής επαφής) επιβάλλουν ευέλικτες μεθόδους διαμόρφωσης οι οποίες θα μεταβάλλονται ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης. Το πρότυπο 802.16e για παράδειγμα επιτρέπει οποιαδήποτε επιλογή διαμόρφωσης μεταξύ QPSK, 16QAM και 64QAM. Δείτε το Σχήμα 1 για το σχήμα μετάπτωσης του WiMAX και το Σχήμα 2 για την λειτουργία των τριών διαφορετικών μεθόδων σύνδεσης. Ο τύπος διαμόρφωσης είναι δυνατόν να μεταβάλλεται ανά χρήστη σε βάση πακέτου, ώστε να επιτρέπεται η γρήγορη μεταβολή των συνθηκών του καναλιού. Κάτω από ιδανικές συνθήκες ο κάθε χρήστης έχει μία σύνδεση 64QAM, και ο μέγιστος ρυθμός διαμεταγωγής του συστήματος είναι 38 Mbps με χρήση καναλιού στα 10 MHz, το οποίο μοιράζονται όλοι οι χρήστες (π.χ. 256). Χρησιμοποιώντας λόγο συνδρομητών/προς χωρητικότητα 20:1, το διαθέσιμο εύρος για κάθε χρήστη θα είναι $20 \times 38 / 256 = 3$ Mbps. Η λειτουργία είναι δυνατή τόσο σε αμφί-

δρομη επικοινωνία καταμερισμού χρόνου (Time Division Duplexing, TDD) όσο και καταμερισμού συχνότητας (Frequency Division Duplexing, FDD), όπου σε κατάσταση TDD η λήψη και αποστολή δεδομένων μοιράζονται τον ίδιο φυσικό φορέα (π.χ. 10 MHz), ενώ σε κατάσταση FDD εκχωρούνται διαφορετικοί φορείς για την λήψη και αποστολή δεδομένων επιτρέποντας πλήρη αμφίδρομη επικοινωνία. Η κατάσταση λειτουργίας FDD είναι χρήσιμη για συνδέσεις τύπου μισθωμένης γραμμής στις οποίες το ποσό των δεδομένων που αποστέλλονται ή λαμβάνονται είναι εκ των προτέρων γνωστό ότι είναι το ίδιο. Η κατάσταση TDD αναμένεται να είναι η περισσότερο κοινόχρηστη σε καθημερινή βάση, αφού σε γενικές γραμμές το μέγεθος της λαμβανόμενης πληροφορίας είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που αποστέλλεται (περίπτωση που αφορά τον συνηθισμένο χρήστη).

Συμπερασματικά, η τεχνολογία WiMAX διαθέτει την αξιοπιστία και την ευελιξία που απαιτείται για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις ταχείας μεταβολής τόσο των συν-

δέσεων τύπου LOS (οπτικής επαφής) όσο και τύπου NLOS (μη οπτικής επαφής), όπως περιγράφεται και στο Σχήμα 3.

Μετάδοση δεδομένων

Η ακολουθία δεδομένων που εκπέμπεται στο φυσικό επίπεδο μπορεί να περιλαμβάνει οποιοδήποτε πλήθος μονάδων δεδομένων πρωτοκόλλου (PDU, Protocol Data Unit), η κάθε μία από τις οποίες συνίσταται σε μία επικεφαλίδα 6 ψηφιολέξεων (byte), ένα προαιρετικό κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων (CRC, Cyclic Redundance Code) 4 ψηφιολέξεων και ένα αυθαίρετο μήκος δεδομένων μεταξύ επικεφαλίδας και CRC. Στην επικεφαλίδα της κάθε PDU, υπάρχει το αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection Identifier, CID) το οποίο υποδεικνύει την σύνδεση για την οποία προορίζονται τα δεδομένα που ακολουθούν.

Η κάθε τερματική συσκευή χρήσης έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει ένα αυθαίρετο πλήθος ενεργών συνδέσεων (CID) (π.χ. κάποιες συνδέσεις διαχείρισης, κάποιες άλλες φωνητικής επικοινωνίας και άλλες για μεταφορά δεδομένων), ενώ σε μία ροή δεδομένων είναι δυνατόν να μεταφέρεται πληροφορία για πολλαπλές ενεργές συνδέσεις αρκεί αυτές να απευθύνονται στον ίδιο τερματικό σταθμό (SS).

Το μέγεθος της PDU καθορίζεται από το επίπεδο MAC και αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα στις επιδόσεις της ασύρματης σύνδεσης (μία μεγάλη PDU σημαίνει μικρότερες σπατάλες σε επικεφαλίδες και CRC) και της πιθανότητας να χαθεί μία PDU λόγω του σχετικά υψηλού ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER) της διασύνδεσης.

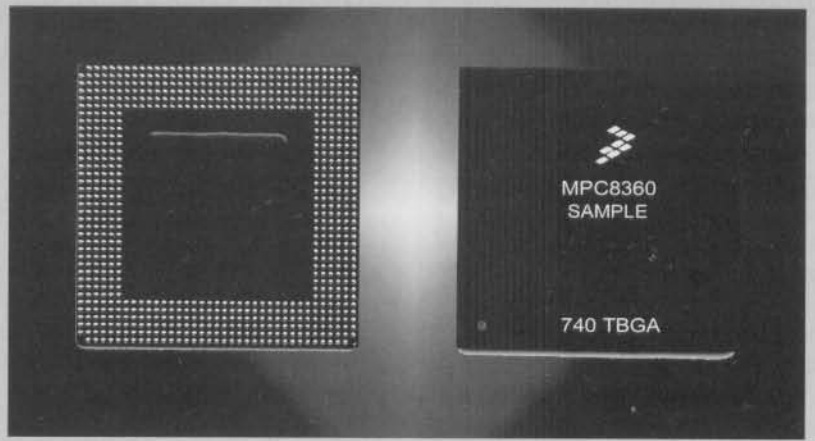
Το μέγεθος της PDU καθορίζεται επίσης από τα δεδομένα που μεταφέρονται (στο 802.16 αναφέρονται ως Service Data Unit ή SDU). Σε μία τυπική περίπτωση, η μονάδα δικτυακής διασύνδεσης που συνδέει τον σταθμό βάσης με το δίκτυο του παρόχου, θα μεταφέρει μία ροή δεδομένων βασισμένη σε πακέτα (IPv4/IPv6, PPP, VLAN, Ethernet), παρότι υπάρχει επίσης πρόβλεψη για υποστήριξη ATM. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε δεδομένα IP που μεταφέρονται σε ένα τυπικό δίκτυο Ethernet, το μέγεθος του πακέτου πληροφορίας μπορεί να είναι μεταξύ 64 και 1500 ψηφιολέξεων και θα πρέπει με κάποιο τρόπο να προσαρμόζεται με τη ροή δεδομένων όπως αυτή καθορίζεται στο φυσικό επίπεδο, όπου το ζητούμενο είναι η κατά το δυνατόν αποδοτικότερη εκμετάλλευση, χωρίς να υπάρχει σπατάλη του εύρους ζώνης (με "παραγέμισμα" [padding] για παράδειγμα άδειων πακέτων). Για να μπορούν λοιπόν να προσαρ-

Πίνακας 1. Υποστήριξη QoS στο 802.16

	UGS	nrtPS	rtPS	BE
Προτεραιότητα		X		X
Μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός κυκλοφορίας	X	X	X	X
Ελάχιστος δεσμευμένος ρυθμός κυκλοφορίας		X	X	
Ανοχή στο Jitter	X			
Μέγιστη καθυστέρηση	X		X	
Στρατηγική Αίτησης/Μεταφοράς	X	X	X	X

Μία υλοποίηση μέσω λογισμικού

Οι αλλαγές που εμφανίζονται με την εξέλιξη των προτύπων 802.16 WiMAX υπογορεύουν την χρήση μίας πλήρως προγραμματιζόμενης πλατφόρμας επικοινωνιών, η οποία θα είναι σε θέση να εξελιχθεί μαζί με την τεχνολογία. Οι πρόοδοι που παρατηρείται στην παραγωγή ολοκληρωμένων επεξεργασίας σήματος επιτρέπουν μία προσέγγιση στην οποία ολόκληρη η αλυσίδα επεξεργασίας από την διασύνδεση της κεραίας (τον μετατροπέα A/D, D/A) μέχρι την διασύνδεση δικτύου υλοποιείται από ένα συνδυασμό ολοκληρωμένων υψηλής απόδοσης FPGA ή RCF (Reconfigurable Compute Fabric) στην κεραία, λύσεις DSP για την επεξερ-



ργασία στο φυσικό επίπεδο και επεξεργαστές επικοινωνίας για την υλοποίηση του επιπέδου MAC. Οι συγκεκριμένες λύσεις στοχεύουν τόσο στο χαμηλό κόστους

κομμάτι της αγοράς (π.χ. ρίσο-κυψέλες) όσο και τις πολλαπλών τομέων κυψέλες με εκτεταμένη υποστήριξη πρωτοκόλλων και διασυνδέσεων.

μοστούν τα δεδομένα IP στο εύρος του φυσικού επιπέδου, το πρότυπο 802.16 υποστηρίζει κατάκτηση και ομαδοποίηση για να έχουμε την δυνατότητα είτε να "σπάσουμε" μεγάλα πακέτα IP πληροφορίας σε μικρότερα τεμάχια τα οποία θα μπορούν να αποσταλούν σε ξεχωριστά PDU, ή να συγκεντρώσουμε μικρότερα πακέτα IP σε μεγαλύτερες PDU.

Το πρωτόκολλο TCP αναπτύχθηκε με σκοπό τον έλεγχο της μεταφοράς δεδομένων από άκρου σε άκρο μέσω επίγειων γραμμών υψηλής ποιότητας. Η συγκεκριμένη μορφή μεταφοράς συνεπάγεται 1) μικρό ρυθμό ασφαλιμάτων και 2) μικρή καθυστέρηση.

Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά δεν είναι πλήρως διαθέσιμα στο σύστημα 802.16 (η αλυσίδα επεξεργασίας στον σταθμό βάσης εισάγει μία καθυστέρηση στην μεταφορά, ενώ η ασύρματη γραμμή μεταφοράς είναι εκ των πραγμάτων λιγότερο αξιόπιστη από μία επίγεια γραμμή). Όταν ένα πακέτο TCP χάνεται και δεν φθάνει στον δέκτη, το πρωτόκολλο θεωρεί ότι υπάρχει συμφόρηση στο δίκτυο και μαζί με την επανεκπομπή του πακέτου υποβαθμίζει και τον ρυθμό μεταφοράς της πληροφορίας. Σε μία ασύρματη διασύνδεση, η απώλεια πακέτων δεν οφείλεται υποχρεωτικά σε συμφόρηση, οπότε η αντίδραση του πρωτοκόλλου TCP να υποθιβάσει τον ρυθμό μεταφοράς δεν είναι σωστή. Η αρνητική αυτή επίδραση χειροτερεύει ακόμη περισσότερο από την μεγάλη καθυστέρηση στο πήγαινε-έλα (round trip) του σήματος.

Στην πορεία του χρόνου έγιναν διάφορες τροποποιήσεις στο πρωτόκολλο TCP για να ξεπεραστεί το πρόβλημα, αλλά δυστυ-

χώς ο πυρήνας του ζητήματος εξακολουθεί να υπάρχει. Η λύση που έχει βρεθεί στα σύγχρονα ασύρματα περιβάλλοντα όπως είναι τα HSDPA, HSUPA και το 802.16, αφορά την επανεκπομπή των πακέτων επάνω στην ίδια την ασύρματη γραμμή, πριν το πρωτόκολλο TCP ανακαλύψει την απώλεια, οπότε η ενδεχόμενη απώλεια δεν επιδρά καθόλου στην αρχικά καθορισμένη συμπεριφορά του TCP.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για αυτή τη διαδικασία καλείται Αίτηση Αυτόματης επανάληψης (Automatic Repeat Request, ARQ) και λειτουργεί αποδίδοντας ένα αύξοντα αριθμό σε κάθε ομάδα δεδομένων σταθερού μεγέθους (π.χ. κάθε 10 byte πληροφορίας), όπου γίνεται μία θετική ή αρνητική αναγνώριση (acknowledgment) της λήψης των ξεχωριστών μπλοκ ARQ.

Ο μηχανισμός ARQ του 802.16 μπορεί να λειτουργήσει είτε σε βάση PDU προς PDU (όπου σε περίπτωση απώλειας μίας ομάδας ARQ επανεκπέμπεται ολόκληρη η PDU), είτε σε βάση μπλοκ προς μπλοκ, όπου τότε επανεκπέμπονται κάποια επί μέρους μπλοκ.

Ο ίδιος ο μηχανισμός ARQ μπορεί -εφ' όσον χρειαστεί- να ξανα-τεμαχίσει ένα ήδη απεσταλμένο πακέτο με διαφορετικά όρια επανεκπομπής. Η ανάγκη βέβαια εφαρμογής αυτής της διαδικασίας δεν είναι άμεσα προφανής (γιατί να μην επανεκπέμψουμε ολόκληρη την PDU;), αλλά γίνεται περισσότερο σαφές εάν μελετήσουμε με μεγαλύτερη προσοχή το φυσικό επίπεδο. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία σύνδεση η οποία λειτουργεί με διαμόρφωση 64 QAM και η οποία υποβάλλεται σε σημαντική εξασθέ-

νηση και επιβάλλεται να μεταπηδήσει σε διαμόρφωση QPSK, ενώ την ίδια στιγμή η απώλεια μίας PDU ενεργοποιεί το ARQ. Από πλευράς επιπέδου MAC, η συγκεκριμένη PDU θα έχει το ίδιο ενεργό μέγεθος (το πλήθος των byte της πληροφορίας) κατά την επανεκπομπή, αλλά από πλευράς φυσικού επιπέδου (πλήθος συμβόλων OFDMA, πλήθος υπο-καναλιών), ο χώρος κατάληψης της PDU στο πλαίσιο OFDMA θα είναι 3 φορές το αρχικό μέγεθος (το QPSK μεταφέρει 2 bit ανά σύμβολο, ενώ το 64 QAM μεταφέρει 6 bit). Είναι λοιπόν ενδεχόμενο κατά την επανεκπομπή να μην θέλουμε ή να μην μπορούμε να εκχωρήσουμε τόσο μεγάλο χώρο. Ο επανα-τεμαχισμός των πακέτων δίνει την λύση στο πρόβλημα.

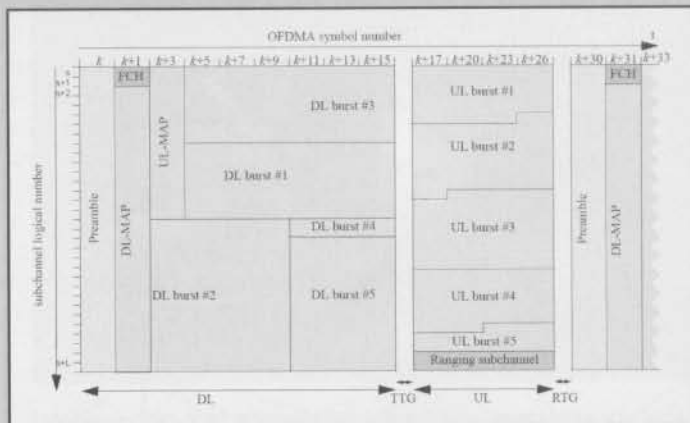
Ποιότητα υπηρεσιών

Το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό του 802.16 είναι η υποστήριξη που παρέχει για Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Ενώ το 802.11 επιτρέπει απλά και μόνον συνδέσεις καλύτερων επιδόσεων (Best Effort), το 802.16 έχει πρόβλεψη για τουλάχιστον τέσσερις τάξεις υπηρεσιών:

Η υπηρεσία *Unsolicited Grant Service (UGS)* είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίξει ροή δεδομένων πραγματικού χρόνου, αποτελούμενων από πακέτα σταθερού μεγέθους που εκπέμπονται σε περιοδικά διαστήματα, όπως για παράδειγμα τα T1/E1, ATM, CBR και Voice over IP χωρίς καταστολή σιγής.

Η υπηρεσία *Real-time Polling Service (rtPS)* είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίξει ροή δεδομένων πραγματικού χρόνου, αποτελούμενων από πακέτα μεταβλητού μεγέθους

Διαμόρφωση και δομή πλαισίου στο OFDMA



Ένα τυπικό κανάλι επικοινωνίας χρησιμοποιεί μία μόνον συχνότητα φέροντος όπου η ακολουθία ψηφίων (bitstream) εισόδου (μετά την κωδικοποίηση καναλιού) διαμορφώνεται μαζί με το φέρον. Ο χρόνος του κάθε συμβόλου για ένα τέτοιο σύστημα ορίζεται ως $1/T$ (T συχνότητα δεδομένων).

Σε ένα ιδανικό κόσμο, το σήμα στον δέκτη ισούται με το σήμα εκπομπής, το οποίο σημαίνει ότι μπορούμε να αποκωδικοποιήσουμε το εκπεμπόμενο σήμα διαμορφώνοντας εκ νέου με την συχνότητα του φέροντος. Στην πράξη βέβαια έχουμε να αντιμετωπίσουμε παρεμβολές πολλαπλών διαδρομών στις οποίες το εκπεμπόμενο σήμα πριν φθάσει στον δέκτη ενδέχεται να ανακλάται στο έδαφος, σε δένδρα, σε κτήρια κ.λπ. Όλες αυτές οι διαφορετικές μεταδόσεις φθάνουν στην κεραία του δέκτη σε ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους εισάγοντας μία "καθυστερήση πολλαπλών διαδρομών". Στην περίπτωση καθυστέρησης πολλαπλών διαδρομών (η οποία χαρακτηρίζεται από την Απόκριση Διέγερσης Καναλιού [Channel Impulse Response ή CIR]), το ένα σύμβολο της σύνδεσης μπορεί να παρεμβληθεί σε κάποιο άλλο προκαλώντας παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων (Inter Symbol Interference, ISI). Όταν η ISI βρίσκεται εντός κάποιων ορίων, είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί μέσω της εφαρμογής ενός ισοσταθμιστή περιοχής (φίλτρο καναλιού) ο οποίος αντισταθμίζει την ISI πολλαπλασιάζοντας το λαμβανόμενο σήμα με την εκτιμώμενη απόκριση του καναλιού.

Η πολυπλοκότητα βέβαια του ισοσταθμιστή στον δέκτη αυξάνει δραματικά όταν η ISI ξεπερνά μία συγκεκριμένη στάθμη. Το φαινόμενο αυτό επιβάλλει ένα όριο στο μέγιστο εύρος ζώνης που είναι δυνατόν να διαμορφωθεί πάνω σε μία δεδομένη συχνότητα φέροντος.

Η Ορθογώνια Πολυπλεξία Κατανομής Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) λύνει το πρόβλημα της ISI με ένα όμορφο τρόπο. Αντί να χρησιμοποιεί ένα μόνον φέρον για την αποστολή των δεδομένων, εμπλέκει περισσότερα παράλληλα φέροντα διαιρώντας με τον τρόπο αυτό το διαθέσιμο (και σχετικά ευρύ) εύρος ζώνης του καναλιού (BW, στην προαναφερθείσα περίπτωση 10 MHz) σε ένα σύνολο στενών καναλιών με διαχωρισμό cf . Ο ρυθμός δεδομένων του κάθε ενός από τα εν λόγω κανάλια συγκρινόμενος με αυτόν ενός συστήματος μονού καναλιού, ισούται με τον αρχικό ρυθμό διαιρεμένο με το πλήθος των καναλιών που χρησιμοποιούνται. Επιλέγοντας σε κάθε υπο-φέρον ένα ρυθμό συμβόλων $1/T$ ίσο με το διαχωρισμό συχνότητων cf , η παρεμβολή μεταξύ των διαφόρων φερόντων ελαχιστοποιείται. Η υλοποίηση ενός συστήματος OFDM είναι σχετικά απλή: η μετατροπή από το σήμα χρόνου τομέα σε ένα σήμα με πολλά φέροντα συνίσταται σε ένα ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier, το οποίο σημαίνει ότι το κύριο μπλοκ ενός συστήματος OFDM αποτελεί μία συνάρτηση FFT και IFFT (που εύκολα υλοποιείται στους σύγχρονους επεξεργαστές DSP υψηλής απόδοσης). Από άποψη υψηλότερου επιπέδου, το βασικό σημείο ενός συστήματος OFDM είναι ότι η συχνότητα φέροντος διαιρείται σε ένα μεγάλο πλήθος υποφερόντων (το 802.16 υποστηρίζει μέχρι 2048 υπο-φέροντα, σε δυνάμεις του 2), κάθε ένα από τα οποία είναι λιγότερο ή περισσότερο ανεξάρτητο από το άλλο. Ας πάρουμε για παράδειγμα το εύρος ζώνης (BW) των 10 MHz στο οποίο αναφερθήκαμε νωρίτερα, το οποίο μπορεί να διαιρεθεί σε 1024 υπο-φέροντα των 10 KHz περίπου. Πολλά υποφέροντα είναι δυνατόν να ομαδοποιηθούν έτσι ώστε να αποτελέσουν λογικά υπο-κανάλια.

Θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι η απόδοση ενός δεδομένου υπο-καναλιού σε κάποιο χρήστη ενδέχεται να είναι διαφορετική σε σχέση με αυτή ενός άλλου (διαφορετικού χρήστη), δεδομένου ότι οι διαφορετικοί χρήστες αντιλαμβάνονται διαφορετική ποιότητα καναλιού ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι ένα κανάλι το οποίο έχει κακή απόδοση για ένα χρήστη, μπορεί να αποδίδει σωστά σε κάποιον άλλο. Η τεχνική Πρόσβασης με Ορθογώνια Πολυπλεξία Κατανομής Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) αξιοποιεί το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέποντας την εκχώρηση διαφορετικών υπο-καναλιών σε διαφορετικούς χρήστες, μέσω ενός παραμετροποιήσιμου χρονικού παραθύρου ενός ασύρματου πακέτου (πλήθος συμβόλων OFDM) (δείτε το αντίστοιχη εικόνα).

Στην εικόνα αυτή, η ακολουθία δεδομένων (burst) ορίζεται ως το σύνολο της πληροφορίας που πρέπει να μεταφερθεί στην τερματική συσκευή ενός χρήστη. Κατά την λήψη (downlink) η κάθε ακολουθία κωδικοποιείται (π.χ. συγκεραστικός [convolutional] κώδικας, κώδικας LDPC ή κώδικας τούρμπο CTC) και διαμορφώνεται (QPSK, 16 QAM, 64 QAM) χωριστά από το φυσικό επίπεδο του σταθμού βάσης. Στην παραπάνω εικόνα αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι η ακολουθία DL #1 διαμορφώνεται με 16QAM και κωδικοποιείται με συγκεραστικό κώδικα, ενώ η ακολουθία DL #2 διαμορφώνεται με 64QAM και κώδικα τούρμπο CTC, οπότε το σύνολο των ψηφίων που μεταφέρονται με κάθε αριθμό συμβόλου OFDMA/αριθμό λογικού υπο-καναλιού, μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ των δύο ακολουθιών. Η θέση της ακολουθίας στο πλαίσιο του OFDMA μαζί με τον τύπο κωδικοποίησης της ακολουθίας αναφέρεται για κάθε τερματικό (χρήστη) στον πίνακα DL-MAP, ο οποίος λειτουργεί σαν "πίνακας περιεχομένων" του ίδιου του πλαισίου και εκπέμπεται στην αρχή του πλαισίου. Η λειτουργία της αποστολής (uplink) είναι παρόμοια με αυτή της λήψης. Ο σταθμός βάσης υπαγορεύει την θέση (με όρους συμβόλων OFDMA και υπο-καναλιών) στην οποία επιτρέπεται να ξεκινήσει η εκπομπή, μαζί με την μέθοδο διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Από άποψη φυσικού επιπέδου, το πλήθος των byte πληροφορίας που εκπέμπονται σε μία ακολουθία δίνεται από το μέγεθος της ακολουθίας (σε όρους συμβόλων OFDMA και υπο-καναλιών) καθώς επίσης και από τον τύπο της κωδικοποίησης (η οποία ορίζει το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας που προστίθεται στην ενεργή πληροφορία πριν την εκπομπή).

που εκπέμπονται σε περιοδικά διαστήματα, όπως είναι για παράδειγμα η εικόνα συμπίεσμένη κατά MPEG.

Η υπηρεσία *Non-real-time Polling Service (nrtPS)* είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίζει ροή δεδομένων που ανέχονται κάποια καθυστέρηση, αποτελούμενων από πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους για τα οποία απλά απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων, με παράδειγμα το FTP.

Η υπηρεσία *Best Effort (BE)* είναι σχεδιασμένη για να υποστηρίζει ροή δεδομένων για την οποία δεν απαιτείται κάποια ελάχιστη στάθμη υπηρεσιών, οπότε είναι δυνατόν να διεκπεραιωθούν με βάση την υπάρχουσα ελευθερία χώρου.

Σε κάθε μία από τις παραπάνω υπηρεσίες αντιστοιχεί και ένα σύνολο παραμέτρων QoS, οι οποίες περιγράφονται στον **Πίνακα 1**.

Πέρα από αυτές τις παραμέτρους, το πρότυπο επιτρέπει στον κάθε προμηθευτή να διαφοροποιείται αφήνοντας μία παράμετρο QoS ελεύθερη προς καθορισμό.

Όλες οι παράμετροι QoS καθορίζονται από την πλευρά του χρήστη, οπότε δεν εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες των επιπέδων 802.16 MAC ή PHY.

Κατά την δική του υλοποίηση, ο προμηθευτής δικτύου είναι ελεύθερος να επιλέξει τους δικούς του αλγόριθμους σχετικά με τον καταμερισμό μεταφοράς δεδομένων και χωρητικότητας, με σκοπό να υλοποιήσει με τον δικό του τρόπο τις προβλέψεις (ή ένα υποσύνολο αυτών) σχετικά με το QoS.

Προγραμματισμός και διασύνδεση MAC

Οι αλγόριθμοι προγραμματισμού για την αποστολή και λήψη δεδομένων αποτελούν τον πυρήνα οποιουδήποτε συστήματος 802.16 MAC.

Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι θα πρέπει να έχουν πρόσβαση σε πολλές παραμέτρους εισόδου όπως είναι η κατάσταση της ουράς εισόδου και το μέγεθός της (σε byte), η διαθεσιμότητα δεδομένων ARQ και οι επιδόσεις του φυσικού επιπέδου αναφορικά με την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση καναλιού που χρησιμοποιείται για κάθε χρήστη σε ένα δεδομένο λογικό υποκάνάλι.

Όλες οι παράμετροι αυτές θα πρέπει να συνδυαστούν και να συμφωνούν με τα συμβόλαια QoS που υπάρχουν με τον τελικό χρήστη, και όλα μαζί οδηγούν σε μία απόφαση βέλτιστου προγραμματισμού. Είναι προφανές ότι οι αλγόριθμοι προγραμματισμού αποτελούν τον πυρήνα μίας υλοποίησης σταθμού βάσης 802.16 καθορισμένης

από τον προμηθευτή. Έχει αποδειχθεί ότι μέσω της βέλτιστης κατανομής υπο-φερουσών ανά χρήστη, η απόδοση ενός συστήματος OFDMA μπορεί να γίνει κατά 2-3 φορές καλύτερη σε σχέση με ένα συμβατικό σύστημα.

Η αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης

Τα πρότυπα 802.16-2004 και 802.16e βρίσκονται ακόμη σε ένα στάδιο ωρίμανσης και επί του παρόντος υποστηρίζουν ένα μεγάλο σύνολο επιλογών οι οποίες είναι ασαφές εάν και ποιες τελικά θα χρησιμοποιηθούν στην πράξη.

Οι εξελισσόμενες τροποποιήσεις και η αβεβαιότητα σε σχέση με τις επιλογές που πράγματι χρειάζονται για την υλοποίηση, απαιτούν μία ευέλικτη και προγραμματιζόμενη λύση σχετικά με την διασύνδεση δικτύου, το επίπεδο MAC, το φυσικό επίπεδο και το μέρος διασύνδεσης της κεραίας (αυτό το τελευταίο περιλαμβάνει μορφοποίηση φάσματος, παρεμβολή, ψαλίδιση μέσω λογισμικού, ψηφιακή προ-παραμόρφωση και αλγορίθμους αντιστάθμισης).

Κατά την σχεδίαση του συστήματος ο μηχανικός θα πρέπει να αποφασίσει πως θα κατανεμίσει την επεξεργασία σε φυσικό επίπεδο και επίπεδο MAC μεταξύ των μονάδων. Η συγκεκριμένη απόφαση είναι πράγματι δύσκολη λόγω του μεγάλου ποσοστού διαδραστικότητας μεταξύ του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου 802.16 MAC, συγκρινόμενη με αυτή άλλων ασυρμάτων συστημάτων όπως τα 802.11, GSM και διάφορων προτύπων 3G. Αυτό επιβάλλεται κύρια από την σχεδίαση του συστήματος προγραμματισμού, όπως με λεπτομέρεια περιγράφηκε ενωρίτερα.

Μία άλλη σημαντική διαφορά μεταξύ προτύπων όπως τα 802.11, GSM, 3G και 802.16 είναι ο καταμερισμός του επιπέδου MAC. Στο 3G μέχρι την έκδοση 99, ολόκληρο το επίπεδο MAC παρέμενε κεντρικά (RNC), αλλά αυτή την στιγμή στον ασύρματο κόσμο υπάρχει μία σαφής τάση μεταφοράς της πολυπλοκότητας του επιπέδου MAC προς την περιφέρεια του δικτύου: τους σταθμούς βάσης.

Με τον τρόπο αυτό έχουμε καλύτερο έλεγχο του QoS και ταχύτερη επανεκπομπή των χαμένων πακέτων (με ακραίο παράδειγμα τον υβριδικό μηχανισμό ARQ ο οποίος είναι υποχρεωτικός στο HSDPA και προαιρετικός στο 802.16).

Η μετακίνηση του όγκου επεξεργασίας του επιπέδου MAC προς του σταθμούς βάσης, μεταφράζεται σε μία απαίτηση για επεξεργασία χαμηλού κόστους και υψηλού ρυθμού διεκπεραίωσης σε κάθε κάρτα γραμ-

μής του αντίστοιχου τομέα.

Ανάλογα με την υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο, το ολοκληρωμένο MAC θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να εκτελέσει συγκεκριμένες λειτουργίες όπως ταχεία κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση, CRC, υπολογισμούς HCS, τα οποία είναι καλύτερα να υλοποιούνται σε επίπεδο υλικού για να ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις επεξεργασίας στο φυσικό επίπεδο. Εντός του επιπέδου MAC, ο διαχωρισμός μεταξύ MAC CPS, CS και επιπέδου δικτύου εξαρτάται από την κάρτα ή το ικρίωμα, την συσκευή και τις απαιτήσεις διασύνδεσης.

Τα πρωτόκολλα, οι τύποι μεταφοράς και οι όγκοι μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στην διασύνδεση δικτύου, διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων προμηθευτών. Οι συγκεκριμένες τάσεις ωθούν ακόμη παραπέρα τις απαιτήσεις επεξεργασίας και διασύνδεσης. Μέσα σε ένα σταθμό βάσης, τα επίπεδα MAC CPS (Common Part Sublayer - υπεύθυνο για κατάκτηση, ομαδοποίηση, ARQ, κωδικοποίηση, CRC και QoS) και CS (Convergence Sublayer - υπεύθυνο για καταστολή επικεφαλίδων και ταξινόμηση από IP σε CID για παράδειγμα), είναι δυνατόν να υλοποιηθούν είτε στην ίδια συσκευή ή φυσική θέση, ή να καταμεριστούν σε πολλές συσκευές ή θέσεις. Σε ένα σταθμό βάσης πολλών τομέων, μία πιθανή λύση είναι η χρήση μίας μόνον κάρτας δικτύου για υλοποίηση του MAC CS για πολλούς τομείς (μέχρι 6), παρέχοντας GbE και προαιρετικά TDM διασυνδέσεις προς το δίκτυο όπου μεταφέρεται κυκλοφορία δεδομένων και φωνής με προαιρετική επίσης διασύνδεση QoS με την μορφή MPLS ή DiffServ.

Σε ένα σταθμό βάσης ενός τομέα, τα MAC CS και MAC CPS είναι δυνατόν να υλοποιούνται στην ίδια φυσική συσκευή με στόχο να διατηρηθεί χαμηλά το κόστος.

Οι απαιτήσεις όμως είναι δυνατόν να πάνε ακόμη παραπέρα: από τεχνικής άποψης είναι εφικτό να επανα-χρησιμοποιηθεί η σχεδίαση των σταθμών βάσης για την ανάπτυξη εξοπλισμού που στοχεύει σε απαιτητικούς πελάτες (όπως για παράδειγμα κομικά σημεία πρόσβασης) όπου απαιτείται χαμηλό κόστος, χαμηλή ισχύς και λύσεις ημιαγωγών υψηλής ολοκλήρωσης που παρέχουν την ευελιξία για την προσθήκη χαρακτηριστικών και λειτουργιών μέσω αναβαθμίσεων του λογισμικού, σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις της αγοράς του μέλλοντος.

(050131-1)

Wirn Rouwet, (Freescale Semiconductor)
wim.rouwet@freescale.com