**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ MULTICAST ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΑΝΔΡΕΑΣ Π. ΠΑΠΑΖΩΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Α.Μ.: 419

ΠΑΤΡΑ 2010

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ MULTICAST ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος, Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γεώργιος Αλεξίου, Καθηγητής

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος, Καθηγητής

Κυριάκος Βλάχος, Επίκουρος Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σταύρος Κωτσόπουλος, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Στην Οικογένειά μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών τρίτης γενιάς γνωρίζουν μεγάλη άνθηση και η χρήση τους έχει επεκταθεί στις περισσότερες χώρες όπως και στην Ελλάδα. Παρόλο που αυτή η γενιά κινητών δικτύων προσφέρει προηγμένες υπηρεσίες στους χρήστες, η διαρκής ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης που φτάνουν στα όρια της ευρυζωνικότητας, οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των κινητών δικτύων και στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Ο κυριότερος εκπρόσωπός τους είναι η τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η τεχνολογία HSPA αποτελεί τη φυσιολογική μετεξέλιξη των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς, η οποία πολλές φορές συναντάται και ως 3.5G ή 3G+ προκειμένου να δηλώσει την αναβάθμιση του 3rd Generation (3G) προτύπου.

Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία HSPA αναμένεται να προσφέρει τη δυνατότητα παροχής πληθώρας ευρυζωνικών υπηρεσιών, το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), που αποτελεί τον οργανισμό προτυποποίησης για τις νέες κινητές τεχνολογίες και ορίζει τις προδιαγραφές τους, ήδη μελετά και επεξεργάζεται νέες τεχνολογίες που θα επικρατήσουν για τη νέα δεκαετία στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Η νέα αυτή τεχνολογία αποκαλείται Long Term Evolution (LTE) και στοχεύει στην επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Κύρια προοπτική της τεχνολογίας LTE αποτελεί η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας και η επικράτηση του προτύπου στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης δεκαετίας. Είναι προφανές ότι η τεχνολογία κινητών επικοινωνιών σταδιακά μεταλλάσσεται προς τη δημιουργία δικτύων κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς, με απώτερο σκοπό την επίτευξη της αποκαλούμενης «Κινητής Ευρυζωνικότητας».

Είναι αναμενόμενο ότι ο ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας των δικτύων κινητών επικοινωνιών έχει επιφέρει μία ιδιαίτερα αυξανόμενη απαίτηση για ασύρματη, πολυμεσική επικοινωνία καθώς και για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας που θα παρέχει πληθώρα ευρυζωνικών υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου στους χρήστες των κινητών δικτύων επικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά, ταυτόχρονα με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών, οι πάροχοι πολυμεσικού περιεχομένου και υπηρεσιών ενδιαφέρονται όλο και περισσότερο για την υποστήριξη της multicast μετάδοσης δεδομένων στα κινητά δίκτυα με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο οι χρήστες των κινητών δικτύων θα έχουν πλέον πρόσβαση σε εφαρμογές και υπηρεσίες οι οποίες μέχρι σήμερα μπορούσαν να διατεθούν αποκλειστικά από τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν στις μέρες μας γίνεται λόγος για κινητές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως το mobile TV, το mobile gaming και το mobile streaming.

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα των δικτύων κινητών επικοινωνιών προς την κατεύθυνση της παροχής νέων, προηγμένων πολυμεσικών υπηρεσιών είναι η έναρξη τη προτυποποίησης της υπηρεσίας Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS). Η υπηρεσία MBMS έχει σαν κύριο σκοπό την υποστήριξη IP εφαρμογών broadcast και multicast, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παροχή υπηρεσιών υψηλού

ρυθμού μετάδοσης σε πολλαπλούς χρήστες με οικονομικό τρόπο. Η multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών είναι μια σχετικά νέα λειτουργία η οποία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο των δοκιμών και της προτυποποίησης της.

Το multicast είναι μία αποδοτική μέθοδος μετάδοσης δεδομένων προς πολλαπλούς προορισμούς καθώς χρησιμοποιεί λιγότερους πόρους από το δίκτυο. Το πλεονέκτημά του είναι ότι τα δεδομένα του αποστολέα μεταδίδονται μόνο μία φορά πάνω από κάθε σύνδεσμο που είναι κοινός στα διάφορα μονοπάτια προς ένα σύνολο από αποδέκτες. Η παρούσα διδακτορική διατριβή περιλαμβάνει τη διερεύνηση της εφαρμογής διάφορων μηχανισμών βελτιστοποίησης της εφαρμογής του multicast στη μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η διεξαχθείσα έρευνα εστιάζει στην υπηρεσία MBMS και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο θα βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή της στα κινητά δίκτυα. Επίσης, μελετά μηχανισμούς που εξασφαλίζουν τον έλεγχο συμφόρησης στις MBMS συνόδους καθώς και στην εφαρμογή του Forward Error Correction (FEC) για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων.

Η πρώτη σημαντική συνεισφορά που περιλαμβάνει η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι ένας νέος μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Αυτός ο μηχανισμός έχει σχεδιαστεί με βάση τις τρέχουσες προδιαγραφές έτσι όπως αυτές έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Ο σχεδιασμός έχει γίνει με στόχο την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων πακέτων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Εκτός από την κανονική multicast μετάδοση δεδομένων, λαμβάνονται υπόψη ειδικές περιπτώσεις οι οποίες προκαλούνται από διάφορα σενάρια κινητικότητας των χρηστών. Βασικός στόχος του μηχανισμού είναι να μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα στα υπάρχοντα δίκτυα και να εισάγει ελάχιστες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων και τους μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας των χρηστών.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή δικτύων ns-2 προκειμένου να διερευνηθεί σε βάθος μέσω πειραμάτων εξομοίωσης. Τα πειράματα εξομοίωσης έδειξαν ότι η κινητικότητα των χρηστών μπορεί να αντιμετωπιστεί χωρίς καμία διακοπή παροχής της υπηρεσίας και χωρίς καμία απώλεια δεδομένων. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό ότι το υλοποιημένο τμήμα λογισμικού στον ns-2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω ως πλατφόρμα αξιολόγησης άλλων μηχανισμών που βασίζονται στη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Κάποιες ενδεικτικές περιοχές έντονης έρευνας που θα μπορούσαν να επωφεληθούν από το υλοποιημένο τμήμα λογισμικού είναι η διαχείριση multicast ομάδων, η διαχείριση ασύρματων πόρων, η ανάλυση σεναρίων κινητικότητας χρηστών κ.α.. Στο παρόν ερευνητικό έργο, το νέο αυτό τμήμα του ns-2 χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα για την αξιολόγηση μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης κατά τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα.

Ο έλεγχος συμφόρησης είναι ένας μηχανισμός που προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της πηγής ανάλογα με τις συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Στο IP multicast, για το επίπεδο μεταφοράς χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο User Datagram Protocol (UDP). Το πρωτόκολλο αυτό δεν εμπεριέχει κανέναν υλοποιημένο έλεγχο συμφόρησης. Αντίθετα, το πρωτόκολλο Transmission Control Protocol (TCP) προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τις συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Είναι προφανές ότι η συνύπαρξη κίνησης multicast με κίνηση TCP μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη δικαιοσύνης στην κατανομή των πόρων του δικτύου. Προκειμένου να αποφευχθεί η κατάσταση αυτή είναι απαραίτητη η εφαρμογή του

ελέγχου συμφόρησης στη multicast μετάδοση. Αυτού του είδους ο έλεγχος συμφόρησης ονομάζεται TCP-friendliness.

Η υιοθέτηση ελέγχου συμφόρησης στη multicast μετάδοση πάνω από κινητά δίκτυα θέτει ένα πρόσθετο σύνολο από προκλήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι όλοι οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης αντιμετωπίζουν τις απώλειες πακέτων σε μία προφανή εκδήλωση συμφόρησης του δικτύου. Όμως αυτή η υπόθεση δεν είναι πάντα ο κανόνας σε δίκτυα με ασύρματους συνδέσμους. Στους ασύρματους συνδέσμους οι απώλειες πακέτων πολλές φορές οφείλονται σε λόγους που δε σχετίζονται με συμφόρηση δικτύου. Τέτοιοι λόγοι είναι ο θόρυβος ή σφάλμα στον ασύρματο σύνδεσμο. Προφανώς, σε τέτοιες περιπτώσεις η δραστική μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν αποτελεί λύση. Ένα άλλο περιοριστικό στοιχείο είναι η υπολογιστική ισχύς των κινητών τερματικών συσκευών. Οι συσκευές αυτές δεν μπορούν να εκτελέσουν πολύπλοκες στατιστικές μετρήσεις και παρακολούθηση της κίνησης. Κατά συνέπεια, αυτού του είδους οι διαδικασίες δεν πρέπει να εκτελούνται στις συσκευές αυτές.

Στο τμήμα της διδακτορικής διατριβής που σχετίζεται με τον έλεγχο συμφόρησης μελετάται η εφαρμογή δύο ήδη γνωστών μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης πάνω σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί είναι ο TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) και ο Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC). Οι δύο αυτοί μηχανισμοί ανήκουν στην ομάδα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού οι οποίοι αναπόφευκτα δεν προσφέρουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως κάνουν οι πολύ-επίπεδοι μηχανισμοί. Παρόλα αυτά είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν μία θεμελιώδη απαίτηση για τη multicast μετάδοση σε UMTS δίκτυα που είναι η επεκτασιμότητα για τις εφαρμογές που απευθύνονται σε χιλιάδες χρήστες.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αποδεικνύεται ότι η υποβάθμιση των ασύρματων καναλιών του δικτύου ασύρματης πρόσβασης δημιουργεί δυσλειτουργίες στους υπάρχοντες μηχανισμούς TFMCC και PGMCC. Η συνεισφορά του έργου αυτού έγκειται στο γεγονός ότι οι υπάρχοντες μηχανισμοί έχουν υποστεί μία μερική τροποποίηση και έχουν επεκταθεί προκειμένου να υποστηρίξουν τις ιδιαιτερότητες του δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Οι προτάσεις που γίνονται δεν εισάγουν παρά μόνο ελάχιστες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων. Επιπλέον, αποφεύγεται η εκτέλεση πολύπλοκων λειτουργιών στις κινητές τερματικές συσκευές. Στα πλαίσια της αξιολόγησης των προτεινόμενων μηχανισμών η απόδοσή τους μελετάται μέσω πειραμάτων εξομοίωσης. Η απόδοση των προτεινόμενων μηχανισμών συγκρίνεται με αυτή των αντίστοιχων υπάρχοντων και, τέλος, οι αποδόσεις των δύο προτεινόμενων μηχανισμών συγκρίνονται μεταξύ τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διεξαχθείσα έρευνα που περιγράφεται εστιάζει επίσης στην εφαρμογή του FEC για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων. Γενικότερα στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την εξασφάλιση αξιοπιστίας κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι η Automatic Repeat re-Quest (ARQ) η οποία δουλεύει αποτελεσματικά κυρίως κατά την unicast μετάδοση. Όταν η μέθοδος ARQ εφαρμόζεται σε μία multicast σύνοδο, οι αποδέκτες στέλνουν αιτήσεις για αναμετάδοση χαμένων πακέτων μέσω καναλιών επικοινωνίας προς τον αποστολέα. Η μέθοδος ARQ γενικά είναι αποτελεσματική κατά τη multicast μετάδοση και αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο. Παρόλα αυτά, όταν ο αριθμός των αποδεκτών αυξάνει, οι περιορισμοί στις δυνατότητες της μεθόδου αυτής αποκαλύπτονται. Ένας σημαντικός

περιορισμός είναι το πρόβλημα του καταιγισμού ανατροφοδοτήσεων. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν πολλοί αποδέκτες στέλνουν ταυτόχρονα αιτήσεις για αναμετάδοση στον αποστολέα. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι ότι, για ένα δεδομένο ρυθμό απώλειας πακέτων, όσο ο αριθμός των αποδεκτών αυξάνει, τόσο η πιθανότητα να αναμεταδοθεί ένα πακέτο τείνει προς τη μονάδα. Με άλλα λόγια, ένας μεγάλος μέσος αριθμός από μεταδόσεις χρειάζονται για κάθε πακέτο. Σε ένα ασύρματο περιβάλλον, η μέθοδος ARQ έχει ένα ακόμα μεγάλο μειονέκτημα το οποίο οφείλεται στην προϋπόθεση ύπαρξης αμφίδρομου συνδέσμου επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, στα περισσότερα ενσύρματα δίκτυα είναι αυτονόητο ότι το κανάλι ανατροφοδότησης παρέχεται από το δίκτυο. Αντίθετα, στα ασύρματα δίκτυα η μετάδοση της ανατροφοδότησης από τον αποδέκτη μπορεί να κοστίζει ακριβά είτε με όρους κατανάλωσης ισχύος είτε λόγω περιορισμών στην τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

Το FEC είναι μία μέθοδος ελέγχου λαθών η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει ή να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους για αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Το βασικό χαρακτηριστικό των μηχανισμών FEC είναι ότι ο αποστολέας προσθέτει επιπλέον πληροφορία στα μηνύματα προς τον αποδέκτη. Αυτά τα επιπλέον δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα στον αποδέκτη να ανακατασκευάσει την αρχική πληροφορία. Αναπόφευκτα, αυτού του είδους οι μηχανισμοί προκαλούν μία σταθερή επιβάρυνση στον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων και είναι υπολογιστικά ακριβοί. Στα multicast πρωτόκολλα όμως, η χρήση των τεχνικών FEC έχει πολύ δυνατά πλεονεκτήματα. Η κωδικοποίηση περιορίζει το φαινόμενο των ανεξάρτητων απωλειών πακέτων σε διαφορετικούς αποδέκτες. Αυτό κάνει τους μηχανισμούς αυτούς να μπορούν να κλιμακωθούν σε πολλούς αποδέκτες ανεξάρτητα από το ρυθμό απώλειας πακέτων. Επιπλέον, η δραματική μείωση στο ρυθμό απώλειας πακέτων περιορίζει σημαντικά την ανάγκη για την αποστολή ανατροφοδότησης στον αποδέκτη. Επομένως, ένα κανάλι ανατροφοδότησης μπορεί να μην είναι απαραίτητο ή αν χρησιμοποιείται τέτοιου είδους κανάλι, η πιθανότητα εμφάνισης καταιγισμού από ανατροφοδοτήσεις εκμηδενίζεται. Είναι προφανές ότι οι μηχανισμοί FEC είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν ένα από τους βασικούς στόχους των multicast κινητών υπηρεσιών και ο οποίος είναι η επεκτασιμότητα σε εφαρμογές με χιλιάδες χρηστών. Αυτός είναι και ο λόγος που το 3GPP συστήνει τη χρήση του FEC στο επίπεδο εφαρμογής για την υπηρεσία MBMS και πιο συγκεκριμένα υιοθετεί τη χρήση του κώδικα Raptor FEC.

Στο τμήμα της διδακτορικής διατριβής που σχετίζεται με το FEC διερευνάται η εφαρμογή του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Η έρευνα διεξάγεται με τη βοήθεια ενός νέου μηχανισμού ο οποίος ενσωματώνει ένα πιθανοτικό μοντέλο για την κατανομή των multicast χρηστών στο δίκτυο και καθορίζει το κόστος της multicast μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετάται η επίδραση της χρήσης του FEC στην υπηρεσία MBMS. Γίνεται μία προσπάθεια για τον καθορισμό ενός αποδοτικού σημείου λειτουργίας στη διεκυστίνδα μεταξύ της επιβάρυνσης εξαιτίας του κώδικα και του κόστους αναμετάδοσης. Εξετάζεται εάν η χρήση του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση για τον κώδικα FEC μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, ποιες παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου κώδικα FEC καθώς και ο τρόπος που το κάνουν. Επιπλέον, εξετάζεται ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα στη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα και το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Ο προτεινόμενος μηχανισμός ενσωματώνει τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSPA για την μετάδοση δεδομένων προς τις κινητές τερματικές συσκευές

με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Η αξιολόγηση δε γίνεται μόνο μέσα από το πρίσμα της κατανάλωσης ισχύος αλλά επίσης και μέσα από τα πρίσματα της ταχύτητας μετάδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Κάτι που είναι επίσης σημαντικό, είναι ότι η ανάλυση που γίνεται είναι πλήρως συμβατή με τις προδιαγραφές του 3GPP και λαμβάνει υπόψη όλου τους δυνατούς τρόπους επικοινωνίας στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (σημείο-προς-σημείο, σημείο-προς-πολλαπλά σημεία καθώς και την υβριδική επικοινωνία που συνδυάζει και τους δύο φορείς του δικτύου ασύρματης πρόσβασης). Η δημιουργία αυτού του πλήρους και συμπαγούς πλαισίου είναι ένα από τα κίνητρα που κρύβονται πίσω από αυτό το ερευνητικό έργο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία πλήρης και συμπαγής θεώρηση όλων των ζητημάτων που αφορούν την εφαρμογή του FEC κατά τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα, κάποια από τα οποία δεν είχαν εξεταστεί καθόλου έως σήμερα.

EXECUTIVE SUMMARY

DESIGN AND PERFORMANCE STUDY OF MOBILE MULTICAST SCHEMES

In the recent years, the use of 3rd Generation (3G) cellular networks has begun to rise in most of the countries, as in Greece. 3G networks have the capability to offer advanced services to mobile users. However, the need for higher speeds that approach the capacity of broadband communication, led to the further development of 3G networks and to the adoption of new technologies, with main representative the High Speed Packet Access (HSPA) technology. HSPA constitutes the evolution of UMTS and is known as 3.5G or 3G+ in order to indicate the upgrade from UMTS.

Despite the fact that HSPA technology is expected to allow the provision of numerous broadband services, the 3rd Generation Partnership Project (3GPP), the authorized organization for the standardization of new mobile technologies, already examines new technologies that will prevail in the mobile communications industry over the next decades. This novel technology is known as Long Term Evolution (LTE) and aims at achieving increased data rates and reduced latency compared to existing mobile networks. Therefore, the mobile communications industry progressively evolves to next generation networks, with main target the achievement of the so called “Mobile Broadband”.

The rapid growth of mobile communications networks has involved an increasing demand for wireless, multimedia communication and for a unified and functional system of mobile communications that is able to provide numerous broadband services to its users. On the other hand, multimedia content and service providers show an increased interest in supporting multicast data in order to effectively manage and reuse the available network resources. Additionally, more and more users require access to applications and services that until today could only be accessed by conventional wired networks. Thus, real time applications and services may face low penetration today; however, they are expected to gain high interest in future mobile networks. These applications actually reflect a modern, future way of communication among mobile users. Such mobile services include streaming live TV and streaming video. All the above constitute a series of indicative emerging applications that necessitate advanced transmission techniques.

One of the most significant steps towards the provision of such demanding services is the introduction of Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS). MBMS is a point-to-multipoint service in which data is transmitted from a single source entity to multiple destinations, allowing the networks resources to be shared. Actually, MBMS extends the existing UMTS infrastructure and efficiently uses network and radio resources, both in the core network and most importantly, in the air interface of

UMTS, where the bottleneck is placed to a large group of users. Therefore, MBMS constitutes an efficient way to support the plethora of the emerging wireless multimedia applications and services such as IP video conferencing and video streaming.

Multicast is an efficient method for data transmission to multiple destinations. Its advantage is that the sender's data are transmitted only once over the links which are shared along the paths to a targeted set of destinations. Data duplication is restricted only in nodes where the paths diverge to different subnetworks. The present dissertation describes the investigation of several schemes that optimize the deployment of multicast transmission over mobile communication networks. The conducted research focuses on the MBMS service and examines the way that its deployment should be performed. Additionally, it investigates schemes that can assure an effective congestion control over the MBMS sessions. Finally, it examines the use of Forward Error Correction (FEC) mechanisms for reliable data transmission during the mobile multicast communication.

The first major contribution that is presented in this dissertation is a novel scheme for the multicast transmission of data over mobile communication networks. This scheme has been designed with respect to the current specifications of the MBMS service defined by the 3GPP. The design of the scheme has been performed in a way that minimizes the transmitted packets and makes efficient use of the network resources. Apart from the normal multicast transmission of data over UMTS the handling of special cases caused by user mobility scenarios, is considered. It was a major goal to develop an easily deployed scheme that introduces just minor modifications in the mobile network architecture and the mobility management mechanisms that already exist.

The proposed scheme has been implemented as a new module in the widely used ns-2 network simulator in order to be evaluated. The simulation experiments show that the proposed scheme can cope with the user mobility without any disruption of the service provision or any packet loss. It is important to highlight that this new ns-2 module can be employed by researchers as a platform to validate and analyze multicast mechanisms over mobile networks. Some areas of active research that may be boosted by the deployment of this new module are MBMS service congestion control, mobile multicast group management, multicast radio resource management, MBMS Quality of Service and analysis and testing of user mobility scenarios. In this dissertation the ns-2 module has been used for the evaluation of two congestion control schemes for the multicast transmission over mobile networks.

Congestion control is a policy that adapts the source transmission rate according to the network congestion. In IP multicast, User Datagram Protocol (UDP) is used for the transport layer. This protocol does not implement any congestion control. Instead, the Transmission Control Protocol (TCP) adapts its transmission rate according to network congestion. The coexistence of multicast traffic and TCP traffic may lead to unfair use of network resources. In order to prevent this situation, the deployment of multicast congestion control is indispensable. This kind of congestion control is well known as TCP-friendliness.

The adoption of a multicast congestion control in cellular networks poses an additional set of challenges. All the algorithms for congestion control treat the packet loss as a manifestation of network congestion. This assumption does not always apply to networks with radio links, in which packet loss is often induced by reasons other

than network congestion like noise or radio link error. In these cases, the network reaction should not be a drastic reduction of the sender's transmission rate. Another limitation is that the mobile terminals' computing power cannot afford complicated statistics and traffic measurements, which in turn means that such operations should not be executed on the mobile equipment.

In the part of this dissertation that is related with the multicast congestion control over mobile networks, the applicability of two well-known multicast congestion control schemes over mobile networks is investigated. The examined schemes are namely: the TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) and the Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC). Both schemes belong to the class of single-rate congestion control schemes. Such schemes are simple enough, so as to meet a prime objective for UMTS multicast services, which is scalability to applications with thousands of receivers.

It is showed that the degradation of the radio channels in the radio access network causes malfunctions in the legacy TFMCC and PGMCC schemes. The innovation of this work stems from the fact that the original schemes are partly modified and extended in order to support the particularities of the radio access network. It is proposed to introduce minor modifications in the mobile network architecture. Furthermore, complicated operations like statistics and traffic measurements are avoided to be performed on mobile equipment. Last but not the least, the performance of the modified TFMCC and PGMCC schemes is examined and presented in a comparative way.

The other aspect that this dissertation examines, is the use of FEC during the mobile multicast communication. A lot of proposals to provide reliability in multicast transmission can be found in the literature. The best-known method that works efficiently for unicast transmission is the Automatic Repeat re-Quest (ARQ). When ARQ is applied in a multicast session, receivers send requests for retransmission of lost packets over a back channel towards the sender. Although ARQ is an effective and reliable tool for point-to-multipoint transmission, when the number of receivers increases, it reveals its limitations. One major limitation is the feedback implosion problem which occurs when too many receivers are transmitting back to the sender. A second problem is that for a given packet loss rate, and a set of receivers experiencing losses, the probability that every single data packet needs to be retransmitted quickly approaches unity as the number of receivers increases. In other words, a high average number of transmissions are needed per packet. In a wireless environment, ARQ has another major disadvantage, due to the requirement for a bidirectional communication link. On most wired networks the feedback channel comes for free, but on wireless networks the transmission of feedback from the receiver can be expensive, either in terms of power consumption, or due to limitations of the communication infrastructure.

Forward Error Correction (FEC) is an error control method that can be used to augment or replace other methods for reliable data transmission. The main attribute of FEC schemes is that the sender adds redundant information in the messages transmitted to the receiver. This additional data allow the receiver to reconstruct the source information. Such schemes inevitably add a constant overhead in the transmitted data and are computationally expensive. In multicast protocols however, the use of FEC techniques has very strong motivations. The encoding eliminates the effect of independent losses at different receivers. This makes these schemes able to

scale irrespectively of the actual loss pattern at each receiver. Additionally, the dramatic reduction in the packet loss rate largely reduces the need to send feedback to the sender. Therefore a feedback channel may not be necessary or whenever feedback sending is possible, the feedback implosion is avoided. FEC schemes are therefore so simple as to meet a prime objective for mobile multicast services, which is scalability to applications with thousands of receivers. This is the reason why 3GPP recommends the use of application layer FEC for MBMS and, more specifically, adopts the use of Raptor FEC code.

In this dissertation, a complete study of the applicability of FEC over the multicast data transmission in mobile networks is presented. The investigation is performed with the aid of a novel scheme that incorporates a probabilistic model for the multicast user distribution in the network and analyzes the multicast data delivery cost. In this framework, the impact of FEC use in MBMS is investigated. It is tried to determine the efficient working point in the trade-off between the FEC code overhead and the retransmission cost. It is examined whether FEC use is beneficial or not, how the optimal FEC code dimensioning varies based on the network conditions, which parameters affect the optimal FEC code selection and how they do it. Additionally, the study focuses on one of the most critical aspects in mobile multicast transmission which is the power control in the radio access network. The proposed scheme incorporates the properties of an evolved mobile network that uses High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) technology for high speed data delivery to mobile terminals. The assessment is not only from power consumption point of view but also from energy consumption and time perspective. It is important that the analysis is compliant with the 3GPP specifications and considers the point-to-point, the point-to-multipoint as well as the hybrid transmission that combines both bearers in the radio access network. The creation of this complete and solid framework is the motivation behind this study. The result is a full view of all the aspects of the FEC application during mobile multicast transmission, some of which have not been considered so far.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί τον επίλογο των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διδακτορικής διατριβής είναι «Σχεδιασμός και Μελέτη Απόδοσης Μηχανισμών Multicast σε Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών».

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν, με συμβούλευσαν και μου συμπαρασταθήκαν όλο αυτό το διάστημα.

Ο κ. Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής του ΤΜΗΥΠ υπήρξε ο σύμβουλος και δάσκαλός μου από τις προπτυχιακές σπουδές μου. Θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση και την επιμονή του για συστηματική δουλειά.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ, κ. Εμμανουήλ Βαρβαρίγο και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Ιωάννη Γαροφαλάκη, εξαιρετικούς δάσκαλους με βαρύνουσα άποψη και κύρος, για την καθοδήγησή τους και την υποστήριξή τους στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την ουσιαστική συνδρομή τους στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Γεώργιο Αλεξίου, τον Επίκουρο Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κυριάκο Βλάχο, τον Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών κ. Σταύρο Κωτσόπουλο και τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κωνσταντίνο Μπερμπερίδη.

Επιπλέον, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον Αντώνη Αλεξίου. Είναι άριστος επιστήμονας με πλούσια πνευματικά προσόντα και σπουδαίο ήθος. Πάνω από όλα είναι εξαιρετικός φίλος που με τις πολύτιμες και ουσιαστικές του γνώσεις και συμβουλές με βοήθησε σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στη συνέχεια ευχαριστώ τους συναδέλφους και συνεργάτες μου στα πλαίσια της συμμετοχής μου στο Εργαστήριο Τηλεματικής και Νέων Υπηρεσιών του ΤΜΗΥΠ και στην Ερευνητική Μονάδα 6 του ΕΑΙΤΥ: Βασίλη Κόκκινο, Βασίλη Πουλόπουλο, Γιώργο Τσιχριτζή, Γεωργία Τσέλιου, Βάσω Μανταδάκη, Κώστα Στάμο, Γιάννη Ζαούδη, Γιώργο Αδάμ και Βαγγέλη Καπούλα. Όλοι αποτελούν εξαιρετικά δείγματα συνεργατών συμβάλλοντας σε μια αρμονική και ευχάριστη συνεργασία.

Κλείνοντας, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για τη στήριξή τους σε αυτή την προσπάθεια και κυρίως στους γονείς μου, Παναγιώτη και Κατερίνα, και την αδερφή μου Πόλυ για όλα όσα έχουν κάνει για εμένα.

Πάτρα, 6 Μαΐου 2010

Ανδρέας Π. Παπαζώης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	7
2.1 1 ^Η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	9
2.2 2 ^Η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	9
2.3 ΓΕΝΙΑ 2.5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	10
2.4 3 ^Η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	11
2.5 ΓΕΝΙΑ 3.5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ	12
2.6 LONG TERM EVOLUTION	13
2.7 3 RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΚΤΥΑ UMTS.....	17
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	19
3.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ UMTS.....	20
3.2.1 ΚΙΝΗΤΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	20
3.2.2 ΔΙΚΤΥΟ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	21
3.2.3 CORE NETWORK.....	22
3.3 ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ.....	24
3.3.1 ΔΙΕΠΑΦΗ UU	24
3.3.2 ΔΙΕΠΑΦΗ IUB.....	25
3.3.3 ΔΙΕΠΑΦΗ IUR.....	26
3.3.4 ΔΙΕΠΑΦΗ IU-PS	27
3.3.5 ΑΛΛΕΣ ΔΙΕΠΑΦΕΣ	28
3.4 ΚΑΝΑΛΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ	29
3.4.1 ΛΟΓΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	29
3.4.2 ΚΑΝΑΛΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	30
3.4.3 ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	32
3.5 ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	32
3.5.1 SOFTER ΚΑΙ SOFT HANDOVER.....	33
3.5.2 SRNS RELOCATION	36
3.5.3 HARD HANDOVER	38
3.5.4 INTERSYSTEM HANDOVERS	38
3.6 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: HSPA ΚΑΙ LTE	41
4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HSPA.....	43
4.2 HIGH SPEED DOWNLINK PACKET ACCESS	44
4.2.1 ΚΑΝΑΛΙ HS-DSCH.....	44
4.2.2 ADAPTIVE MODULATION & CODING	46
4.2.3 HYBRID AUTOMATIC REPEAT REQUEST	47
4.2.4 FAST SCHEDULING	48
4.3 HIGH SPEED UPLINK PACKET ACCESS.....	48
4.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HSPA	50
4.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HSPA+	50
4.6 LONG TERM EVOLUTION	51
4.6.1 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ LTE	52
4.6.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LTE	53
4.6.3 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LTE	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΗΡΕΣΙΑ MBMS.....	55
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	57
5.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS	58
5.2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ BROADCAST	58
5.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ MULTICAST.....	59
5.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS.....	59
5.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS	61
5.5 ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS.....	62
5.5.1 SUBSCRIPTION.....	64
5.5.2 SERVICE ANNOUNCEMENT	64
5.5.3 JOINING	64
5.5.4 SESSION START	65
5.5.5 MBMS NOTIFICATION	65
5.5.6 DATA TRANSFER.....	65
5.5.7 SESSION STOP	65
5.5.8 LEAVING	66
5.6 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ CN	66
5.6.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ IP UNICAST	66
5.6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ IP MULTICAST.....	68
5.7 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ UTRAN	69
5.7.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ POINT-TO-POINT	70
5.7.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ POINT-TO-MULTIPOINT	71
5.7.3 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΑΦΗΣ IUR.....	71
5.8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ MBMS	72
5.8.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗ	73

5.8.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΚΑΝΑΛΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	75
6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	77
6.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ	79
6.3 FORWARD ERROR CORRECTION.....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	83
7.1 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ	86
7.1.1 ΛΙΣΤΕΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	86
7.1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ.....	88
7.1.3 ΦΑΣΗ JOINING.....	89
7.1.4 Η ΦΑΣΗ LEAVING	91
7.1.5 HANDOVER	92
7.1.6 SRNS RELOCATION	94
7.1.7 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ UTRAN.....	97
7.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	98
7.2.1 ΕΞΟΜΟΙΩΤΗΣ NS-2	98
7.2.2 ΘΕΜΑΤΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	100
7.2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	102
7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	103
7.3.1 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ	103
7.3.2 ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ	105
7.3.3 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΙΕΠΑΦΗ IUR	107
7.3.4 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ UTRAN.....	108
7.3.5 ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ	110
7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ.....	113
8.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ	116
8.1.1 TFMCC	116
8.1.2 PGMCC.....	117
8.2 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	119
8.3 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ.....	120
8.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΝΕΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	121
8.3.2 ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	121
8.3.3 ΜΟΝΙΜΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	122
8.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	123
8.4.1 ΔΙΚΑΙΟΣΥΝΗ.....	124

8.4.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΑΛΛΑΓΕΣ	127
8.4.3 ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	128
8.4.4 ΜΟΝΙΜΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	129
8.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	131
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: FORWARD ERROR CORRECTION	 133
 9.1 ΠΡΟΦΙΛ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	 136
9.1.1 ΚΑΝΑΛΙ HS-DSCH	137
9.1.2 ΚΑΝΑΛΙ FACH	138
9.2 ΚΩΔΙΚΕΣ RAPTOR	139
9.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ	140
9.3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ MULTICAST ΧΡΗΣΤΩΝ	140
9.3.2 ΘΕΜΑΤΑ ΚΟΣΤΟΥΣ	143
9.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	144
9.4.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ	145
9.4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ STREAMING	146
9.4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DOWNLOAD	148
9.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	149
9.5.1 ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΤΩΝ	149
9.5.2 ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΠΛΗΘΟΥΣ ΧΡΗΣΤΩΝ	150
9.5.3 ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΕΝΑΝΤΙ ΡΥΘΜΟΥ ΑΠΩΛΕΙΑΣ	151
9.5.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ STREAMING	152
9.5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ DOWNLOAD	153
9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	157
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	 159
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	 167
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	 175
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΑΝΑΦΟΡΕΣ	 183
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΚΡΩΝΥΜΑ	 191
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ	 199
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ	 207

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Η εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G.	12
Εικόνα 2. Εξέλιξη κινητών δικτύων από το πρότυπο 3G έως το LTE.	14
Εικόνα 3. Η αρχιτεκτονική του UMTS σε υψηλό επίπεδο.	20
Εικόνα 4. Η δομή του UTRAN.	21
Εικόνα 5. RAs και URAs.	22
Εικόνα 6. Η δομή του CN.	24
Εικόνα 7. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Uu.	25
Εικόνα 8. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iub.	26
Εικόνα 9. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iur.	27
Εικόνα 10. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iu-PS.	28
Εικόνα 11. Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων για τη μεταφορά πληροφορίας.	29
Εικόνα 12. Η αντιστοιχία λογικών καναλιών σε κανάλια μεταφοράς.	32
Εικόνα 13. Αντιστοίχιση καναλιών για την κατερχόμενη κατεύθυνση.	32
Εικόνα 14. Οι δυνατές περιπτώσεις softer και soft handover.	34
Εικόνα 15. Η ροή δεδομένων σε ένα inter-RNS/intra-SGSN handover.	35
Εικόνα 16. Η ροή δεδομένων σε ένα inter-RNS/inter-SGSN handover.	35
Εικόνα 17. Η ροή δεδομένων πριν και μετά το intra-SGSN SRNS relocation.	37
Εικόνα 18. Η ροή δεδομένων πριν και μετά το inter-SGSN SRNS relocation.	37
Εικόνα 19. PMM και RRC μηχανισμοί.	39
Εικόνα 20. Προτυποποίηση και εμπορική διάθεση των τεχνολογιών HSDPA και HSUPA.	43
Εικόνα 21. Ρυθμοί μετάδοσης των τεχνολογιών HSDPA και HSUPA.	44
Εικόνα 22. Διαμοίραση κωδίκων καναλιού για το HS-DSCH.	45
Εικόνα 23. Διαμοίραση πόρων στο πεδίο του χρόνου για το HS-DSCH.	45
Εικόνα 24. Σχήματα διαμόρφωσης QPSK, 16-QAM και 64-QAM.	46
Εικόνα 25. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθορίζεται από τις τρέχουσες συνθήκες στο κανάλι.	46
Εικόνα 26. HARQ - Διαδικασία αναμετάδοσης χαμένων δεδομένων.	47
Εικόνα 27. Δρομολόγηση χρηστών με ευνοϊκές συνθήκες για αύξηση της χωρητικότητας δικτύου.	48
Εικόνα 28. Η εξέλιξη των κινητών ευρυζωνικών προτύπων LTE και WiMAX.	52
Εικόνα 29. Εξέλιξη της MBMS υπηρεσίας.	58
Εικόνα 30. Η αρχιτεκτονική της υπηρεσίας MBMS.	60
Εικόνα 31. Multicast μετάδοση στο UMTS χωρίς την υποστήριξη της MBMS.	62
Εικόνα 32. Multicast μετάδοση στο UMTS με την υποστήριξη της MBMS.	62
Εικόνα 33. Οι φάσεις της broadcast λειτουργίας.	63
Εικόνα 34. Οι φάσεις της multicast λειτουργίας.	63
Εικόνα 35. Οι σύνοδοι GTP στη διεπαφή Gn κατά τη χρήση IP unicast μετάδοσης.	67
Εικόνα 36. Οι σύνοδοι GTP στη διεπαφή Gn κατά τη χρήση IP multicast μετάδοσης.	68
Εικόνα 37. Φορείς MBMS για (a) point-to-point, (b) point-to-multipoint μετάδοση.	69
Εικόνα 38. Οι πιθανές επιλογές μονοπατιών προς το UE1.	72
Εικόνα 39. Η δομή μίας Routing List.	87
Εικόνα 40. Ο μηχανισμός μετάδοσης πακέτων.	87
Εικόνα 41. DRLs και MGLs.	88
Εικόνα 42. Η φάση Joining.	89
Εικόνα 43. Διαδικασίες κατά τη φάση Joining.	90
Εικόνα 44. Διαδικασίες κατά τη φάση Leaving.	91
Εικόνα 45. Τα βήματα του inter-RNS handover.	93
Εικόνα 46. Η διαδικασία inter-RNS handover.	94
Εικόνα 47. Τα βήματα της διαδικασίας inter-SGSN SRNS relocation.	95
Εικόνα 48. Η διαδικασία inter-SGSN SRNS relocation.	96
Εικόνα 49. Η διαδικασία intra-SGSN SRNS relocation.	97
Εικόνα 50. Η διασύνδεση των DRLs.	101
Εικόνα 51. Η εξεταζόμενη τοπολογία.	102
Εικόνα 52. Το throughput στο σύνδεσμο GGSN-SGSN1.	104

Εικόνα 53. Το throughput στο σύνδεσμο SGSN1-RNC1.....	104
Εικόνα 54. Ο έλεγχος της ορθότητας κατά την κινητικότητα χρηστών.....	105
Εικόνα 55. Το bitrate της λήψης δεδομένων από το UE1.....	106
Εικόνα 56. Πολλαπλά inter-RNS handovers από RNC1 προς RNC2.....	107
Εικόνα 57. Το throughput στη διεπαφή Iur.....	108
Εικόνα 58. Το throughput στο σύνδεσμο RNC1-Node B1 για κάθε κανάλι.....	109
Εικόνα 59. Επιβάρυνση στην πολυπλοκότητα των μηνυμάτων ελέγχου.....	110
Εικόνα 60. Απώλεια πακέτου που προκλήθηκε από: (a) συμφόρηση δικτύου, (b) προσωρινή υποβάθμιση ασύρματου καναλιού και (c) μόνιμη υποβάθμιση ασύρματου καναλιού.....	120
Εικόνα 61. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για δύο ανταγωνιστικές TFMCC ροές.....	125
Εικόνα 62. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για δύο ανταγωνιστικές UDP και TCP ροές.....	126
Εικόνα 63. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για ανταγωνιστικές ροές TFMCC, PGMCC και TCP.....	126
Εικόνα 64. Απόκριση σε αλλαγές στο ρυθμό απώλειας πακέτων.....	127
Εικόνα 65. Το throughput των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι αυτού των υπαρχόντων κατά την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού.....	129
Εικόνα 66. Το throughput των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι αυτού του TCP κατά τη διάρκεια της μόνιμης υποβάθμισης ασύρματου καναλιού.....	130
Εικόνα 67. Η στοίβα πρωτοκόλλων για την υπηρεσία MBMS.....	139
Εικόνα 68. Συνολικό κόστος συναρτήσει του α όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\delta = 500$	149
Εικόνα 69. Συνολικό κόστος έναντι του δ όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\alpha = 0.1$	150
Εικόνα 70. Συνολικό κόστος έναντι του δ όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\alpha = 0.9$	151
Εικόνα 71. Βέλτιστο overhead έναντι ρυθμού απώλειας πακέτων όταν $\alpha = 0.1$	151
Εικόνα 72. Μέση ισχύς μετάδοσης για μία πολυμεσική ροή ρυθμού 64 Kbps. Ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER έχει τεθεί στο 1%.....	152
Εικόνα 73. Μέση συνολική ενέργεια μετάδοσης για μετάδοση αρχείου μεγέθους 512 KB. Ο ρυθμός BLER έχει τεθεί στις τιμές: (a) 5%, (b) 10%, και (c) 20%.....	156
Εικόνα 74. Μέσος χρόνος μετάδοσης για την επιτυχή παράδοση του αρχείου μεγέθους 512 KB.....	156
Εικόνα 75. Εναλλακτικές μορφές της e-MBMS αρχιτεκτονικής.....	169
Εικόνα 76. Ορισμοί στο e-MBMS.....	170

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά του UMTS και συμβατότητα του GSM.	19
Πίνακας 2. Τα λογικά κανάλια του δικτύου πρόσβασης.....	29
Πίνακας 3. Οι ιδιότητες των καναλιών μεταφοράς.....	30
Πίνακας 4. Τα κανάλια μεταφοράς του δικτύου πρόσβασης.	31
Πίνακας 5. Επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης ανάλογα με την διαμόρφωση.	47
Πίνακας 6. Παράμετροι των πειραμάτων εξομοίωσης.....	123
Πίνακας 7. Ποσοτική βελτίωση που παρουσιάζουν οι προτεινόμενοι μηχανισμοί έναντι των υπαρχόντων μηχανισμών κατά την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου.	129
Πίνακας 8. Απαιτούμενα επίπεδα ισχύος μετάδοσης για το κανάλι FACH έναντι της κάλυψης του κελιού. Ο ρυθμός μετάδοσης έχει τεθεί στα 64 Kbps και οι απαιτήσεις ισχύος λαμβάνονται για διάφορες τιμές του ρυθμού BLER.....	138
Πίνακας 9. Οι όροι που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση κόστους.	141
Πίνακας 10. Υπολογισμός του κόστους μετάδοσης.	146
Πίνακας 11. Οι τιμές των παραμέτρων εξομοίωσης.....	146
Πίνακας 12. Παράμετροι του περιβάλλοντος εξομοίωσης.	147

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, που η μορφολογία του εδάφους της δεν επιτρέπει πολλές φορές τη χρήση εναλλακτικών μέσων μετάδοσης, όπως για παράδειγμα τη χρήση οπτικών ινών, η ασύρματη επικοινωνία μπορεί να διαδραματίσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο. Ειδικότερα, ο τομέας της κινητής τηλεφωνίας είναι ένας ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας ο οποίος στις μέρες μας βρίσκεται σε ένα στάδιο μετεξέλιξης καθώς το πέρασμα από την τρίτη στην τέταρτη γενιά είναι πλέον γεγονός. Στη μεγάλη εξέλιξη του τομέα αυτού συμβάλουν τα μέγιστα και οι απαιτήσεις των σύγχρονων καιρών για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο θα είναι σε θέση να παρέχει πληθώρα υπηρεσιών στους χρήστες του.

Είναι αναμενόμενο η βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας να εξελίσσεται προς ένα μοντέλο προσανατολισμένο στα πολυμέσα που θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει απαιτητικές υπηρεσίες, όπως mobile TV και mobile streaming. Τα δίκτυα High Speed Packet Access (HSPA) και Long Term Evolution (LTE) ανταποκρίνονται καλύτερα στην αναδυόμενη αυτή τάση σε σχέση με τους προγόνους τους, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα του φάσματος και αυξάνοντας τη χωρητικότητα των σταθμών βάσης. Αυτές οι βελτιώσεις συγκριτικά με τα δίκτυα τρίτης γενιάς, δίνουν στα HSPA και LTE δίκτυα την ευκαιρία να προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλότερες καθυστερήσεις, βελτιωμένη εμπειρία για τους τελικούς χρήστες, διατηρώντας παράλληλα σε χαμηλά επίπεδα τα λειτουργικά έξοδα.

Ο ολοένα και αυξανόμενος αριθμός κινητών πολυμεσικών υπηρεσιών που αναμένεται να έχουν υψηλή διεύθυνση, τονίζει την ανάγκη για επιπρόσθετα μέτρα εξοικονόμησης πόρων του δικτύου. Προς αυτή την κατεύθυνση, η υπηρεσία Multimedia Broadcast / Multicast Service (MBMS) αναμένεται να διαδραματίσει ένα αποφασιστικό ρόλο στην ομαλή εξέλιξη των κινητών δικτύων επόμενης γενιάς, θέτοντας τη βάση για την επιτυχή διαδικασία προτυποποίησής τους. Η υπηρεσία MBMS έχει σαν κύριο σκοπό την υποστήριξη εφαρμογών με broadcast ή multicast μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλαπλούς χρήστες με οικονομικό τρόπο. Κύρια απαίτηση κατά την παροχή MBMS υπηρεσιών είναι η αποδοτική χρήση των ασύρματων και ενσύρματων πόρων του δικτύου, απαίτηση που με τη σειρά της θα οδηγήσει στην εξοικονόμηση πόρων ισχύος στους σταθμούς βάσης.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της εφαρμογής διάφορων μηχανισμών βελτιστοποίησης της εφαρμογής του multicast στη μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η διεξαχθείσα έρευνα εστιάζει στην υπηρεσία MBMS και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο θα βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή της στα κινητά δίκτυα. Επίσης, μελετά μηχανισμούς που εξασφαλίζουν τον έλεγχο συμφόρησης στις MBMS συνόδους καθώς και στην εφαρμογή του Forward Error Correction (FEC) για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων.

Η παρούσα διατριβή δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

Το Κεφάλαιο 2 κάνει μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας και ειδικότερα στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Αρχικά, γίνεται μία ιστορική αναδρομή και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων συστημάτων κινητής τηλεφωνίας. Τέλος, τονίζονται οι κύριες πτυχές

των κινητών δικτύων επικοινωνιών επόμενης γενιάς (HSPA, HSPA+ και LTE) ενώ επισημαίνονται και οι ανάγκες που οδήγησαν στις νέες αυτές γενιές κινητών δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται διεξοδικά το σύστημα Universal Mobile Telecommunication System (UMTS). Πρόκειται για το σύστημα τρίτης γενιάς που έχει επικρατήσει στην Ευρώπη και η χρήση του έχει επεκταθεί και στη Βόρεια Αμερική, με αποτέλεσμα η τρίτη γενιά κυψελωτών κινητών συστημάτων να τείνει να ταυτιστεί με αυτό το σύστημα. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα χαρακτηριστικά, η δομή και η λειτουργία του συστήματος UMTS.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται και αναλύονται οι τεχνολογίες HSPA και HSPA+, που σηματοδοτούν τις πρώτες μορφές κινητών δικτύων επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, οι τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται η βελτιωμένη απόδοσή τους καθώς και οι μοντέρνες/απαιτητικές υπηρεσίες που μπορούν να υποστηρίξουν τα δίκτυα αυτά. Τέλος, γίνεται αναφορά στα δίκτυα LTE που συνιστούν το μέλλον των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

Το Κεφάλαιο 5 είναι αφιερωμένο στην υπηρεσία MBMS. Για την ακρίβεια, περιγράφεται το είδος, οι βασικές αρχές καθώς και η αρχιτεκτονική αυτής της υπηρεσίας. Επίσης, αναφέρονται και αναλύονται τα προτερήματα και οι φάσεις παροχής της υπηρεσίας ενώ παράλληλα, θίγονται ορισμένα ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με την υπηρεσία αυτή. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι διάφοροι τύποι μετάδοσης δεδομένων της συγκεκριμένης υπηρεσίας και περιγράφονται οι διαφορετικοί τύποι ελέγχου ισχύος στο UMTS.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής που σχετίζεται με το περιεχόμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Επίσης, αναφέρονται λεπτομερειακά οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζονται τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούν τις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν στις εν λόγω εργασίες με την προσέγγιση που προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται και αναλύεται ένας νέος μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Ο προτεινόμενος αυτός μηχανισμός έχει σχεδιαστεί με βάση τις τρέχουσες προδιαγραφές της υπηρεσίας MBMS, έτσι όπως αυτές έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Ο σχεδιασμός του μηχανισμού αυτού έχει γίνει με τρόπο που ελαχιστοποιεί τα μεταδιδόμενα πακέτα και κάνει αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Εκτός από την τυπική multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα, εξετάζεται και ο χειρισμός ειδικών περιπτώσεων που προκαλούνται από σενάρια κινητικότητας χρηστών. Η κινητικότητα των χρηστών είναι το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τα κινητά δίκτυα από τα σταθερά δίκτυα επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό οι καταστάσεις κινητικότητας χρηστών θεωρήθηκαν υψίστης σημασίας για τα κινητά δίκτυα και εξετάστηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια μέσω εξομοιώσεων. Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσης διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη ενός μηχανισμού που μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί και να εισάγει περιορισμένες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων καθώς και στους υπάρχοντες μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας, έτσι όπως έχουν ήδη καθοριστεί για τη unicast μετάδοση δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

Στο Κεφάλαιο 8, το οποίο σχετίζεται με τον έλεγχο συμφόρησης, μελετάται η εφαρμογή δύο ήδη γνωστών μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης πάνω σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί είναι ο TCP-Friendly Multicast

Congestion Control (TFMCC) και ο Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC). Οι δύο αυτοί μηχανισμοί ανήκουν στην ομάδα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού οι οποίοι αναπόφευκτα δεν προσφέρουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης, όπως κάνουν οι πολύ-επίπεδοι μηχανισμοί. Παρόλα αυτά είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν μία θεμελιώδη απαίτηση για τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών που είναι η επεκτασιμότητα για τις εφαρμογές που απευθύνονται σε χιλιάδες χρήστες.

Στο Κεφάλαιο 9 διερευνάται η εφαρμογή του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Η έρευνα διεξάγεται με τη βοήθεια ενός νέου μηχανισμού ο οποίος ενσωματώνει ένα πιθανοτικό μοντέλο για την κατανομή των multicast χρηστών στο δίκτυο και καθορίζει το κόστος της multicast μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετάται η επίδραση της χρήσης του FEC στην υπηρεσία MBMS. Γίνεται μία προσπάθεια για τον καθορισμό ενός αποδοτικού σημείου λειτουργίας στη διεκυστίνδα μεταξύ της επιβάρυνσης εξαιτίας του κώδικα και του κόστους αναμετάδοσης. Εξετάζεται εάν η χρήση του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση για τον κώδικα FEC μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, ποιες παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου κώδικα FEC καθώς και ο τρόπος που το κάνουν. Επιπλέον, εξετάζεται ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα στη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα και το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.

Το Κεφάλαιο 10 παρουσιάζει συνολικά όλα τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί κατά την διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 11 παρουσιάζονται τα ανοιχτά θέματα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως αφετηρία την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται οι εργασίες που δημοσιεύτηκαν, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σε διεθνή περιοδικά, βιβλία και διεθνή συνέδρια. Επίσης παρέχεται και μία σύντομη περίληψη του περιεχομένου της κάθε εργασίας.

Στο Παράρτημα II παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ταξινομημένη κατά αλφαβητική σειρά. Η ταξινόμηση της σχετικής βιβλιογραφίας αλφαβητικά πραγματοποιήθηκε με στόχο τη διευκόλυνση του αναγνώστη και τη γρήγορη αναζήτησή τους μέσα στο κείμενο.

Στο Παράρτημα III παρουσιάζονται τα ακρωνύμια τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή για τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

Στο Παράρτημα IV παρουσιάζεται το γλωσσάριο ξενικών όρων που χρησιμοποιούνται στη διδακτορική αυτή διατριβή για τη διευκόλυνση του αναγνώστη.

Τέλος, στο Παράρτημα V παρουσιάζεται το ευρετήριο ορισμένων όρων οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διδακτορική διατριβή για τη διευκόλυνση του αναγνώστη και τη γρήγορη αναζήτησή τους μέσα στο κείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το κεφάλαιο αυτό κάνει μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας και ειδικότερα στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Αρχικά, γίνεται μία ιστορική αναδρομή και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, μέχρι και τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών «γενιάς 2.5». Ακολουθεί μία διεξοδική περιγραφή των κινητών δικτύων επικοινωνιών τρίτης γενιάς και των βασικών προτύπων τους. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Παράλληλα, επισημαίνονται οι ανάγκες που οδήγησαν στην επόμενη γενιά κινητών δικτύων.

2.1 1^η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η πρώτη γενιά (1G) συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη γενιά δεν αποτέλεσε το ξεκίνημα των κινητών τηλεπικοινωνιών. Αντίθετα, από πιο πριν είχαν εμφανιστεί αρκετά συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών τα οποία όμως δεν είχαν τα χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων με τον τρόπο που τα εννοούμε σήμερα. Το βασικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η κυψελωτή δομή του δικτύου. Τα πρώιμα αυτά δίκτυα είχαν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τα κυψελωτά. Επιπλέον, ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα ήταν η υποτυπώδης και προβληματική υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών.

Στα κυψελωτά κινητά δίκτυα, που στο εξής θα αναφέρονται απλώς σαν κινητά δίκτυα, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε μικρές κυψέλες. Με αυτόν τον τρόπο οι ίδιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιούνται πολλές φορές στο ίδιο δίκτυο χωρίς να δημιουργούνται έντονα φαινόμενα παρεμβολής (interference). Επομένως, οι δυνατότητες του δικτύου αυξάνονται σημαντικά [64]. Η πρώτη γενιά χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κίνηση η οποία ήταν αποκλειστικά φωνή. Δεν υπήρξε κάποιο πρότυπο που να επικράτησε, αντίθετα υπήρξαν αρκετά πρότυπα όπως το Nordic Mobile Telephone (NMT), το Total Access Communication System (TACS) και το Advanced Mobile Phone Service (AMPS). Τα δύο πρώτα πρότυπα είχαν μία σχετική επιτυχία στις ευρωπαϊκές χώρες, ενώ το τρίτο ήταν το πιο διαδεδομένο στις Η.Π.Α.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι παρόλο που σήμερα η εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες έχει εστιαστεί στα κινητά δίκτυα τρίτης και τέταρτης γενιάς, υπάρχουν πολλά δίκτυα πρώτης γενιάς που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία. Βέβαια, στις χώρες όπου υπάρχει προχωρημένη υποδομή στις τηλεπικοινωνίες τα συστήματα αυτά έχουν εγκαταλειφθεί καθώς θεωρείται ότι σπαταλούν πολύτιμο φάσμα συχνοτήτων το οποίο τα σύγχρονα ψηφιακά κινητά δίκτυα επικοινωνιών εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά [58].

2.2 2^η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η δεύτερη γενιά (2G) κινητών δικτύων επικοινωνιών χρησιμοποιεί ψηφιακή μετάδοση της κίνησης. Αυτή είναι και η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των κινητών συστημάτων πρώτης και δεύτερης γενιάς: ο διαχωρισμός αναλογικού - ψηφιακού. Τα

δίκτυα δεύτερης γενιάς έχουν πολύ ευρύτερες δυνατότητες από αυτά της πρώτης γενιάς. Ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς χρήστες (είτε με διαίρεση χρόνου είτε με διαίρεση κώδικα). Επιπλέον χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κυψελών, για την ακρίβεια η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε macrocells (κυψέλες μεγάλης έκτασης), microcells (κυψέλες μικρής έκτασης) και picocells (κυψέλες περιορισμένης έκτασης κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα), με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων.

Υπάρχουν τέσσερα κύρια πρότυπα για τα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς: το Global System for Mobile communications (GSM), το Digital AMPS (D-AMPS), το Code Division Multiple Access (CDMA) IS-95 καθώς και το Personal Digital Cellular (PDC). Το GSM είναι μακράν το πιο επιτυχημένο και διαδεδομένο σύστημα δεύτερης γενιάς. Ξεκίνησε ως ένα ευρωπαϊκό σύστημα αλλά τελικά υιοθετήθηκε παγκοσμίως. Η μόνη ήπειρος στην οποία η διάδοση του GSM υστερεί είναι η αμερικανική. Παρόλα αυτά, το 2001 η βορειοαμερικανική κοινότητα για την Time Division Multiple Access (TDMA) αποφάσισε να υιοθετήσει το σύστημα Wideband CDMA (WCDMA) που ορίστηκε από το 3GPP. Προκειμένου να προετοιμαστούν για το WCDMA πολλές αμερικάνικες εταιρίες που χρησιμοποιούσαν το D-AMPS έχουν υιοθετήσουν το σύστημα GSM/GPRS.

Το βασικό σύστημα GSM χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων των 900 MHz. Όμως υπάρχουν και αρκετά παράγωγα τα οποία χρησιμοποιούν τις ζώνες των 1800 ή 1900 MHz. Ο βασικότερος λόγος ήταν η έλλειψη χωρητικότητας στη ζώνη των 900 MHz. Οι ζώνες των 1800 ή 1900 MHz μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγαλύτερο αριθμό χρηστών, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η περιοχή κάλυψης όμως μειώνεται σε σχέση με τα συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη των 900 MHz. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί και το πρότυπο GSM-400 που αναπτύχθηκε από το ίδρυμα European Telecommunications Standards Institute (ETSI) και το οποίο χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά των δικτύων GSM με υψηλότερες συχνότητες. Παρόλο που το σύστημα αυτό ήταν αρκετά αποδοτικό σε αραιοκατοικημένες και παράκτιες περιοχές, το πρότυπο GSM-400 δε χρησιμοποιείται πλέον [64], [76].

2.3 ΓΕΝΙΑ 2.5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Με τον όρο «γενιά 2.5 ή 2.5G» αναφερόμαστε στο ευρύτερο σύνολο των αναβαθμίσεων που έγιναν πάνω στα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς. Πολλές από αυτές τις αναβαθμίσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Παρόλο που η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς και αυτών της γενιάς 2.5 είναι λεπτή, υπάρχουν ορισμένες τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζουν τη γενιά 2.5. Αυτές οι τεχνολογίες είναι: η High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD), η General Packet Radio Services (GPRS) και η Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE) [19], [25].

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσίασαν οι αρχικές μορφές του GSM ήταν οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης στον αέρα που περιορίζονταν στα 9.6 Kbps. Αργότερα, τέθηκαν οι προδιαγραφές για τα 14.4 Kbps παρόλο που δε χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Η λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία HSCSD. Μέσω αυτής της τεχνολογίας ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί, αντί μίας, περισσότερες χρονοσχισμές για μία σύνδεση μεταφοράς δεδομένων. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάδοσης για αυτόν το χρήστη είναι το γινόμενο των χρονοσχισμών επί το ρυθμό μετάδοσης για μία χρονοσχισμή. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι σχετικά απλή και φθηνή. Πρόσθετο λογισμικό χρειάζεται να υλοποιηθεί στα κέντρα καθώς και καινούριες φορητές

συσκευές που θα υποστηρίζουν την τεχνολογία HSCSD. Το βασικότερο μειονέκτημα ήταν η χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Αυτός ο τρόπος μεταγωγής είχε ως αποτέλεσμα τη σπατάλη πόρων του δικτύου αφού οι χρονοσχισμές δεσμεύονταν ακόμα και όταν η χωρητικότητά τους δεν χρησιμοποιούνταν.

Η επόμενη λύση που προτάθηκε ήταν η τεχνολογία GPRS. Με αυτήν την τεχνολογία μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης των 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι αν αγνοηθεί η διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτου. Επομένως, δεσμεύει τους πόρους του δικτύου μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή/λήψη δεδομένων. Η υλοποίηση του GPRS είναι αρκετά πιο ακριβή από αυτή του HSCSD. Επίσης, το HSCSD συμπεριφέρεται με μεγαλύτερη συνέπεια σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Παρόλα αυτά, η τεχνολογία GPRS προσφέρει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την αποστολή δεδομένων μέσω των κινητών δικτύων. Είναι σίγουρο πλέον πως η αύξηση της κίνησης δεδομένων στα κινητά δίκτυα, καθιστά την GPRS τεχνολογία αναπόσπαστο στοιχείο ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας [46], [51].

Τέλος, η τρίτη και τελευταία βελτίωση του GSM προκειμένου να εξελιχθεί σε ένα δίκτυο γενιάς 2.5 είναι η EDGE. Η βασική ιδέα πίσω από το EDGE είναι μία τεχνική διαμόρφωσης που ονομάζεται Eight-Phase Shift Keying (8-PSK) [77]. Αυτή η τεχνική επηρεάζει μόνο το λογισμικό των σταθμών βάσης και προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από το βασικό ρυθμό μετάδοσης του GSM. Επιπλέον, μπορεί να συνυπάρξει με την τεχνική διαμόρφωσης Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) η οποία χρησιμοποιείται στη βασική μορφή του GSM.

2.4 3^η ΓΕΝΙΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η γρήγορη εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών ήταν ένα από τα αναμφισβήτητα γεγονότα της δεκαετίας του 1990. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο GSM λειτούργησε στη Φινλανδία το 1991. Την ίδια χρονιά, το ίδρυμα ETSI ξεκινούσε την προτυποποίηση της επόμενης γενιάς δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών. Το σύστημα που προέκυψε από αυτή την προτυποποίηση ονομάστηκε Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Η ανάπτυξη των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς δεν έγινε μόνο στο ETSI. Υπήρξαν πολλοί οργανισμοί και ερευνητικά ιδρύματα, σε παγκόσμιο επίπεδο, που είχαν τον ίδιο σκοπό. Η Εικόνα 1 δείχνει σχηματικά την εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα μέχρι την τρίτη γενιά [58].

Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς είναι η παροχή των κινητών υπηρεσιών «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα.

Επιπλέον, οι παρεχόμενες υπηρεσίες επεκτείνονται σε υπηρεσίες διαδικτύου και σε υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (προβλέπονται ρυθμοί που ξεκινούν από τα 144 Kbps και φτάνουν ακόμα και σε ρυθμούς της τάξης των Mbps). Με τον όρο υπηρεσίες πολυμέσων αναφερόμαστε σε υπηρεσίες κατά τις οποίες υπάρχει συνδυασμός εικόνας, ήχου και κειμένου σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο ψηφιακό περιβάλλον. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν τα επικρατέστερα, προς το

παρόν, συστήματα τρίτης γενιάς τα οποία είναι: το UMTS (Ευρώπη), το CDMA2000 και το NTT Docomo (Ιαπωνία) [58].

Εικόνα 1. Η εξέλιξη των προτύπων για τα κυψελωτά κινητά δίκτυα έως το 3G.

2.5 ΓΕΝΙΑ 3.5 ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Με τον όρο «γενιά 3.5» (3.5G ή 3G+) αναφερόμαστε στη νέα γενιά κινητών δικτύων τα οποία εκτός από την τεχνολογία WCDMA έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA). Η ορολογία HSPA αναφέρεται σε μία γενικότερη έννοια που υιοθετήθηκε από το UMTS Forum προκειμένου να τονίσει τις αναβαθμίσεις στις ασύρματες διεπαφές του UMTS στις εκδόσεις 5 και 6 του προτύπου 3GPP και να προσδιορίσει τα δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς.

Η HSPA αποτελεί μία νέα τεχνολογία η οποία σχεδιάστηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα καταρχήν του κατερχόμενου και σε δεύτερη φάση του ανερχόμενου ασύρματου συνδέσμου για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Το γεγονός αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο καθώς, στην πράξη, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς αποδείχθηκαν χαμηλοί για πολυμεσικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου ο αριθμός χρηστών πολυμεσικών εφαρμογών στην ίδια κυψέλη ήταν μεγάλος, η απόδοση του δικτύου στη συγκεκριμένη κυψέλη μειωνόταν ραγδαία [57].

Το πρότυπο HSPA αναφέρεται σε βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο στον κατερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, μέσω του High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) όσο και στον ανερχόμενο, μέσω του High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA μπορούν να υλοποιηθούν στο ίδιο εύρος ζώνης με το UMTS (των 5 MHz), γεγονός που επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία τόσο του HSPA όσο και του κλασσικού UMTS. Το HSDPA, προτάθηκε στην έκδοση 5 του προτύπου 3GPP (ανακοινώθηκε το 2003 και υλοποιήθηκε το 2005) και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 14.4 Mbps ανά χρήστη. Αναφορικά με τον ανερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, το HSUPA εισήχθη στην έκδοση 6 του 3GPP στάνταρ δίνοντας τη δυνατότητα υποστήριξης μέχρι και 5.8 Mbps μέσω ενός αφιερωμένου καναλιού στον ανερχόμενο σύνδεσμο [57].

Η βασική ιδέα του HSPA είναι η προσθήκη ενός νέου τύπου ευρυζωνικού καναλιού το οποίο θα είναι βελτιστοποιημένο για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πρόκειται για το κανάλι High Speed - Downlink Shared Channel (HS-DSCH) το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του throughput μόνο του κατερχόμενου συνδέσμου. Στο κανάλι αυτό έχουν ενσωματωθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων του όσον αφορά ρυθμό μετάδοσης. Προφανώς, η τεχνική HSPA δεν είναι κατάλληλη για όλα τα είδη υπηρεσιών. Για παράδειγμα, δεν παρέχει εγγυήσεις για την καθυστέρηση και συνεπώς, δεν ενδείκνυται για απαιτητικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν αφιερωμένα κανάλια (όπως το Dedicated Channel). Αντίθετα, η χρήση του HSPA ενδείκνυται προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου σε σημεία με υψηλή κίνηση δεδομένων [4], [19].

Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HSPA συγκαταλέγονται οι αυξημένες ταχύτητες για τους τελικούς χρήστες, η αυξημένη αλληλεπίδραση των υπηρεσιών καθώς και η παροχή υψηλής χωρητικότητας του δικτύου προς όφελος κυρίως των παρόχων. Η μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης παράλληλα με τις αυξημένες πλέον ταχύτητες μετάδοσης στο ασύρματο μέσο μεταφράζονται στην δυνατότητα παροχής μίας μεγάλης γκάμας πολυμεσικών εφαρμογών. Κατά συνέπεια, οι κινητοί χρήστες έχουν πλέον την ικανότητα να απολαμβάνουν υπηρεσίες που μέχρι τώρα παρέχονταν μόνο σε χρήστες με ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η πολύ γρήγορη, ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο, Voice over IP (VoIP), multi-player παιχνίδια, mobile TV, ενισχυμένη μετάδοση video/MP3 streaming, video telephony και video conferencing για κινητούς χρήστες.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ήδη μελετώνται περαιτέρω δυνατότητες αναβάθμισης της ίδιας της HSPA τεχνολογίας από το 3GPP, κατά κύριο λόγο προς τον τομέα της βελτιστοποίησης του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Όλες αυτές οι προσπάθειες αναβάθμισης προσδιορίζονται από την ορολογία HSPA+. Οι βασικές προσεγγίσεις προς την κατεύθυνση αυτή είναι η χρήση της τεχνολογίας Multiple Input-Multiple Output (MIMO) και η χρήση 64 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) κωδικοποίησης. Η MIMO τεχνική απαιτεί επιπρόσθετες κεραίες λήψης (συστοιχία κεραιών) καθώς και επιπλέον κεραίες μετάδοσης στους σταθμούς βάσης. Παράλληλα, η εφαρμογή 64 QAM κωδικοποίησης αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης υπό την προϋπόθεση ότι επικρατούν πολύ καλές συνθήκες μετάδοσης.

2.6 LONG TERM EVOLUTION

Παρά το γεγονός ότι οι τεχνολογίες HSPA και HSPA++, που οριοθετούν την «γενιά 3.5», αναμένονται να προσφέρουν τη δυνατότητα παροχής πληθώρας ευρυζωνικών υπηρεσιών, το 3GPP ήδη μελετά και επεξεργάζεται νέες τεχνολογίες που θα επικρατήσουν την αμέσως επόμενη δεκαετία στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Το νέο αυτό έργο αποκαλείται LTE και στοχεύει στην επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Κύρια προοπτική της τεχνολογίας LTE αποτελεί η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας και η επικράτηση του προτύπου στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης δεκαετίας [58].

Η τεχνολογία LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση υποστήριξης και μετάδοσης εφαρμογών μεταγωγής πακέτων (packet-switched), όπως είναι οι

πολυμεσικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους προκειμένου να ξεπεράσει τα όρια των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στο HSDPA και HSUPA αντίστοιχα. Το πρότυπο υποστηρίζει κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (1.5 MHz και 2.5 MHz) για επιπλέον ευελιξία. Επιπλέον, στοχεύει στην επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο σύνδεσμο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz [58], [65], [89].

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το «αντίπαλο» πρότυπο που ανταγωνίζεται το πρότυπο LTE είναι το Mobile WiMAX. Το ερευνητικό πεδίο που σχετίζεται με το πρότυπο LTE ήδη γνωρίζει έντονη δραστηριότητα και αναμένεται να επηρεάσει την αγορά σταδιακά.

Συγκεντρωτικά, η χρονολογική εξέλιξη των 3GPP κυψελοτών προτύπων, ξεκινώντας από τα κινητά δίκτυα 3G έως και τα αντίστοιχα δίκτυα επόμενης γενιάς LTE, απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Το πρότυπο 3G/UMTS υιοθετήθηκε αρχικά στην 3GPP Release '99 έκδοση, στην Release 5 πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του HSDPA, στην Release 6 η εισαγωγή του HSUPA, ενώ μέσω της Release 7 φθάνουμε στο πρότυπο LTE που περιγράφεται και αναλύεται στις εκδόσεις 8 και 9 του 3GPP.

Εικόνα 2. Εξέλιξη κινητών δικτύων από το πρότυπο 3G έως το LTE.

2.7 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT

Το 3GPP είναι ένας οργανισμός που αναπτύσσει προδιαγραφές για ένα σύστημα τρίτης γενιάς το οποίο είναι βασισμένο στη διεπαφή Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) και σε ένα εξελιγμένο δίκτυο GSM/GPRS. Το 3GPP έχει αναλάβει επίσης τις μελλοντικές προδιαγραφές για το σύστημα GSM. Η εξέλιξη του GSM ήταν μέσα στη ζώνη ευθύνης του ευρωπαϊκού ιδρύματος ETSI. Όμως επειδή το σύστημα του 3GPP χρησιμοποιεί το ίδιο κεντρικό δίκτυο με το GSM, όπως επίσης λόγω του διεθνούς χαρακτήρα του GSM, το 3GPP ανέλαβε την εξέλιξη και των δύο συστημάτων μαζί.

Το δίκτυο UTRA Network (UTRAN) που αναπτύσσεται από το 3GPP, περιλαμβάνει δύο τρόπους λειτουργίας: τον Frequency Division Duplex (FDD) και τον Time Division Duplex (TDD). Στον FDD ο ανερχόμενος και ο κατερχόμενος σύνδεσμος χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, κάθε μία από τις οποίες έχει εύρος ζώνης 5 MHz. Από την άλλη πλευρά, ο TDD διαφέρει από τον FDD στο γεγονός ότι και οι δύο κατευθύνσεις χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Στην περίπτωση

αυτή οι 15 χρονοσχισμές κάθε πλαισίου κατανέμονται δυναμικά μεταξύ του ανερχόμενου και του κατερχόμενου συνδέσμου.

Αρχικά το UTRAN θεωρήθηκε ένα ευρωπαϊκόν σύστημα που έχει στενή σχέση με το GSM. Αντίθετα, το CDMA2000 φάνηκε να δεσπόζει στις Η.Π.Α. Παρόλα αυτά αυτός ο διαχωρισμός δεν ισχύει πια αφού πλέον πολλές εταιρίες της Αμερικής έχουν υιοθετήσει το UTRAN ως σύστημα τρίτης γενιάς. Επίσης, πολλές άλλες αμερικανικές εταιρίες έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία GSM και κατά συνέπεια το μέλλον τους, όσον αφορά την τρίτη γενιά, έχει συνδεθεί με το UTRAN. Από την άλλη πλευρά, το CDMA2000 έχει το προβάδισμα στην Άπω Ανατολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΚΤΥΑ UMTS

ΔΙΚΤΥΑ UMTS

Αν θέλαμε να περιγράψουμε συνοπτικά το σύστημα που αναπτύσσει και εξελίσσει το 3GPP, τότε θα λέγαμε ότι είναι «μία διεπαφή CDMA στον αέρα μέσω της οποίας ανταλλάσσονται πακέτα, σε συνδυασμό με ένα εξελιγμένο δίκτυο κορμού GSM/GPRS». Από την άλλη πλευρά, η οικογένεια προτύπων International Mobile Telephony (IMT)-2000 περιλαμβάνει πολλές άλλες τεχνολογίες. Όμως, η τεχνολογία που συνδυάζει το WCDMA με το GSM και η οποία αναπτύσσεται από το 3GPP, είναι η πιο δημοφιλής. Ο λόγος για αυτή την επικράτηση είναι προφανής: μεταξύ των τεχνολογιών δεύτερης γενιάς, η τεχνολογία GSM ήταν η πιο διαδεδομένη. Συνεπώς, οι εταιρίες επέλεξαν την οικονομικότερη μεταξύ των προτάσεων του IMT-2000, δηλαδή αυτήν την πρόταση η οποία διατηρούσε την αξία και τη λειτουργικότητα των προηγούμενων επενδύσεών τους. Ο συνδυασμός του WCDMA με τις εξελίξεις του GSM όσον αφορά το δίκτυο κορμού, ονομάζεται Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Πρόκειται για το σύστημα τρίτης γενιάς που έχει επικρατήσει στην Ευρώπη και σταδιακά επεκτείνεται στη Βόρεια Αμερική με αποτέλεσμα η τρίτη γενιά κυψελωτών κινητών συστημάτων να τείνει να ταυτιστεί με αυτό το σύστημα. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά, η δομή και η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος στο οποίο θα εστιάσει κυρίως η παρούσα διδακτορική διατριβή, ως κύριο εκπρόσωπο των τεχνολογιών τρίτης γενιάς. Επίσης στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά η αρχιτεκτονική και οι λειτουργικότητες του συστήματος UMTS.

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μετάβαση ενός δικτύου GSM σε ένα δίκτυο UMTS είναι ιδιαίτερα ομαλή. Αυτή η εξέλιξη είναι ακόμα απλούστερη αν στο δίκτυο GSM έχει ενσωματωθεί και η τεχνολογία GPRS. Τα συστήματα GSM σταδιακά ενσωμάτωσαν πολλά χαρακτηριστικά τα οποία είναι συμβατά με τις απαιτήσεις του UMTS. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά του UMTS και εξετάζει το κατά πόσο υπάρχει συμβατότητα με τις λειτουργίες του GSM.

Όπως δείχνει ο Πίνακας 1, ένα δίκτυο GSM με όλες τις προσθήκες και τις βελτιώσεις προσεγγίζει ένα δίκτυο UMTS. Τα μόνα χαρακτηριστικά του UMTS τα οποία δεν καλύπτονται από ένα δίκτυο GSM οφείλονται στην πιο ευέλικτη διεπαφή CDMA που χρησιμοποιεί στον αέρα, η οποία μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα διαφορετικούς τύπους φορέα. Επίσης, το UMTS μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης που όμως δεν απέχουν πολύ από τους ρυθμούς μετάδοσης που υποστηρίζουν τα δίκτυα GSM της γενιάς 2.5 [78].

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά του UMTS και συμβατότητα του GSM.

Χαρακτηριστικά του UMTS	Συμβατότητα του GSM
Μικρές και άνετες φορητές συσκευές	Ναι
Οπουδήποτε και κάθε στιγμή (συμβατότητα με οικιακά ασύρματα δίκτυα)	Ναι (picocells, GSM office)
Οπουδήποτε (συμβατότητα με δορυφορικά δίκτυα)	Ναι

Χαρακτηριστικά του UMTS	Συμβατότητα του GSM
Διεισδυτικότητα σε κτίρια, υπόγεια κ.α.	Ναι
Ομιλία υψηλής ποιότητας	Ναι
Παγκόσμια περιαγωγή	Ναι
Υπηρεσίες νοήμονος δικτύου	Ναι
Υπηρεσίες Δεδομένων	Ναι (GPRS)
Υποστήριξη υψηλής πυκνότητας χρηστών	Ναι (ιεραρχίες κυψελών)
Πολυμέσα, ψυχαγωγία	Ναι (HSCSD)
Εναλλαγή μεταξύ φορέων πραγματικού χρόνου και όχι	Όχι
Υπηρεσίες ρυθμών μετάδοσης άνω των 200 Kbps	Όχι

3.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ UMTS

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του συστήματος UMTS σε υψηλό επίπεδο. Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα περιγραφούν όλες οι συνιστώσες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3, καθώς και οι μεταξύ τους διεπαφές [9].

Εικόνα 3. Η αρχιτεκτονική του UMTS σε υψηλό επίπεδο.

3.2.1 Κινητός Εξοπλισμός

Ο όρος κινητός εξοπλισμός ή εξοπλισμός χρήστη (User Equipment - UE) θα λέγαμε ότι ταυτίζεται με την έννοια της φορητής συσκευής. Για παράδειγμα, UE μπορεί να αποτελέσει ένα κινητό τηλέφωνο, μία συσκευή Personal Digital Assistant (PDA) ή ένας φορητός υπολογιστής. Ο UE είναι συνδεδεμένος με το UTRAN μέσω της διεπαφής Uu, η οποία είναι βασισμένη στην τεχνολογία WCDMA. Ένας UE μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα με περισσότερες της μίας κυψέλης [18], [58], [64]. Ο UE αποτελείται από δύο τμήματα:

- Το Mobile Equipment: αποτελεί το hardware της φορητής συσκευής. Ωστόσο, η συσκευή από μόνη της δε μπορεί να παρέχει καμία υπηρεσία.

- Την κάρτα Universal Subscriber Identity Module (USIM): πρόκειται για μία κάρτα η οποία περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να είναι δυνατή η πρόσβαση στο δίκτυο UMTS και η ταυτοποίηση από αυτό. Η κάρτα USIM είναι μία κάρτα αντίστοιχη της κάρτας SIM των δικτύων GSM. Όμως, ενώ η χωρητικότητα μίας κάρτας SIM είναι 8 ή 32 Kbytes, η χωρητικότητα της κάρτας USIM είναι τέτοια ώστε να μπορεί να αποθηκεύει προσωπικά δεδομένα της τάξης των Mbytes [14].

3.2.2 Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης

Το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UTRAN είναι ένα νέο δίκτυο ειδικά σχεδιασμένο για το UMTS. Διαχωρίζεται από το UE μέσω της διεπαφής Uu και από το Core Network (CN) μέσω της διεπαφής Iu. Η βασικότερη λειτουργία του UTRAN είναι η εποπτεία και η διαχείριση των ασύρματων πόρων του δικτύου. Η λειτουργία αυτή συμπεριλαμβάνει την ευθύνη για τον έλεγχο ισχύος καθώς και την υποστήριξη και διαχείριση των handovers. Η Εικόνα 4 απεικονίζει τη δομή του UTRAN [12].

Εικόνα 4. Η δομή του UTRAN.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4, το δίκτυο UTRAN αποτελείται από τους Radio Network Controllers (RNCs) και τους Node Bs. Οι Node Bs είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο ενός ή περισσότερων κυψελών. Μία ομάδα από Node Bs συνδέεται, μέσω των διεπαφών Iub, με ένα κόμβο RNC. Ο Node B λειτουργεί στο επίπεδο φυσικού μέσου και δικτύου στο μοντέλο Open Systems Interconnection (OSI) και μεταφέρει δεδομένα προς τον RNC στον οποίο είναι συνδεδεμένος. Επιπλέον, κάνει μετρήσεις σχετικά με την ποιότητα και την ισχύ των ασύρματων συνδέσμων προς τους UEs και αποστέλλει αναφορές στον κόμβο RNC [6].

Κάθε κόμβος RNC ελέγχει ένα ή περισσότερους Node Bs. Ένας κόμβος RNC μαζί με τους συνδεδεμένους σε αυτόν Node Bs αποτελούν ένα Radio Network Subsystem

(RNS). Ο RNC λαμβάνει τις πληροφορίες που συλλέγουν οι Node Bs του δικού του RNS και προσαρμόζει τις παραμέτρους του ασύρματου υποσυστήματος (subsystem). Μία τέτοια παράμετρος μπορεί να είναι η ισχύς του ασύρματου σήματος στο UE ή στον Node B. Επίσης, ο RNC είναι υπεύθυνος για την ανάθεση του κώδικα WCDMA που θα χρησιμοποιήσουν ο σταθμός βάσης (Node B) και ο κινητός εξοπλισμός στη μεταξύ τους επικοινωνία, έτσι ώστε να μην υπάρξουν παρεμβολές από άλλους ασύρματους συνδέσμους. Τέλος, μία άλλη λειτουργία των κόμβων RNC είναι ο έλεγχος των handovers που λαμβάνουν χώρα μεταξύ διαφορετικών RNSs. Προκειμένου να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη διαδικασία οι RNCs είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω της διεπαφής Iur (Εικόνα 4). Πρόκειται για μία διεπαφή η οποία είναι υλοποιημένη με δίκτυο Asynchronous Transfer Mode (ATM).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, ένας κόμβος RNC συνδέεται με το CN μέσω της διεπαφής Iu. Η συγκεκριμένη διεπαφή έχει δύο συνιστώσες: τη συνιστώσα Iu-Circuit Switched (Iu-CS) που χρησιμοποιείται για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (π.χ. φωνή) και τη συνιστώσα Iu-Packet Switched (Iu-PS) που χρησιμοποιείται για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων (π.χ. υπηρεσίες δεδομένων) [18], [91].

Στο UTRAN οι κυψέλες ομαδοποιούνται σε ομάδες κυψελών οι οποίες ονομάζονται Routing Areas (RAs). Επίσης, οι κυψέλες σε μια RA ομαδοποιούνται περαιτέρω σε UTRAN Registration Areas (URAs) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.

Εικόνα 5. RAs και URAs.

3.2.3 Core Network

Το CN είναι το δίκτυο κορμού του συστήματος UMTS. Είναι συνδεδεμένο με άλλα δίκτυα όπως τηλεφωνικά δίκτυα Public Telephone Switched Network (PSTN), δίκτυα δεδομένων Public Data Networks (PDNs) όπως το Internet καθώς και με άλλα κινητά δίκτυα. Το CN είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση, την ταυτοποίηση, τον εντοπισμό των χρηστών καθώς και για άλλες πολλές βασικές λειτουργίες. Το CN διαιρείται σε δύο πεδία: το πεδίο μεταγωγής κυκλώματος Circuit Switched (CS) και το πεδίο μεταγωγής πακέτων Packet Switched (PS). Ας σημειωθεί εδώ ότι στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα εστιάσουμε στο πεδίο PS.

Όσον αφορά το πεδίο CS, αυτό περιλαμβάνει τους εξής κόμβους:

- **Mobile Services Switching Center (MSC):** ο κόμβος MSC αποτελεί ένα κόμβο μεταγωγής ο οποίος δρομολογεί τα δεδομένα των υπηρεσιών μεταγωγής κυκλώματος εντός του δικτύου UMTS. Κάθε κόμβος MSC διαχειρίζεται πολλά RNCs τα οποία συνδέονται σε αυτόν μέσω της διεπαφής Iu-CS. Επίσης, είναι συνδεδεμένος με τις βάσεις δεδομένων του δικτύου όπως τη βάση δεδομένων Home Location Register (HLR) και τη Visitor Location Register (VLR). Τέλος, μία άλλη πολύ χρήσιμη λειτουργία του κόμβου MSC είναι η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών για τις υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος.
- **Gateway Mobile Services Switching Center (GMSC):** Ο κόμβος GMSC είναι συνδεδεμένος με τους κόμβους MSC. Η λειτουργία του είναι να διασυνδέει το δίκτυο UMTS με άλλα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος όπως PSTN και ISDN.
- **Visitor Location Register (VLR):** Ο κόμβος VLR είναι μία βάση δεδομένων. Συνήθως κάθε VLR αντιστοιχεί σε ένα MSC. Η βάση VLR αποθηκεύει προσωρινή πληροφορία σχετικά με την ταυτοποίηση και την ασφάλεια καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες που σχετίζονται με όλους τους χρήστες που διαχειρίζεται κάθε δεδομένη στιγμή ο αντίστοιχος MSC. Η βάση VLR λαμβάνει την αρχική πληροφορία από τη βάση HLR και αναλαμβάνει να την ενημερώσει για τυχόν μεταβολές στα δεδομένα της. Όλες οι συναλλαγές μεταξύ VLR και HLR γίνονται μέσω ενός MSC.

Όσον αφορά το πεδίο PS, αυτό αποτελείται από τους παρακάτω κόμβους. Αξίζει να επισημανθεί η αντιστοιχία που υπάρχει με τους κόμβους του πεδίου CS.

- **Serving GPRS Support Node (SGSN):** Ο SGSN αποτελεί τον αντίστοιχο κόμβο του MSC στο πεδίο CS. Αυτό σημαίνει ότι αναλαμβάνει τη δρομολόγηση δεδομένων των υπηρεσιών μεταγωγής πακέτων εντός του δικτύου UMTS. Επιπλέον, διαχειρίζεται τους κόμβους RNCs οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν μέσω της διεπαφής Iu-PS. Επίσης, αλληλεπιδρά με βάσεις δεδομένων, όπως η βάση HLR. Τέλος, ο κόμβος SGSN είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών για τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων.
- **Gateway GPRS Support Node (GGSN):** Πρόκειται για ένα κόμβο αντίστοιχο του GMSC του πεδίου CS. Διασυνδέει τους κόμβους SGSNs με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων όπως το X.25 και το Internet.

Τέλος, υπάρχουν ορισμένοι κόμβοι του CN οι οποίοι είναι κοινοί, δηλαδή τους χρησιμοποιούν και τα δύο πεδία. Παρακάτω, αναφέρονται οι δύο σημαντικότεροι από αυτούς:

- **Home Location Register (HLR):** Πρόκειται για μία βάση δεδομένων η οποία αποθηκεύει δεδομένα των χρηστών τα οποία μένουν σχετικά σταθερά στο χρόνο. Αυτά τα δεδομένα είναι αναγνωριστικά, πληροφορίες για τις υπηρεσίες του δικτύου στις οποίες συμμετέχει ο συνδρομητής κ.α.
- **Authentication Center (AuC):** Αποτελεί ένα κόμβο που είναι συσχετισμένος με ένα HLR. Ο κόμβος αυτός αποθηκεύει πληροφορίες ταυτοποίησης και κρυπτογράφησης για τους συνδρομητές. Οι πληροφορίες αυτές φορτώνονται στον κόμβο κατά την έναρξη της συνδρομής από το χρήστη.

Η Εικόνα 6 δείχνει τη δομή του CN. Εκτός από τους κόμβους που προαναφέρθηκαν, στην εικόνα αυτή σημειώνονται οι διεπαφές μεταξύ των κόμβων του CN [9], [58].

Εικόνα 6. Η δομή του CN.

3.3 ΔΙΕΠΑΦΕΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν οι βασικότερες διεπαφές του δικτύου UMTS. Επίσης, για κάθε διεπαφή θα παρουσιαστούν τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία των κόμβων που αλληλεπιδρούν. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα εστιαστεί στο πεδίο PS το οποίο είναι και το πεδίο που θα μας απασχολήσει από το σημείο αυτό και έπειτα.

3.3.1 Διεπαφή *Uu*

Η ασύρματη διεπαφή είναι πάντοτε η πιο κρίσιμη διεπαφή κατά το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ενός κινητού δικτύου. Για το UMTS, η διεπαφή *Uu* μεταξύ του Node B και του UE, έχει υλοποιηθεί με την αρχιτεκτονική που απεικονίζει η Εικόνα 7. Όπως φαίνεται, έχουν προσδιοριστεί τα επίπεδα πρωτοκόλλων που αντιστοιχούν στο επίπεδο φυσικού μέσου, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων καθώς και το επίπεδο δικτύου [18].

Το επίπεδο φυσικού μέσου (1ο επίπεδο στο μοντέλο διασυνδέσεων OSI) είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση των δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 7, για το επίπεδο αυτό οι προδιαγραφές του UMTS καθορίζουν τη χρήση των τεχνολογιών FDD και TDD του WCDMA.

Όσον αφορά το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (2ο επίπεδο), αυτό περιέχει τέσσερα υπό-επίπεδα. Τα δύο πρώτα υπό-επίπεδα χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου αλλά και πληροφορίας. Το πρώτο υπό-επίπεδο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Medium Access Control (MAC) [20]. Το πρωτόκολλο MAC βρίσκεται αμέσως μετά το φυσικό επίπεδο. Χρησιμοποιεί λογικά κανάλια και τα αντιστοιχίζει σε κανάλια μεταφοράς για την επικοινωνία του φυσικού επιπέδου με τα υψηλότερα επίπεδα. Επίσης, το πρωτόκολλο αυτό διαχειρίζεται τις προτεραιότητες μεταξύ των UEs, όπως επίσης και τις προτεραιότητες μεταξύ των ροών δεδομένων που αφορούν ένα συγκεκριμένο UE. Άλλες λειτουργίες που εκτελεί το πρωτόκολλο MAC είναι ο

έλεγχος των κινήσεων, η κρυπτογράφηση, η πολυπλεξία κ.α. Το δεύτερο πρωτόκολλο που συναντάμε στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων της διεπαφής Uu είναι το Radio Link Control (RLC). Το πρωτόκολλο αυτό είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση και παρακολούθηση της μεταφοράς δεδομένων καθώς και για τις ρυθμίσεις Quality of Service (QoS).

Εικόνα 7. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Uu.

Τα επόμενα δύο πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά πληροφορίας και όχι για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι το Packet Data Convergence Protocol (PDCP) και το Broadcast Control (BMC) [21]. Το πρώτο είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή των δεδομένων που παρέχουν τα πραγματικά πρωτόκολλα δεδομένων των πιο πάνω επιπέδων, σε ασύρματα πρωτόκολλα. Το PDCP προς το παρόν υποστηρίζει τα πρωτόκολλα IPv4 και IPv6 και μπορεί εύκολα να επεκταθεί προκειμένου να υποστηρίξει περισσότερα. Το πρωτόκολλο BMC είναι υπεύθυνο για τις υπηρεσίες broadcast και multicast μετάδοσης.

3.3.2 Διεπαφή Iub

Η διεπαφή Iub είναι αυτή που διασυνδέει τους κόμβους RNC με τους Node Bs. Η Εικόνα 8 δείχνει την ιεραρχία των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διεπαφής [25]. Πρόκειται για μία διεπαφή η οποία είναι ενσύρματη και, κατά συνέπεια, το επίπεδο φυσικού μέσου μπορεί να υλοποιηθεί από πρωτόκολλα όπως το ETSI STM-1, STM-4, SONET STS-3c, International Telecommunication Union (ITU) STS-1 κ.α. Πάνω από το επίπεδο αυτό, στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο ATM. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο το οποίο χρησιμοποιείται σε όλες τις ενσύρματες διεπαφές του δικτύου UMTS. Αυτό γιατί αποτελεί ένα πανίσχυρο πρωτόκολλο που μπορεί να χειρίζεται όλους τους τύπους κινήσεων. Για την ακρίβεια, το ATM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγχρονες αλλά και για ασύγχρονες κινήσεις όπως επίσης και για κινήσεις μεταγωγής πακέτων αλλά και κυκλώματος.

Όπως δείχνει η Εικόνα 8, πάνω από το επίπεδο του ATM χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα ATM Adaptation Layer (AAL) 2 και 5. Το AAL2 χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου όπως επίσης και για τη μεταφορά πληροφορίας. Το AAL5 χρησιμοποιείται μόνο για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου. Τα πρωτόκολλα αυτά αναλαμβάνουν την επεξεργασία των δεδομένων από τα υψηλότερα επίπεδα προκειμένου να μπορούν να μεταδοθούν από το επίπεδο ATM.

Στο αμέσως υψηλότερο υπό-επίπεδο συναντούμε δύο άλλα πρωτόκολλα. Πρόκειται για το User Plane Framing Protocol (UPFP) και Service Specific Connection-Oriented Protocol (SSCOP). Το πρώτο πρωτόκολλο βρίσκεται πάνω από το AAL2 και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου αλλά και πληροφορίας. Αντίθετα, το πρωτόκολλο SSCOP τοποθετείται πάνω από το AAL5. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που παρέχει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων παράλληλα με συντήρηση της σύνδεσης και έλεγχο ροής. Η χρήση του στη διεπαφή Iub σχετίζεται με τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 8, στα ανώτερα υπό-επίπεδα του επιπέδου ζεύξης δεδομένων συναντούμε το πρωτόκολλο Service Specific Coordination Function for Support of Signaling at the User-Network Interface (SSCF-UNI) καθώς και τα ήδη γνωστά πρωτόκολλα MAC, RLC, RRC, και PDCP. Τέλος, το πρωτόκολλο Node B Application Part (NBAP) χρησιμοποιείται προκειμένου να δίνεται η δυνατότητα στον RNC να διαχειρίζεται κάθε Node B που έχει συνδεθεί σε αυτόν [25].

Εικόνα 8. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iub.

3.3.3 Διεπαφή Iur

Η διεπαφή Iur διασυνδέει δύο RNCs. Πρόκειται για μία διεπαφή η οποία εισήχθη στα συστήματα UMTS, ενώ στα συστήματα GSM δεν υπήρχε άμεση σύνδεση μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου αλλά και πληροφορίας. Ειδικότερα, όσον αφορά τα δεδομένα ελέγχου, αυτά σχετίζονται με τη διαχείριση των ασύρματων πόρων καθώς και με τις διαδικασίες του handover και του Serving RNS (SRNS) relocation. Η ιεραρχία των πρωτοκόλλων που υλοποιούν τη διεπαφή Iur φαίνεται στην Εικόνα 9.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 9, η ιεραρχία των πρωτοκόλλων για τη μεταφορά πληροφορίας δε διαφέρει από τη διεπαφή Iub. Όσον αφορά τα δεδομένα ελέγχου έχουμε τη χρήση αρκετών νέων πρωτοκόλλων σε σχέση με τις προηγούμενες διεπαφές. Καταρχήν, η Εικόνα 9 δείχνει ότι χρησιμοποιείται ο συνδυασμός Internet Protocol (IP) / UDP ακριβώς πάνω από το επίπεδο του AAL5. Πρόκειται για την υλοποίηση του «IP over ATM» κατά την οποία η πληροφορία του IP καταμερίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να μεταδοθεί πάνω από το ATM. Επιπλέον, τα

υπόλοιπα τέσσερα νέα πρωτόκολλα ελέγχου και σηματοδοσίας είναι: το Message Transfer Part Level 3 (MTP3-b) για τον έλεγχο της δρομολόγησης των μηνυμάτων, το MTP3 User Adaptation Layer (M3UA), το Signaling Connection Control Part (SCCP) και το Radio Network Sublayer Application Part (RNSAP). Ειδικότερα για το RNSAP, πρόκειται για ένα πρωτόκολλο το οποίο παρέχει όλες τις λειτουργίες για τη διαχείριση των ασύρματων πόρων, για τις μετρήσεις πάνω σε αυτούς και για την υποστήριξη των διαδικασιών του handover και SRNS relocation [25].

Εικόνα 9. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iur.

3.3.4 Διεπαφή Iu-PS

Η παρούσα παράγραφος παρουσιάζει την ιεραρχία των πρωτοκόλλων όσον αφορά τη διεπαφή Iu-PS. Η διεπαφή Iu-PS είναι, για το πεδίο PS, ο σύνδεσμος όχι μόνο των RNCs με τους κόμβους SGSN αλλά και μεταξύ των δύο δομικών στοιχείων του UMTS, του UTRAN και του CN. Το βασικότερο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων ελέγχου που χρησιμοποιείται πάνω από αυτή τη διεπαφή είναι το Radio Access Network Application Part (RANAP) το οποίο απεικονίζεται μεταξύ των άλλων στην Εικόνα 10.

Το RANAP είναι το πρωτόκολλο που εξασφαλίζει τη σηματοδοσία μεταξύ του UTRAN και του CN. Το πρωτόκολλο αυτό παρέχει υπηρεσίες που σχετίζονται με τη διαδικασία SRNS relocation, τη διαχείριση ροής και συμφόρησης της διεπαφής Iu-PS, τον εντοπισμό της θέσης κάθε UE καθώς και τη διαχείριση σφαλμάτων γενικότερα [24]. Προκειμένου να μπορεί να εκτελεί τις πιο πάνω λειτουργίες διαχείρισης, το πρωτόκολλο RANAP διαθέτει και τις αντίστοιχες δυνατότητες για εποπτεία και αναφορά της κατάστασης του συστήματος. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούν οι λειτουργίες κρυπτογράφησης που παρέχει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Μέσω της διεπαφής Iu-PS ανταλλάσσονται οι πληροφορίες κρυπτογράφησης μεταξύ UTRAN και CN προκειμένου τα δεδομένα που ανταλλάσσονται να είναι προστατευμένα από τυχόν απόπειρα υποκλοπής.

Εικόνα 10. Τα πρωτόκολλα της διεπαφής Iu-PS.

3.3.5 Άλλες Διεπαφές

Οι υπόλοιπες διεπαφές του δικτύου UMTS περιλαμβάνουν τις επιμέρους διεπαφές του CN. Μεταξύ αυτών, οι πιο σημαντικές είναι: η διεπαφή Gn η οποία διασυνδέει τους κόμβους SGSN και GGSN καθώς και η Gi η οποία συνδέει τους κόμβους GGSN με τους εξωτερικούς κόμβους μεταγωγής πακέτων. Όσον αφορά τη διεπαφή Gi, αυτή αποτελεί τη σύνδεση μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και των εξωτερικών δικτύων μεταφοράς δεδομένων. Οι διεπαφές αυτές δεν έχουν κάτι ιδιαίτερο στην αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων τους συγκριτικά με οποιοδήποτε ενσύρματο δίκτυο μεταφοράς δεδομένων. Για την ακρίβεια, χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IP πάνω από το ATM, καθώς και πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων όπως το Transmission Control Protocol (TCP) και το UDP. Στο σημείο αυτό πρέπει να διαχωρίσουμε τα δύο επίπεδα IP που εμφανίζονται. Το χαμηλότερο επίπεδο IP αναφέρεται στη μεταφορά σηματοδότησης μεταξύ των κόμβων του συστήματος UMTS. Αντίθετα, το υψηλότερο αναφέρεται στη μεταφορά των δεδομένων για τις εφαρμογές του χρήστη. Για το λόγο αυτό, μόνο το υψηλότερο επίπεδο IP είναι ορατό στα εξωτερικά IP δίκτυα.

Η Εικόνα 11 απεικονίζει τη συνολική αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων για τη μεταφορά πληροφορίας στο UMTS δίκτυο. Οι υπηρεσίες στις οποίες αντιστοιχεί η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αφορούν στη μεταγωγή πακέτων, δηλαδή στο πεδίο PS του δικτύου. Οι συνδέσεις στο σχήμα απεικονίζονται με βέλη. Αυτό που έχει σημασία είναι η αποκατάσταση των συνδέσεων από άκρο σε άκρο, όπως φαίνονται στο πάνω μέρος της εικόνας. Οι συνδέσεις αυτές πρακτικά αποτελούνται από επιμέρους συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του συστήματος, οι οποίες σημειώνονται με μικρότερα βέλη [18], [20], [21], [24], [25], [58].

Εικόνα 11. Η αρχιτεκτονική πρωτόκολλων για τη μεταφορά πληροφορίας.

3.4 ΚΑΝΑΛΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Στο δίκτυο πρόσβασης UTRAN υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι καναλιών: τα λογικά κανάλια, τα κανάλια μεταφοράς και τα φυσικά κανάλια. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται κάθε τύπος καναλιού και δίνονται ορισμένα παραδείγματα κατά περίπτωση.

3.4.1 Λογικά Κανάλια

Οι υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων του πρωτοκόλλου MAC παρέχονται μέσω των λογικών καναλιών. Τα λογικά κανάλια είναι αυτά που προσδιορίζουν τον τύπο της πληροφορίας που μεταδίδεται. Χρησιμοποιούνται στη διεπαφή μεταξύ των επιπέδων RLC και MAC. Τα κανάλια αυτά μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα κανάλια ελέγχου και τα κανάλια κίνησης. Στη συνέχεια, ένα κανάλι ελέγχου μπορεί να είναι είτε κοινό είτε αφιερωμένο. Κοινά λέγονται τα κανάλια point-to-multipoint (p-t-m), ενώ αφιερωμένα λέγονται τα κανάλια point-to-point (p-t-p), δηλαδή αυτά που χρησιμοποιούνται μόνο από ένα χρήστη [58]. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα λογικά κανάλια καθώς και τη λειτουργία τους.

Πίνακας 2. Τα λογικά κανάλια του δικτύου πρόσβασης.

Λογικό Κανάλι Ελέγχου	Λειτουργία
Broadcast Control Channel (BCCH)	Κατερχόμενο κανάλι για broadcasting πληροφοριών ελέγχου
Paging Control Channel (PCCH)	Κατερχόμενο κανάλι μεταφορά πληροφορίας paging
Dedicated Control Channel (DCCH)	Κανάλι διπλής κατεύθυνσης για μεταφορά πληροφοριών αφιερωμένου ελέγχου
Common Control Channel (CCCH)	Κανάλι διπλής κατεύθυνσης για μεταφορά πληροφοριών ελέγχου μεταξύ του δικτύου και των UEs

Λογικό Κανάλι Κίνησης	Λειτουργία
Dedicated Traffic Channel (DTCH)	Αφιερωμένο κανάλι για τη μεταφορά πληροφοριών για ένα UE
Common Traffic Channel (CTCH)	Κατερχόμενο κανάλι point-to-multipoint για μεταφορά πληροφοριών για όλους ή μία ομάδα UEs

3.4.2 Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς είναι αυτά που προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα μεταφερθούν τα δεδομένα από το επίπεδο φυσικού μέσου. Ουσιαστικά, τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται στη διεπαφή που βρίσκεται μεταξύ του πρωτοκόλλου MAC και του αμέσως κατώτερου επιπέδου [1], [58], [64].

Πίνακας 3. Οι ιδιότητες των καναλιών μεταφοράς.

	Αφιερωμένα Κανάλια	Κοινά Κανάλια		
	DCH	HS-DSCH	FACH	RACH
Ανερχόμενος / κατερχόμενος σύνδεσμος	Και οι δύο	Κατερχόμενος	Κατερχόμενος	Ανερχόμενος
Χρήση κώδικα	Σύμφωνα με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης	Κοινός κώδικας μεταξύ των χρηστών	Σταθεροί κώδικες για κάθε κυψέλη	Σταθεροί κώδικες για κάθε κυψέλη
Γρήγορος έλεγχος ισχύος	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Soft handover	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι
Ενδεικνυόμενη χρήση	Μεγάλα ποσά δεδομένων	Μεγάλα ποσά δεδομένων	Μικρά ποσά δεδομένων	Μικρά ποσά δεδομένων
Κατάλληλο για καταγισμό	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
Τεχνολογία διαθέσιμη στα πρώιμα συστήματα	Ναι	Όχι	Ναι	Ναι

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες καναλιών μεταφοράς: τα κοινά κανάλια (common channels), τα αφιερωμένα (dedicated) και τα διαμοιραζόμενα (shared). Τα κοινά κανάλια είναι κανάλια μονής κατεύθυνσης τα οποία χρησιμοποιούνται από όλους τους χρήστες σε μία κυψέλη. Τα σημαντικότερα από τα κανάλια αυτά είναι το Forward Access Channel (FACH) για τον κατερχόμενο σύνδεσμο και το Random Access Channel (RACH) για τον ανερχόμενο. Στην κατηγορία των διαμοιραζόμενων καναλιών ανήκει το Downlink Shared Channel (DSCH) καθώς και το High-Speed DSCH (HS-DSCH). Τα συγκεκριμένα κανάλια είναι πάντα συσχετισμένα με ένα αφιερωμένο κανάλι. Ειδικότερα, το HS-DSCH αποτελεί ένα κανάλι που υλοποιεί την

τεχνολογία HSDPA). Είναι ένα βελτιστοποιημένο κανάλι για ταχύτατη μετάδοση δεδομένων το οποίο ενσωματώνει ένα ευέλικτο μηχανισμό προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, στην κατηγορία του αφιερωμένου καναλιού ανήκει το Dedicated Channel (DCH) το οποίο είναι διπλής κατεύθυνσης και δεσμεύεται για ένα μόνο χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι αν ένα DCH δεσμευθεί είτε ως ανερχόμενος είτε ως κατερχόμενος σύνδεσμος, τότε πρέπει να δεσμευθεί και για την αντίθετη κατεύθυνση. Στην αντίθετη κατεύθυνση όμως, ο ρυθμός μετάδοσης μπορεί να διαφέρει [34], [35].

Ο Πίνακας 3 απεικονίζει τις βασικές ιδιότητες των σημαντικότερων καναλιών μεταφοράς. Όπως φαίνεται στον πίνακα, η διαδικασία του soft handover υποστηρίζεται μόνο από το κανάλι DCH. Αντίθετα, τα υπόλοιπα κανάλια υποστηρίζουν άλλων ειδών handovers. Επιπλέον, μόνο το HS-DSCH υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Επιπλέον, όλα τα κανάλια μεταφορά εκτός του DCH δεν υποστηρίζουν γρήγορο έλεγχο ισχύος (Fast Power Control). Αυτό είναι λογικό αφού είναι κοινά μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη, με αποτέλεσμα ο έλεγχος ισχύος να μην είναι εύκολα εφικτός.

Πίνακας 4. Τα κανάλια μεταφοράς του δικτύου πρόσβασης.

Κοινά Κανάλια	Λειτουργία
Broadcast Channel (BCH)	Κατερχόμενο κανάλι για broadcasting πληροφοριών
Paging Channel (PCH)	Κατερχόμενο κανάλι μεταφορά πληροφορίας paging
Random Access Channel (RACH)	Ανερχόμενο κανάλι για αρχική πρόσβαση στο δίκτυο
Common Packet Channel (CPCH)	Ανερχόμενο κανάλι για μετάδοση καταιγιστικής πληροφορίας
Forward Access Channel (FACH)	Κατερχόμενο κανάλι για μεταφορά μικρών ποσοτήτων πληροφορίας
Downlink Shared Channel (DSCH)	Κατερχόμενο κανάλι για μεταφορά αφιερωμένων δεδομένων ελέγχου και κίνησης
High-Speed Downlink Shared Channel (HS-DSCH)	Κατερχόμενο κανάλι βελτιστοποιημένο για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης
Uplink Shared Channel (USCH)	Ανερχόμενο κανάλι για μεταφορά αφιερωμένων δεδομένων ελέγχου και κίνησης
Αφιερωμένο Κανάλι	Λειτουργία
Dedicated Channel (DCH)	Κανάλι διπλής κατεύθυνσης αφιερωμένο σε ένα UE

Ο Πίνακας 4, παρουσιάζει συνοπτικά όλα τα κανάλια μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στο UTRAN καθώς και τη λειτουργία τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.3.1, ο ρόλος του πρωτοκόλλου MAC είναι να αντιστοιχίζει τα λογικά κανάλια σε κανάλια μεταφοράς. Οι συγκεκριμένες αντιστοιχίες που υπάρχουν μεταξύ των λογικών και των καναλιών μεταφοράς, όσον αφορά τους κατερχόμενους και τους ανερχόμενους συνδέσμους, απεικονίζονται στην Εικόνα 12 [64], [76].

Εικόνα 12. Η αντιστοιχία λογικών καναλιών σε κανάλια μεταφοράς.

3.4.3 Φυσικά Κανάλια

Τα φυσικά κανάλια είναι αυτά που προσδιορίζουν τα ακριβή χαρακτηριστικά του φυσικού μέσου. Αυτό γιατί αποτελούν τα κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται στο επίπεδο φυσικού μέσου της ασύρματης διεπαφής. Το φάσμα συχνοτήτων που διατίθεται σε αυτά τα κανάλια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους. Στη λειτουργία FDD, οι ανερχόμενοι και οι κατερχόμενοι σύνδεσμοι έχουν το δικό τους κανάλι συχνοτήτων. Αντίθετα, στη λειτουργία TDD υπάρχει μόνο ένα κανάλι συχνοτήτων το οποίο χωρίζεται σε χρονοσχισμές. Στη συνέχεια οι χρονοσχισμές μοιράζονται στον ανερχόμενο και τον κατερχόμενο σύνδεσμο. Με βάση τον τρόπο διαχείρισης του φάσματος συχνοτήτων τα φυσικά κανάλια διαχωρίζονται σε FDD και TDD φυσικά κανάλια. Κάθε κατηγορία διαιρείται περαιτέρω σε άλλες δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν το συγκεκριμένο φυσικό κανάλι χρησιμοποιείται στον ανερχόμενο ή στον κατερχόμενο σύνδεσμο [64]. Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται η αντιστοιχία όλων των καναλιών του UMTS που χρησιμοποιούνται στην κατερχόμενη κατεύθυνση [16], [17].

Εικόνα 13. Αντιστοίχιση καναλιών για την κατερχόμενη κατεύθυνση.

3.5 ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΤΩΝ

Όπως είναι γνωστό, τα κινητά τηλέφωνα μπορούν να διατηρούν τις συνδέσεις τους καθώς κινούνται από μία κυψέλη σε μία άλλη. Αυτή η διαδικασία η οποία μεταφέρει τη σύνδεση από τον ένα Node B στον άλλο, λέγεται handover. Τα handovers στο CDMA (συστήματα UMTS) διαφέρουν κατά πολύ από τα handovers στο TDMA (συστήματα GSM). Αυτό γιατί στο UMTS, αντίθετα με το GSM, όλους τους UEs

χρησιμοποιούν διαρκώς το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν οι βασικοί τύποι handover.

3.5.1 *Softer και Soft Handover*

Κατά τη διάρκεια ενός soft handover, ο UE είναι συνδεδεμένο ταυτόχρονα σε περισσότερους από ένα Node Bs. Για την ακρίβεια, δέχεται τις μεταδόσεις δύο ή περισσότερων Node Bs. Επειδή οι μεταδόσεις αυτές γίνονται στην ίδια συχνότητα, ένα UE τις αντιλαμβάνεται σαν αλληλοσυμπληρούμενα τμήματα της ίδιας πληροφορίας. Το μόνο που διαφέρει σε κάθε τμήμα είναι ο κώδικας διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται σε κάθε μετάδοση. Όταν η σύνδεση με ένα από τους Node Bs δεν είναι απαραίτητη, η αντίστοιχη σύνδεση μπορεί να εγκαταλειφθεί. Το softer handover είναι ένα handover μεταξύ δύο τομέων της ίδιας κυψέλης. Η περίπτωση A στην Εικόνα 14 απεικονίζει ένα softer handover. Από την πλευρά του UE, το softer handover είναι μία άλλη περίπτωση soft handover. Από την πλευρά του κινητού δικτύου, πρόκειται για μία εσωτερική διαδικασία του εμπλεκόμενου Node B. Ο κόμβος RNC που ελέγχει τον Node B δε συμμετέχει στη διαδικασία, με αποτέλεσμα την οικονομία στη δέσμευση της χωρητικότητας της διεπαφής Iub [91].

Η διαδικασία του soft handover εκτελείται στα όρια μεταξύ των κυψελών. Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας, αφού η ένταση του σήματος που λαμβάνει ο UE είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα λάμβανε αν χρησιμοποιούνταν μόνο ένας ασύρματος σύνδεσμος. Χωρίς τη χρήση του soft handover ο Node B θα έπρεπε να μεταδίδει με μεγαλύτερη ένταση προκειμένου να φτάσει το UE. Το γεγονός αυτό, θα προκαλούσε αύξηση της παρεμβολής [82].

Προκειμένου η χρήση των soft handovers να γίνεται με αποδοτικότητα, το δίκτυο διαθέτει ένα μηχανισμό ο οποίος κάνει τη διαχείριση των handovers. Για το σκοπό αυτό γίνονται μετρήσεις στους ανερχόμενους συνδέσμους, ενώ για τους κατερχόμενους συνδέσμους τα αποτελέσματα λαμβάνονται από τα UEs. Οι εμπλεκόμενες κυψέλες διαχωρίζονται σε τρία σύνολα: το active set, το monitored set και το detected set. Σε κάθε σύνολο αντιστοιχούν κάποιες απαιτήσεις ως προς τις μετρήσεις που του γίνονται. Το active set περιέχει τους Node Bs που αναμειγνύονται σε ένα soft handover με ένα UE. Όταν η ένταση του σήματος ενός Node B ξεπερνά κάποιο κατώφλι, ο συγκεκριμένος Node B προστίθεται στο active set. Φυσικά υπάρχει αντίστοιχο κατώφλι για την απόρριψη ενός Node B. Το monitored set περιέχει κυψέλες που συνορεύουν με την κυψέλη στο οποίο βρίσκεται ο UE, και οι οποίες είναι υποψήφιες για handover. Φυσικά από το monitored set εξαιρούνται οι Node Bs που έχουν ήδη προστεθεί στο active set, αν υπάρχει. Ο UE πρέπει να παρακολουθεί την ένταση του σήματος από τους Node Bs του monitored set σύμφωνα με κάποιους κανόνες. Τέλος, το detected set περιέχει όλους τους Node Bs από τους οποίους ο UE λαμβάνει σήμα, και οι οποίοι δε συνορεύουν με την κυψέλη στην οποία βρίσκεται ο UE τη συγκεκριμένη στιγμή [10].

Ανάλογα με το πού βρίσκεται ο νέος Node B σε σχέση με τον αρχικό, υπάρχουν οι εξής τύποι soft handover:

- **Inter-Node B/intra-RNS handover:** Αυτός ο τύπος handover εκτελείται όταν ο UE μετακινείται από μία κυψέλη ενός Node B σε μία κυψέλη άλλου Node B ο οποίος ανήκει στο ίδιο RNS με τον αρχικό (περίπτωση B στην Εικόνα 14).
- **Inter-Node B/inter-RNS/intra-SGSN:** Σε αυτή την περίπτωση ο UE μετακινείται από μία κυψέλη ενός Node B στην κυψέλη ενός άλλου Node B ο οποίος ανήκει

σε διαφορετικό RNS σε σχέση με τον αρχικό. Συνεπώς, οι Node Bs ελέγχονται από διαφορετικούς RNCs οι οποίοι όμως συνδέονται με τον ίδιο SGSN (περίπτωση Γ στην Εικόνα 14).

- **Inter-Node B/inter-RNS/inter-SGSN:** Σε αυτή την περίπτωση ο UE μετακινείται από μία κυψέλη ενός Node B στην κυψέλη ενός άλλου Node B ο οποίος ανήκει σε διαφορετικό RNS σε σχέση με τον αρχικό. Επιπλέον, οι αντίστοιχοι RNCs συνδέονται με διαφορετικούς SGSNs (περίπτωση Δ στην Εικόνα 14).

Εικόνα 14. Οι δυνατές περιπτώσεις softer και soft handover.

Ένα σημείο που αξίζει να αναφερθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορά στις περιπτώσεις που ένα inter-RNS handover λαμβάνει χώρα. Ο σκοπός του soft handover είναι να απαλλάξει τις διεπαφές Iu-PS καθώς και αυτές του CN από την αποστολή της ίδιας πληροφορίας. Επίσης, ένας άλλος στόχος του soft handover είναι να απαλλάξει το CN από τη συμμετοχή του στη διαδικασία του handover, κάτι το οποίο ίσχυε στα συστήματα GSM. Για το σκοπό αυτό, στην περίπτωση που ένα inter-RNS handover εκτελείται, ο αρχικός RNC είναι ο μόνος RNC που διατηρεί σύνδεση με το CN. Ο συγκεκριμένος RNC ονομάζεται Serving RNC (SRNC) και είναι ο κόμβος που μεταδίδει τα δεδομένα της κίνησης προς το UE, στους υπόλοιπους RNC. Οι υπόλοιποι RNCs ονομάζονται Drift RNCs (DRNCs). Η προώθηση των δεδομένων από τον SRNC προς τους DRNCs γίνεται μέσω της διεπαφής Iur. Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στα συστήματα UMTS, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 3.3.3 που περιγράφει τη διεπαφή Iur.

Προκειμένου να δοθεί μία σχηματική απεικόνιση των ροών δεδομένων, η Εικόνα 15 δείχνει τη ροή των δεδομένων για το inter-RNS/intra-SGSN handover, ενώ η Εικόνα 16 δείχνει την αντίστοιχη ροή για το inter-RNS/inter-SGSN handover. Όσον αφορά και στις δύο εικόνες, ο RNC1 είναι ο SRNC, ενώ ο RNC2 είναι ο DRNC. Επίσης, η ενιαία γραμμή απεικονίζει την αρχική ροή δεδομένων προς το UE. Αντίθετα, η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει τη ροή δεδομένων που αποκαθίσταται μέσω της

διεπαφής Iur μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας του soft handover. Μέσω της σχηματικής αυτής απεικόνισης υπονοείται η αποχή του CN από τη διαδικασία. Για παράδειγμα, στην Εικόνα 16, φαίνεται ότι ο κόμβος SGSN2 δε μεταδίδει δεδομένα στον RNC2, αντίθετα ο RNC2 λαμβάνει τα δεδομένα που θα αποστείλει στο UE από τον RNC1.

Εικόνα 15. Η ροή δεδομένων σε ένα inter-RNS/intra-SGSN handover.

Εικόνα 16. Η ροή δεδομένων σε ένα inter-RNS/inter-SGSN handover.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των softer και soft handovers σε ένα UMTS δίκτυο είναι πολλά. Το σημαντικότερο είναι ότι η ποιότητα της επικοινωνίας διατηρείται

υψηλή αφού ο UE λαμβάνει ταυτόχρονα την ίδια πληροφορία από περισσότερες της μίας κεραίες. Επιπλέον, δεν υπάρχουν διακοπές στην επικοινωνία, λόγω του τερματισμού της σύνδεσης με μία κεραία. Αντίθετα, η μετάβαση από τη μία κυψέλη στην άλλη γίνεται ομαλά, αφού ο UE διατηρεί σύνδεση με τουλάχιστο μία κεραία σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι τα ίδια δεδομένα φτάνουν στο UE δύο ή περισσότερες φορές, με αποτέλεσμα ο έλεγχος λάθους να είναι απλός και να μην χρειάζεται αναμετάδοση των πακέτων. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η επιβάρυνση που προσδίδει η υψηλή συχνότητα λαθών και γίνεται οικονομία στους ενεργειακούς πόρους του δικτύου αλλά και του UE. Ένας άλλος παράγοντας που συντελεί στην οικονομία ενέργειας είναι το γεγονός ότι υπάρχουν περισσότερες κεραίες που μεταδίδουν στον ίδιο UE, κάθε κεραία μπορεί να διατηρεί ένα σχετικά χαμηλό επίπεδο έντασης του σήματος. Αντίθετα, αν ήταν η μοναδική κεραία που συνδέεται με τον απομακρυσμένο UE, τότε θα έπρεπε να μεταδίδει με υψηλή ένταση, με αποτέλεσμα να κάνει παρεμβολές και να βλάπτει την υγεία του πληθυσμού. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνική του soft handover απαλείφει το φαινόμενο ping-pong. Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα UE που βρίσκεται ανάμεσα από δύο κεραίες συνδέεται εναλλάξ πότε με τη μία και πότε με την άλλη, μειώνοντας κατά πολύ την ποιότητα της επικοινωνίας του.

Το μοναδικό μειονέκτημα των softer και soft handover είναι ότι είναι πολύπλοκες διαδικασίες που απαιτούν μεγάλο κόστος υλοποίησης. Αυτό γιατί απαιτείται η προσθήκη στους κόμβους του UTRAN, όχι μόνο επιπλέον λογισμικού, αλλά και υλικού. Επιπλέον, ανάλογες μετατροπές πρέπει να γίνουν και στον εξοπλισμό του χρήστη [91].

3.5.2 SRNS Relocation

Η Serving Radio Network Subsystem (SRNS) relocation είναι η διαδικασία κατά την οποία αλλάζει η σύνδεση του UTRAN με το CN για τη σύνοδο που αφορά ένα συγκεκριμένο UE. Η SRNS relocation συμβαίνει όταν έχει ήδη προηγηθεί ένα inter-RNS soft handover. Μετά την εκτέλεση του soft handover, ο SRNC αναλαμβάνει να προωθήσει προς τον DRNC τα δεδομένα που απευθύνονται στο συγκεκριμένο UE. Όπως ήδη, αυτή η μετάδοση γίνεται μέσω της διεπαφής Iur. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από ένα DRNCs. Μετά την εκτέλεση της SRNS relocation, ο SRNC παύει να εξυπηρετεί το UE και κάποιος από τους DRNCs αναλαμβάνει την εξυπηρέτηση του συγκεκριμένου UE. Στο σημείο αυτό αποδεσμεύονται οι διεπαφές Iur που είχαν δεσμευθεί για την επικοινωνία των RNCs [57].

Ανάλογα με τη σχετική θέση του αρχικού με τον τελικό SRNC, υπάρχουν δύο είδη διαδικασιών SRNS relocation: η intra-SGSN SRNS relocation και η inter-SGSN SRNS relocation. Η intra-SGSN SRNS relocation συμβαίνει όταν οι δύο RNCs είναι συνδεδεμένοι με τον ίδιο κόμβο SGSN του CN. Πρόκειται για τη διαδικασία που ακολουθεί ένα inter-RNS/intra-SGSN handover. Αντίθετα, η inter-SGSN SRNS relocation ακολουθεί ένα inter-RNS/inter-SGSN handover. Αυτό σημαίνει ότι οι δύο RNCs συνδέονται με διαφορετικούς SGSNs.

Ο λόγος για τον οποίο ενεργοποιείται η διαδικασία SRNS relocation είναι η οικονομία στους πόρους του ασύρματου δικτύου. Κατά τη διάρκεια του soft handover ο UE λαμβάνει την ίδια πληροφορία τόσο από κεραίες που ελέγχονται από τον SRNC, όσο και από κεραίες που ελέγχονται από τον DRNC. Στην περίπτωση που ο UE έχει απομακρυνθεί αρκετά από τον SRNC, το σήμα που λαμβάνει από τις

αντίστοιχες κεραίες είναι αδύναμο. Συνεπώς, στο σημείο αυτό, η συγκεκριμένη εκπομπή των κεραιών δε συνεισφέρει στη μετάδοση της πληροφορίας στο UE. Προκειμένου να μη υπάρχει σπατάλη στους πόρους του SRNC, κάποιο άλλο RNC αναλαμβάνει το ρόλο του SRNC για το UE. Ένας άλλος λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητη η SRNS relocation είναι προκειμένου να μην χρησιμοποιείται άσκοπα χωρητικότητα της διεπαφής Iur [64].

Εικόνα 17. Η ροή δεδομένων πριν και μετά το intra-SGSN SRNS relocation.

Εικόνα 18. Η ροή δεδομένων πριν και μετά το inter-SGSN SRNS relocation.

Η Εικόνα 17 απεικονίζει τη ροή δεδομένων προς το UE, πριν και μετά τη διαδικασία SRNS relocation. Οι δύο ενιαίες γραμμές αντιστοιχούν στη ροή δεδομένων πριν την εκτέλεση της SRNS relocation, δηλαδή κατά τη διάρκεια του intra-SGSN soft handover. Μετά την εκτέλεση της SRNS relocation οι συγκεκριμένες ροές παύουν να υπάρχουν. Αντίθετα, αποκαθίσταται η ροή που απεικονίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή. Αυτή η γραμμή αντιστοιχεί στο μοναδικό μονοπάτι μέσω του οποίου τα δεδομένα φτάνουν στο UE. Ομοίως, η Εικόνα 18 απεικονίζει τις αντίστοιχες ροές πριν και μετά από μία inter-SGSN SRNS relocation.

3.5.3 Hard Handover

Το hard handover είναι η τεχνική που ακολουθείται στα συστήματα GSM. Κατά τη διάρκεια ενός hard handover, η ασύρματη συχνότητα που χρησιμοποιεί ο UE αλλάζει. Πιο συγκεκριμένα, ο UE παύει να χρησιμοποιεί την αρχική συχνότητα, στη συνέχεια μετακινείται σε διαφορετική συχνότητα και ξεκινά να λειτουργεί στη συχνότητα αυτή. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα κενό επικοινωνίας μεταξύ του UE και του κινητού δικτύου.

Στα συστήματα CDMA, το hard handover είναι δύσκολο στην υλοποίηση. Αυτό γιατί δε χρησιμοποιούνται χρονοσχισμές, επομένως, κάθε UE δέχεται και μεταδίδει ασύρματη πληροφορία σε όλη τη διάρκεια του χρόνου. Γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχουν ελεύθερες χρονοσχισμές προκειμένου ο UE να κάνει μετρήσεις σε άλλη συχνότητα. Επειδή όμως αυτές οι μετρήσεις είναι απαραίτητες για την εκτέλεση του hard handover, το δίκτυο δε μπορεί να κάνει σωστή εκτίμηση της κυψέλης η οποία είναι καταλληλότερη για σύνδεση με το UE. Κατά συνέπεια, τα hard handovers χρησιμοποιούνται όταν, για κάποιο λόγο, η συχνότητα λειτουργίας του UE πρέπει να αλλάξει ή όταν δεν υπάρχει διεπαφή Iur μεταξύ δύο RNCs ώστε να μπορεί να εκτελεστεί ένα soft handover. Πάντως, είναι γεγονός ότι η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε πολύ σπάνιες περιπτώσεις [58].

3.5.4 Intersystem Handovers

Τα intersystem handovers είναι handovers μεταξύ δύο διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης. Προς το παρόν, το 3GPP έχει θέσει τις προδιαγραφές για intersystem handovers μεταξύ συστημάτων GSM και UMTS. Κατά συνέπεια, υπάρχουν δύο τύποι intersystem handover: το handover από UMTS σε GSM και το handover από GSM σε UMTS. Η υποστήριξη της διαδικασίας αυτής είναι απαραίτητη διότι τα δίκτυα UMTS μπορεί να μην έχουν μεγάλη περιοχή κάλυψης. Επομένως, οι χρήστες των δικτύων UMTS θα εξυπηρετούνται σε μεγάλο βαθμό από δίκτυα πρόσβασης του GSM. Προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση ενός intersystem handover, θα πρέπει να υπάρχει ένας UE που υποστηρίζει και τα δύο συστήματα.

Τα intersystem handovers αποτελούν διαδικασίες οι οποίες είναι εξαιρετικά πολύπλοκες, επειδή κατά τη διάρκειά τους δημιουργούνται πολλά και δύσκολα προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα που δημιουργείται είναι το πώς ο UE θα γνωρίζει τη συχνότητα εκπομπής της νέας κυψέλης (για ένα handover προς το GSM) ή τον κώδικα που χρησιμοποιεί η κυψέλη του UTRAN. Η λύση που προτάθηκε από το 3GPP και υιοθετήθηκε από τη βιομηχανία ήταν η αποστολή αυτής της πληροφορίας από την αρχική κυψέλη. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός της έντασης του σήματος στις υποψήφιες κυψέλες προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο για το

intersystem handover. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο δέκτες στο UE ή να δημιουργηθούν κάποιες χρονοσχισμές, προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις. Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα είναι η ραγδαία μείωση του ρυθμού μετάδοσης στην περίπτωση του handover από UMTS προς GSM. Είναι δυνατό να συμβεί το ενδεχόμενο ένας χρήστης ενώ λαμβάνει δεδομένα από το UTRAN με ρυθμό μετάδοσης που προσεγγίζει τα 2 Mbps, μετά την πραγματοποίηση του handover να λαμβάνει μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον αρχικό ρυθμό μετάδοσης [58].

3.6 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών στο UMTS γίνεται από δύο διαδικασίες/μηχανισμούς οι οποίοι ονομάζονται Mobility Management (MM) και Radio Resource Control (RRC) (Εικόνα 19). Ο μηχανισμός Packet MM (PMM) διαχειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών στο επίπεδο του CN ενώ ο μηχανισμός RRC στο επίπεδο του UTRAN. Πρέπει να τονίσουμε ότι οι παραπάνω μηχανισμοί ισχύουν για την PS λειτουργία του UMTS δικτύου στην οποία και επικεντρώνεται η παρούσα διδακτορική διατριβή. Κάθε κινητός χρήστης μπορεί να βρίσκεται σύμφωνα με το μηχανισμό PMM σε δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας: PMM idle και PMM connected. Αντίθετα, ο κινητός χρήστης όσον αφορά το μηχανισμό RRC μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις παρακάτω καταστάσεις: RRC idle, RRC cell connected και RRC URA connected. Περισσότερα για τους δύο παραπάνω μηχανισμούς μπορείτε να βρείτε στις αναφορές [11], [22] και [102].

Εικόνα 19. PMM και RRC μηχανισμοί.

Όταν δεν υπάρχει μετάδοση δεδομένων μεταξύ του CN και του κινητού εξοπλισμού UE, ο χρήστης βρίσκεται στην κατάσταση PMM idle και RRC idle (Εικόνα 19). Σε αυτή την περίπτωση το UTRAN δεν έχει καμιά πληροφορία για το συγκεκριμένο UE ενώ ο μόνος κόμβος που διαθέτει πληροφορίες για το συγκεκριμένο UE είναι ο κόμβος SGSN (RA level tracking). Κατά τη διαδικασία ενεργοποίησης μιας PS σύνδεσης μεταξύ του UE και του SGSN (PS Signaling), ο κινητός χρήστης μεταβαίνει στην κατάσταση PMM connected, όπως στην περίπτωση T1 στην Εικόνα 19(1). Αμέσως μετά λαμβάνει χώρα η εγκατάσταση της σύνδεσης για τη μετάδοση των δεδομένων μεταξύ του UE και RNC στο επίπεδο του UTRAN και ο κινητός

χρήστης μεταβαίνει στην κατάσταση RRC cell connected, όπως στην περίπτωση T1 στην Εικόνα 19(2). Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος RNC διαθέτει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και τη θέση του συγκεκριμένου UE. Μόνο σε αυτή την κατάσταση (PMM connected/RRC cell connected) μπορούν να μεταφερθούν δεδομένα στον κινητό χρήστη.

Αν ο χρήστης ενώ βρίσκεται στην κατάσταση PMM connected/RRC cell connected σταματήσει να λαμβάνει ή να στέλνει δεδομένα για ένα χρονικό διάστημα η RRC κατάστασή του αλλάζει από cell connected σε URA connected, όπως στην περίπτωση T2 στην Εικόνα 19(2). Και σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος RNC διαθέτει όλες τις πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και τη θέση του συγκεκριμένου UE. Αν μετά από αυτό το χρονικό διάστημα ο χρήστης στείλει ή λάβει εκ νέου δεδομένα η RRC κατάστασή του αλλάζει σε cell connected (περίπτωση T3 στην Εικόνα 19(2)). Επιπρόσθετα, αν ο χρήστης βρίσκεται στην κατάσταση PMM connected/RRC URA connected και μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος εξακολουθεί να μη στέλνει ή δέχεται δεδομένα η σύνδεσή του με το UTRAN διακόπτεται και μεταβαίνει στην κατάσταση PMM connected/RRC idle αρχικά, όπως στην περίπτωση T4 στην Εικόνα 19(2) και τελικά μεταβαίνει στην κατάσταση PMM idle/RRC idle όπως στην περίπτωση T4 στην Εικόνα 19(1), [11], [22] και [102].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: HSPA ΚΑΙ LTE

HSPA ΚΑΙ LTE

Η σημαντικότερη πρόκληση που αντιμετωπίζει σήμερα η παγκόσμια αγορά κινητών τηλεπικοινωνιών είναι η παροχή νέων, ελκυστικών και αλληλεπιδραστικών υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Η τεχνολογία High Speed Packet Access (HSPA) αποτελεί τη φυσιολογική εξέλιξη του WCDMA προς αυτή την κατεύθυνση, η οποία πολλές φορές συναντάται και ως 3.5G ή 3G+, προκειμένου να δηλώσει την αναβάθμιση του 3G (UMTS) και ήδη έχει υιοθετηθεί από πολλά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ανά τον κόσμο.

Η εισαγωγή του HSPA κρίθηκε απαραίτητη καθώς, στην πράξη, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης για τα UMTS δίκτυα αποδείχθηκαν χαμηλοί για εφαρμογές πολυμέσων. Ουσιαστικά, το HSPA αποτελεί μία σημαντική αναβάθμιση των UMTS δικτύων προσφέροντας υψηλότερο εύρος ζώνης στους κινητούς χρήστες και αυξημένη χωρητικότητα για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους με αποτέλεσμα την παροχή υπηρεσιών και εφαρμογών αυξημένης αλληλεπίδρασης.

Η ορολογία HSPA αναφέρεται σε μία γενικότερη έννοια που υιοθετήθηκε προκειμένου να τονίσει τις αναβαθμίσεις της ασύρματης διεπαφής του UMTS στις εκδόσεις 5 και 6 του 3GPP στάνταρ. Η συμβολή της HSPA τεχνολογίας, προσεγγίζει μόνο το δίκτυο πρόσβασης, δηλαδή το UTRAN, χωρίς να επεμβαίνει καθόλου στη δομή και τη λειτουργικότητα του CN του UMTS.

Πιο συγκεκριμένα, το HSPA αναφέρεται σε βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο στον κατερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, μέσω του HSDPA όσο και στον ανερχόμενο, μέσω του HSUPA. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA μπορούν να υλοποιηθούν στο ίδιο εύρος ζώνης με το UMTS (των 5 MHz), γεγονός που επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία τόσο του HSPA όσο και του κλασσικού UMTS.

4.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HSPA

Όπως προαναφέρθηκε, το HSPA αποτελείται από δύο διακριτές, επιμέρους τεχνολογίες, τις HSDPA και HSUPA για τον κατερχόμενο και τον ανερχόμενο σύνδεσμο αντίστοιχα.. Η τεχνολογία HSDPA, προτάθηκε στην έκδοση 5 του προτύπου 3GPP, το Μάρτιο του 2002. Παράλληλα, η τεχνολογία HSUPA προτυποποιήθηκε αρχικά στην έκδοση 6 του 3GPP standard, το Δεκέμβριο του 2004. Η πρώτη εμπορική διάθεση του HSDPA πραγματοποιήθηκε προς το τέλος του 2005, ενώ του HSUPA το κατά τη διάρκεια του 2007. Η Εικόνα 20 απεικονίζει την πορεία προτυποποίησης και εμπορικής διάθεσης των HSDPA και HSUPA τεχνολογιών [57], [58].

Εικόνα 20. Προτυποποίηση και εμπορική διάθεση των τεχνολογιών HSDPA και HSUPA.

Εικόνα 21. Ρυθμοί μετάδοσης των τεχνολογιών HSDPA και HSUPA.

Η σημασία της τεχνολογίας HSPA γίνεται εύκολα αντιληπτή αν αναλογιστεί κανείς την ιδιαίτερη αναβάθμιση που αυτή παρέχει, κυρίως στον κατερχόμενο σύνδεσμο, αφού μέσω του HSDPA υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης θεωρητικά έως και 14.4 Mbps ανά χρήστη, σύμφωνα με τις αρχικές προδιαγραφές. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, σε πρώτο στάδιο ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων έφθανε τα 1.8 Mbps, ενώ κατά τη διάρκεια των ετών 2006 και 2007 οι ρυθμοί αυτοί αυξήθηκαν σταδιακά στα 3.6 Mbps και 7.2 Mbps. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του HSDPA αναμένεται να αγγίξει (και να ξεπεράσει κατά πολύ) τα 10 Mbps τα αμέσως επόμενα έτη.

Αναφορικά με τον ανερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, το HSUPA παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης μέχρι και 5.8 Mbps μέσω ενός αφιερωμένου ανερχόμενου καναλιού. Ωστόσο, οι αρχικές ταχύτητες φθάνουν αρχικά τα 1-2 Mbps και σε μεταγενέστερη φάση προβλέπεται η επίτευξη ταχύτητας της τάξης των 3-4 Mbps. Η Εικόνα 21 απεικονίζει γραφικά την εξέλιξη των ρυθμών μετάδοσης των HSDPA και HSUPA τεχνολογιών [57], [58].

4.2 HIGH SPEED DOWNLINK PACKET ACCESS

Η τεχνολογία HSDPA αναπτύχθηκε με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος UMTS, κυρίως όσον αφορά στη χρήση τους για εξυπηρέτηση υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων, και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες.

Η τεχνολογία HSDPA βασίζεται στο σχήμα πρόσβασης WCDMA, χρησιμοποιεί τον αμφίδρομο μηχανισμό FDD και λειτουργεί στη ζώνη IMT-2000 (1.9-2.1 GHz) με εύρος ζώνης 5 MHz. Η χωρητικότητα ενός δικτύου HSDPA εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό από παράγοντες - παραμέτρους τεχνικής υλοποίησης όπως, η αποκλειστική χρήση ενός δεύτερου φορέα των 5 MHz ή από κοινού με την υφιστάμενη τεχνολογία UMTS, και η επιλογή συγκεκριμένης υλοποίησης από τις προτυποποιημένες εναλλακτικές (δηλαδή η υλοποίηση HSDPA με 5, 10 ή 15 κώδικες) [19].

4.2.1 Κανάλι HS-DSCH

Μέσω του HSDPA, το UMTS δίκτυο επεκτείνεται με μία σειρά νέων, αναβαθμισμένων καναλιών μεταφοράς και ελέγχου. Το κυριότερο κανάλι, ωστόσο, είναι το HS-DSCH διαμοιραζόμενο κανάλι μεταφοράς. Η χρήση του διαμοιραζόμενου αυτού καναλιού (shared channel), συνίσταται στο ότι οι κώδικες καναλιού και η ισχύς εκπομπής σε μια κυψέλη θεωρούνται μια κοινή πηγή που μοιράζεται δυναμικά μεταξύ των χρηστών στο πεδίο του χρόνου και του κώδικα (βλ. Εικόνα 22 και Εικόνα 23). Οι διαθέσιμοι κώδικες για το HS-DSCH είναι 15, ενώ η κατανομή των διαμοιραζόμενων πόρων πραγματοποιείται κάθε 2 ms [81].

Η χωρητικότητα μιας κυψέλης διαμοιράζεται στους χρήστες ανάλογα με τη διαχείριση των χρηστών (user prioritization, προγραμματισμός (scheduling): Round-Robin, Proportional Fair, κ.α.), το προφίλ της ζεύξης τους (HSDPA ή Release '99 χρήστες), τις δυνατότητες κάθε κινητής συσκευής, τις συνθήκες της ασύρματης ζεύξης κάθε χρήστη καθώς και άλλους παράγοντες.

Οι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν μέσω του HS-DSCH είναι της τάξης των 1.8 Mbps, 3.6 Mbps, 7.2 Mbps μέχρι και 14.4 Mbps για τον κατερχόμενο σύνδεσμο. Στην πραγματικότητα, το HSDPA διπλασιάζει τη χωρητικότητα της ασύρματης διεπαφής και παρέχει σχεδόν δεκαπλάσιους ρυθμούς μετάδοσης συγκριτικά με το UMTS.

Η αυξημένη απόδοση του HS-DSCH βασίζεται κατά κύριο λόγο σε τεχνικές όπως το Adaptive Modulation and Coding (AMC), στη χρήση μικρότερου Transmission Time Interval (TTI) ίσο με 2 ms (σε αντίθεση με τα 10-80 ms του UMTS), στην υποστήριξη Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) καθώς και στη χρήση γρήγορης δρομολόγησης (Fast Scheduling). Οι παραπάνω τεχνικές περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Εικόνα 22. Διαμοίραση κωδίκων καναλιού για το HS-DSCH.

Εικόνα 23. Διαμοίραση πόρων στο πεδίο του χρόνου για το HS-DSCH.

Εκτός, όμως, από τη σημαντική αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, το HSDPA βελτιστοποιεί τη φασματική απόδοση (spectral efficiency) των συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται το μέγιστο δυνατό throughput και κατά συνέπεια να αυξάνεται η χωρητικότητα των δικτύων όσον αφορά την εξυπηρέτηση χρηστών, που επιχειρούν την πρόσβαση σε υπηρεσίες δεδομένων. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του HSDPA έναντι των υπολοίπων τεχνολογιών, είναι η χαμηλή καθυστέρηση η οποία κυμαίνεται μεταξύ 100 και 200 χιλιοστών του δευτερολέπτου.

4.2.2 Adaptive Modulation & Coding

Η μέγιστη δυνατή απόδοση που επιτυγχάνει το HS-DSCH οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στη χρήση προσαρμοζόμενης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (AMC). Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι και ειδικότερα ανάλογα με την στιγμιαία τιμή του λόγου σήματος προς παρεμβολή, χρησιμοποιείται το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης δεδομένων. Η επιλογή διαμόρφωσης γίνεται ανάμεσα στην Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK), την 16 QAM ή ακόμη και στην 64 QAM διαμόρφωση, για την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης του κατερχόμενου συνδέσμου. Η QPSK διαμόρφωση χρησιμοποιεί 2 bits/σύμβολο ενώ η 16 QAM και η 64 QAM διαμόρφωση 4 bits/σύμβολο και 6 bits/σύμβολο αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 24, [58].

Εικόνα 24. Σχήματα διαμόρφωσης QPSK, 16-QAM και 64-QAM.

Πιο συγκεκριμένα, η διαμόρφωση υψηλής τάξης, όπως η 16 QAM, μπορεί να επιφέρει καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης συγκριτικά με την QPSK διαμόρφωση. Παράλληλα, όμως, η 16 QAM διαμόρφωση απαιτεί υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο. Κατά συνέπεια, όταν οι συνθήκες καναλιού είναι καλές ευνοείται η χρήση 16 QAM διαμόρφωσης, ενώ στην αντίθετη περίπτωση γίνεται χρήση της QPSK διαμόρφωσης. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι μπορεί να γίνει χρήση της 64 QAM διαμόρφωσης όταν επικρατούν βέλτιστες συνθήκες καναλιού.

Εικόνα 25. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθορίζεται από τις τρέχουσες συνθήκες στο κανάλι.

Η ιδιαιτερότητα αυτή της χρήσης πολλαπλών σχημάτων διαμόρφωσης δικαιολογεί το γεγονός ότι το HS-DSCH είναι μάλλον rate-controlled (διαθέτει έλεγχο ρυθμού) και

όχι power-controlled κανάλι μεταφοράς, αφού ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθορίζεται από τις στιγμιαίες συνθήκες κάθε φορά και κατά συνέπεια στο αντίστοιχο επιλεγόμενο σχήμα διαμόρφωσης (Εικόνα 25).

Επίσης, ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης ανάλογα με την διαμόρφωση και την κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται.

Πίνακας 5. Επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης ανάλογα με την διαμόρφωση.

Διαμόρφωση	Spreading factor	Code rate	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων		
			5 κώδικες	10 κώδικες	15 κώδικες
QPSK	16	1/4	600 Kbps	1.2 Mbps	1.8 Mbps
	16	2/4	1.2 Mbps	2.4 Mbps	3.6 Mbps
	16	3/4	1.8 Mbps	3.6 Mbps	5.3 Mbps
	16	4/4	2.4 Mbps	4.8 Mbps	7.2 Mbps
16 QAM	16	2/4	2.4 Mbps	4.8 Mbps	7.2 Mbps
	16	3/4	3.6 Mbps	7.2 Mbps	10.7 Mbps
64 QAM	16	3/4	5.25 Mbps	10.50 Mbps	15.75 Mbps

4.2.3 Hybrid Automatic Repeat Request

Η τεχνική fast HARQ που εφαρμόζεται στο HS-DSCH, επιτυγχάνει τη μείωση του χρόνου αναμετάδοσης των χαμένων πακέτων/δεδομένων. Τα δεδομένα διατηρούνται σε καταχωρητή στο σταθμό βάσης (Node B). Αν για κάποιο πακέτο το κινητό τερματικό δεν αποστείλει επιβεβαίωση ορθής παράδοσης, acknowledgment (ACK), το πακέτο θεωρείται χαμένο. Σε αυτήν την περίπτωση τα δεδομένα επανεκπέμπονται από το σταθμό βάσης και ο χρήστης συνδυάζει όλα τα μπλοκ δεδομένων από προηγούμενες λήψεις (soft combining), αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το μήνυμα. Κατά συνέπεια, έχουμε μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης και βελτιωμένη απόδοση. Σχηματικά, η Εικόνα 26 απεικονίζει τη διαδικασία αναμετάδοσης χαμένων δεδομένων [58].

Εικόνα 26. HARQ - Διαδικασία αναμετάδοσης χαμένων δεδομένων.

4.2.4 Fast Scheduling

Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη υψηλής απόδοσης του HSDPA δικτύου διαδραματίζει η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου δρομολόγησης, ιδιαίτερα σε ένα δίκτυο με υψηλό φόρτο εργασίας. Το HS-DSCH βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνική ταχείας δρομολόγησης κίνησης (fast scheduling). Ο αλγόριθμος fast scheduling αποφασίζει σε κάθε TTI (δηλαδή κάθε 2 ms), σε συνεργασία με το AMC, σε ποιόν/ποιους χρήστη/χρήστες θα αποστείλει πακέτα δεδομένων.

Σημειώνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη χωρητικότητα όταν χρησιμοποιηθεί δρομολόγηση που εξαρτάται από το κανάλι (channel-dependent). Σε αυτή την περίπτωση, λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης των συνθηκών σε μία κυψέλη, υπάρχει σχεδόν πάντα ένας χρήστης του οποίου η ποιότητα καναλιού είναι βέλτιστη. Το κέρδος που προκύπτει από τη μετάδοση δεδομένων σε χρήστες με ιδανικές συνθήκες αποκαλείται macro-diversity gain και το κέρδος είναι μεγαλύτερο όσο περισσότεροι είναι οι εξυπηρετούμενοι χρήστες. Συνεπώς, σε αντίθεση με την παραδοσιακή αντίληψη ότι η εξασθένηση σήματος (fading) είναι ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο και πρέπει να αντιμετωπίζεται, στο HSDPA το fading είναι άκρως επιθυμητό και πρέπει να αξιοποιείται. Το γεγονός αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από την Εικόνα 27.

Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή ανακύπτει το ζήτημα της δικαιοσύνης ανάμεσα στους χρήστες, καθώς ενθαρρύνεται η μετάδοση σε χρήστες με ευνοϊκές συνθήκες έτσι ώστε να αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης αξιολογεί με διαφορετική βαρύτητα τα παραπάνω δεδομένα και κινείται ανάμεσα στην επίτευξη υψηλής απόδοσης για το δίκτυο και στη δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες.

Εικόνα 27. Δρομολόγηση χρηστών με ευνοϊκές συνθήκες για αύξηση της χωρητικότητας δικτύου.

4.3 HIGH SPEED UPLINK PACKET ACCESS

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας HSUPA είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, μικρότερες χρονικές καθυστερήσεις, πιο αποδοτική χρήση του φάσματος.
- Νέο σύστημα προγραμματισμού στο Node B.
- HSUPA τερματικά που υποστηρίζουν HSDPA.

- Κανάλια παρόμοια με το HSDPA, αλλά χρησιμοποιούν ένα ειδικό, μη διαμοιραζόμενο κανάλι.
- Σε αντίθεση με το HSDPA, δεν χρησιμοποιείται το AMC.
- Έξι κατηγορίες για το HSUPA σε αντίθεση με τις δώδεκα για το HSDPA.

Όπως με το HSDPA, το HSUPA έχει στόχο να αυξήσει την χωρητικότητα μειώνοντας ταυτόχρονα τις καθυστερήσεις. Μια σειρά από βελτιώσεις που έχουν εισαχθεί για να επιτευχθεί αυτό, συμπεριλαμβανομένου και ενός ειδικού ανερχόμενου καναλιού μεταφοράς Enhanced-DCH (E-DCH), το οποίο λειτουργεί σε συνδυασμό με ένα νέο μηχανισμό προγραμματισμού που βρίσκεται στο Node B. Όπως με το HSDPA, το HARQ και η χρήση TTI ίσου με 2 ms χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την ταχύτητα του ανερχόμενου καναλιού. Προσοχή έχει δοθεί στα πρότυπα για τον περιορισμό της πολυπλοκότητας του ανερχόμενου καναλιού, εξασφαλίζοντας ότι οι πρακτικές εφαρμογές είναι δυνατές.

Επίσης, οι βασικότερες αλλαγές στο φυσικό επίπεδο εντοπίζονται στην εισαγωγή ενός ενισχυμένου καναλιού στον ανερχόμενο σύνδεσμο, του E-DCH, ενώ παράλληλα διατηρείται και το κανάλι DCH της Release '99 έκδοσης του 3GPP. Οι ιδιότητες του E-DCH καναλιού μεταφοράς είναι:

- Νέα φυσικά κανάλια: E-DPDCH και Enhanced Dedicated Physical Control Channel (E-DPCCH). Πιλοτικά σύμβολα που ανακτώνται από το E-DPCCH χρησιμοποιούνται από το δέκτη για να βοηθήσουν την αποκωδικοποίηση του E-DPDCH, το οποίο μεταφέρει το E-DCH κανάλι μεταφοράς δεδομένων.
- Το E-DPCCH επίσης μεταφέρει το E-TFCI (E-DCH πρότυπο μεταφοράς με συνδυασμό δείκτη), τον Retransmission Sequence Number (RSN) και ένα «χαρούμενο» bit, το οποίο χρησιμοποιείται για να δηλώσει αν ο UE είναι ικανοποιημένος με τους πόρους που του χορηγούνται.
- Ταχύτητες δεδομένων έως και 5.76 Mbps μπορεί να επιτευχθούν με διαφοροποίηση του Spreading Factor και του αριθμού των κωδικών που χρησιμοποιούνται στα κανάλια.
- Τόσο 2 ms όσο και 10 ms TTI είναι διαθέσιμα σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Ένα 2 ms TTI επιτρέπει αποδοτικότερο έλεγχο και μεταφορά ενός προσαρμοσμένου μεγέθους block.
- Ένα block μεταφοράς αποστέλλεται ανά TTI.

Σημειώνεται ότι υπάρχει μόνο ένα E-DCH ανά UE, και ότι το DCH περιορίζεται σε 64 Kbps όποτε το E-DCH εκκινεί. Σε αντίθεση με το HSDPA, το HSUPA δεν κάνει χρήση της κωδικοποίησης AMC. Για να υποστηριχθεί το ενισχυμένο ανερχόμενο κανάλι, εισάγονται τρία νέα κατερχόμενα κανάλια σηματοδότησης:

- E-HICH - E-DCH HARQ κανάλι δεικτοδότησης. Αυτό το κατερχόμενο κανάλι φυσικού επιπέδου χρησιμοποιείται από το HARQ για να βεβαιώνει τις E-DCH μεταδόσεις από τον UE.
- E-AGCH - E-DCH Absolute Grant Channel. Αυτό το διαμοιραζόμενο κατερχόμενο κανάλι φυσικού επιπέδου χρησιμοποιείται για να υποδείξει στο UE πόσα δεδομένα μπορούν να σταλούν στο ανερχόμενο κανάλι επιτρέποντας να προσδιορίσει το E-DCH TFC (Traffic Format Combination) και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ.

- E-RGCH - E-DCH Relative Grant Channel. Αυτό το διαμοιραζόμενο κατερχόμενο κανάλι φυσικού επιπέδου χρησιμοποιείται για να αυξήσει ή να μειώσει τους πόρους του ανερχόμενου καναλιού σε σύγκριση με αυτούς που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν.

Για να καταστεί το ανερχόμενο κανάλι ανθεκτικό σε λάθη σήματος, μπορεί να ζητηθεί από τον κόμβο Node B αναμετάδοση ελαττωματικών πακέτων, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο HARQ. Αυτός ο μηχανισμός «stop and wait» στηρίζεται σε βεβαιώσεις / αρνητικές βεβαιώσεις, οι οποίες ανατροφοδοτούν το UE σχετικά με το νέο E-RGCH κανάλι. Το πρωτόκολλο αυτό, που βρίσκεται στο Node B και όχι στον κόμβο RNC, μπορεί να εξασφαλίσει ταχεία ανάκτηση των χαμένων ή κατεστραμμένων πακέτων.

4.4 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HSPA

Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HSPA συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- Αυξημένες ταχύτητες για τους τελικούς χρήστες: Με τη χρήση του HSDPA στον κατερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν υπηρεσίες με ρυθμό μετάδοσης θεωρητικά έως και 14.4 Mbps. Παρόλα αυτά, για την επίτευξη αυτής της ταχύτητας απαιτούνται ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες, με αποτέλεσμα οι εφικτοί ρυθμοί μετάδοσης να προσεγγίζουν τα 3.6 Mbps. Ακόμα και αυτή η ταχύτητα, ωστόσο, κρίνεται ιδιαίτερα υψηλή συγκριτικά με τα 384 Kbps που παρέχει το παραδοσιακό UMTS. Γίνεται εύκολα αντιληπτό, λοιπόν, ότι επιτυγχάνεται μία αύξηση σχεδόν 10-πλάσια στο συνολικό throughput. Περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στο HSDPA μπορεί να επιτευχθεί με χρήση τεχνικών όπως το MIMO.
- Αυξημένη αλληλεπίδραση των υπηρεσιών: Η υψηλή αλληλεπίδραση των υπηρεσιών που παρέχονται μέσω του HSPA οφείλεται κατά κύριο λόγο στον περιορισμό των καθυστερήσεων και στο μικρό χρόνο Round Trip Time (RTT) της τάξης των 60 ms. Κατά συνέπεια, μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες video ή και multiuser gaming με αυξημένη απόδοση σε πραγματικό χρόνο.
- Υψηλή χωρητικότητα του δικτύου προς όφελος κυρίως των παρόχων: Με τη χρήση της τεχνολογίας HSPA γίνεται πιο αποδοτική εκμετάλλευση του φάσματος στο δίκτυο πρόσβασης. Μάλιστα, η βελτίωση είναι τόσο σημαντική αφού μελέτες αποδεικνύουν ότι η χωρητικότητα στο εύρος ζώνης των 5 MHz του UMTS γίνεται 5 φορές μεγαλύτερη με την αναβάθμιση στην HSDPA τεχνολογία.

Η μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης παράλληλα με τις αυξημένες πλέον ταχύτητες μετάδοσης στο ασύρματο μέσο μεταφράζονται στην δυνατότητα παροχής μίας μεγάλης γκάμας πολυμεσικών εφαρμογών. Αναλυτικότερα, οι υπηρεσίες που μπορούν να μεταδοθούν μέσω της τεχνολογίας HSPA περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

4.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HSPA+

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ήδη μελετώνται περαιτέρω δυνατότητες αναβάθμισης της ίδιας της HSPA τεχνολογίας από το 3GPP, κατά κύριο λόγο προς τον τομέα της

βελτιστοποίησης του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Όλες αυτές οι προσπάθειες αναβάθμισης προσδιορίζονται από την ορολογία HSPA+.

Η τεχνολογία HSPA+ είναι ουσιαστικά μια εξέλιξη του συστήματος HSPA και αποτελεί μέρος της έκδοσης 7 (Release 7) του 3GPP. Αναπτύχθηκε με σκοπό:

- Την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος HSPA, κυρίως στο δίκτυο κορμού μέσω της πλήρους διανομής υπηρεσιών μέσω του packet-switched (PS) τομέα, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων.
- Την περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες.
- Την αποτελεσματική μείωση της καθυστέρησης.

Οι βασικές προσεγγίσεις προς την κατεύθυνση αυτή είναι η χρήση της τεχνολογίας MIMO και η χρήση 64 QAM κωδικοποίησης. Η MIMO τεχνική απαιτεί επιπρόσθετες κεραίες λήψης (συστοιχία κεραίων) καθώς και επιπλέον κεραίες μετάδοσης στους σταθμούς βάσης. Παράλληλα, η εφαρμογή 64 QAM κωδικοποίησης αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης υπό την προϋπόθεση ότι επικρατούν πολύ καλές συνθήκες μετάδοσης.

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία αυτή αναμένεται να προσφέρει μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 28 Mbps για τον κατερχόμενο σύνδεσμο και των 11.5 Mbps για τον ανερχόμενο στα 5 MHz εύρους ζώνης (χρησιμοποιώντας το 2x2 σχήμα MIMO και διαμόρφωση 16 QAM). Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στον κατερχόμενο σύνδεσμο μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 42 Mbps ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της υλοποίησης (χρήση διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης - 64 QAM).

Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνολογία HSPA+ αναπτύχθηκε με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων, και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες, επιτρέποντας την υποστήριξη και ανάπτυξη ενός μεγάλου συνόλου ψηφιακών υπηρεσιών. Παρόλα αυτά, η τεχνολογία HSPA+ δεν φαίνεται να εισάγει κάποια εφαρμογή με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, καθώς ουσιαστικά παρέχει βελτιωμένη ποιότητα (υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση) για τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από την τεχνολογία HSPA. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνολογία HSPA+ μέσω της αξιοποίησης της υπηρεσίας MBMS δύναται να εξυπηρετήσει και multicast εφαρμογές.

4.6 LONG TERM EVOLUTION

Παρά το γεγονός ότι οι τεχνολογίες HSPA και HSPA+ αναμένονται να προσφέρουν τη δυνατότητα παροχής πληθώρας ευρυζωνικών υπηρεσιών, το 3GPP ήδη μελετά και επεξεργάζεται νέες τεχνολογίες που θα επικρατήσουν την αμέσως επόμενη δεκαετία στην αγορά των κινητών επικοινωνιών. Το νέο αυτό έργο αποκαλείται LTE και στοχεύει στην επίτευξη ακόμη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης. Κύρια προοπτική της τεχνολογίας LTE αποτελεί η διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας και η επικράτηση του προτύπου στο χρονικό ορίζοντα της επόμενης δεκαετίας. Η φάση προτυποποίησης της τεχνολογίας LTE βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και αποτελεί μέρος των εκδόσεων 8 και 9 (Release 8, 9) του προτύπου του 3GPP [58]

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το «αντίπαλο» πρότυπο που ανταγωνίζεται το πρότυπο LTE είναι το Mobile WiMAX. Το πεδίο που σχετίζεται με το πρότυπο LTE ήδη γνωρίζει έντονη ερευνητική δραστηριότητα και αναμένεται να επηρεάσει την αγορά σταδιακά. Γραφικά, η χρονική εξέλιξη των δύο ανταγωνιστικών προτύπων (3GPP και 802.16) απεικονίζεται στην Εικόνα 28.

Εικόνα 28. Η εξέλιξη των κινητών ευρυζωνικών προτύπων LTE και WiMAX.

4.6.1 Στόχοι της Τεχνολογίας LTE

Η τεχνολογία LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση υποστήριξης και μετάδοσης εφαρμογών μεταγωγής πακέτων, όπως είναι οι πολυμεσικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους προκειμένου να ξεπεράσει τα όρια των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στο HSDPA και HSUPA αντίστοιχα. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE αναφέρονται στη συνέχεια [65], [89]:

- **Εύρος Ζώνης:** Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (1.5 MHz και 2.5 MHz) για επιπλέον ευελιξία.
- **Ρυθμοί Μετάδοσης:** Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.
- **Mode Λειτουργίας:** Λειτουργία της τεχνολογίας LTE τόσο σε FDD όσο και TDD mode.
- **Throughput:** Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερης για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με τις εκδόσεις 6 και 7 του προτύπου 3GPP (HSDPA και HSUPA).
- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με την έκδοση 6 του προτύπου 3GPP (HSDPA).

- Καθυστέρηση: Σημαντική μείωση του χρόνου RTT από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5 ms - 10 ms.
- Κινητικότητα: Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- Διαλειτουργικότητα: Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά.
- Ποιότητα Υπηρεσίας: Υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας QoS, για την υποστήριξη απαιτητικών υπηρεσιών σε QoS όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

4.6.2 Μετάδοση Δεδομένων στην Τεχνολογία LTE

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων είναι προφανές ότι η τεχνολογία LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Μία από τις κύριες τεχνολογίες αυτές που υιοθετεί η τεχνολογία LTE είναι το Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών [65]

Ειδικότερα, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο, η OFDM τεχνολογία διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο, και είναι αυτή που προτείνεται από το 3GPP ως η πλέον κατάλληλη τεχνική. Η OFDM αποτελεί μία εξ' ολοκλήρου ψηφιακή προσέγγιση πολυπλεξίας πληροφορίας, η οποία κάνει χρήση του Fast Fourier Transform (FFT) για να διαχωρίσει το σήμα σε μικρού εύρου ζώνης επικαλυπτόμενα κανάλια. Τα κανάλια αυτά χαρακτηρίζονται από την κοινή ιδιότητα της μεταξύ τους ορθογωνιότητας, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση φάσματος.

Παράλληλα, για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, στο πρότυπο LTE προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM). Στο σημείο αυτό, η τεχνολογία LTE διαφοροποιείται από το πρότυπο WiMAX, το οποίο χρησιμοποιεί την Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) τεχνική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο. Η OFDMA τεχνική, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, μπορεί να αποβεί ανασταλτικός παράγοντας για τη μπαταρία των κινητών συσκευών των χρηστών, καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία LTE υιοθετείται η SC-OFDM τεχνική. Η SC-OFDM τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αφού έχει και πολύ υψηλό λόγο Peak-to-Average Ratio (PAR) σήματος. Ο λόγος PAR είναι πολύ κρίσιμη μετρική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, και σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, η SC-OFDM τεχνική επιτρέπει υψηλή απόδοση και μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης της κεραίας του σταθμού βάσης. Εν γένει, η SC-OFDM τεχνική επιφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στον ανερχόμενο σύνδεσμο, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης.

Τέλος, μια ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα στην τεχνολογία

LTE είναι η MIMO τεχνική. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό-σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-συσκευή του χρήστη. Για την περίπτωση της τεχνολογίας LTE, σε πρώτη φάση η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραιές στο σταθμό βάσης και δύο κεραιές στη συσκευή του χρήστη) θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Σε μεταγενέστερη φάση ανάπτυξης είναι δυνατόν να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4. Στο MIMO διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Το Spatial Multiplexing (στο οποίο η πληροφορία διαχωρίζεται σε stream τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές κεραιές) και το Transmit Diversity [89].

4.6.3 Υπηρεσίες στην Τεχνολογία LTE

Η τεχνολογία LTE επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων, και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες. Μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας MBMS σε evolved MBMS επιτρέπει και την παροχή multicast υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου, ταυτόχρονα με τις υπηρεσίες δεδομένων, πιο αποδοτικά και με περισσότερες δυνατότητες όσον αφορά στη χωρητικότητα και στον αριθμό των προσφερόμενων καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία LTE ουσιαστικά παρέχει βελτιωμένη ποιότητα, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μικρότερη καθυστέρηση για τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από την τεχνολογία HSPA+, και δύναται επιπρόσθετα να υποστηρίξει μέσω της τεχνολογίας evolved MBMS:

- Μετάδοση υψηλής ποιότητας περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο – Streaming υπηρεσίες ήχου και εικόνας: τηλεόραση, ραδιόφωνο. Το μεταδιδόμενο περιεχόμενο μπορεί να μεταφέρεται σε πραγματικό χρόνο ή να είναι αποθηκευμένο και να αναμεταδίδεται.
- Υπηρεσίες παρεχόμενες/διαφοροποιούμενες ανά εντοπισμένη περιοχή εξυπηρέτησης - δυνατότητα συνδυασμού εθνικών και τοπικών προγραμμάτων τηλεόρασης ή άλλου περιεχομένου ανά γεωγραφική περιοχή, multicast μετάδοση τουριστικού περιεχομένου (video-clips, διαφημίσεις) με πληροφορίες για φεστιβάλ, εστιατόρια, ξενοδοχεία, μουσεία κοκ [58], [65], [89].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΗΡΕΣΙΑ MBMS

ΥΠΗΡΕΣΙΑ MBMS

Το κεφάλαιο αυτό είναι εξ' ολοκλήρου αφιερωμένο στην υπηρεσία Multimedia Broadcast / Multicast Service (MBMS). Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς είναι η εισαγωγή της υπηρεσίας MBMS. Το MBMS έχει ως κύριο σκοπό την υποστήριξη multicast και broadcast εφαρμογών, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε πολλαπλούς χρήστες και με οικονομικό τρόπο. Για την ακρίβεια, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής περιγράφεται το είδος, οι βασικές αρχές καθώς και η αρχιτεκτονική αυτής της υπηρεσίας. Επίσης, αναφέρονται και αναλύονται οι φάσεις παροχής της υπηρεσίας MBMS. Επιπρόσθετα, θίγονται ορισμένα ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με την παροχή της συγκεκριμένης υπηρεσίας.

Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι βασικότερες μέθοδοι ελέγχου ισχύος στο UMTS. Ο αποτελεσματικός έλεγχος ισχύος κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών αποτελεί ίσως το κρίσιμότερο σημείο. Και αυτό γιατί οι σταθμοί βάσης των κυψελωτών αυτών δικτύων διαθέτουν περιορισμένους πόρους ισχύος, άρα και περιορισμένη χωρητικότητα κυψέλης. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη χρήση μίας βέλτιστης στρατηγικής για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων ισχύος. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο έλεγχος ισχύος που στοχεύει στη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος, στην ελαχιστοποίηση του θορύβου στο κυψελωτό δίκτυο και κατά συνέπεια στη διασφάλιση μεγαλύτερης χωρητικότητας επιπλέον χρηστών, θα καταλάβει ένα σημαντικό τμήμα του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η υπηρεσία MBMS είναι μία υπηρεσία που εντάχθηκε στις προδιαγραφές του 3GPP σχετικά πρόσφατα [2]. Μέσω αυτής της υπηρεσίας, οι συνδρομητές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν υπηρεσίες που παρέχουν πολυμεσικά δεδομένα. Για παράδειγμα, τα αθλητικά νέα είναι πληροφορία που αφορά πολλούς χρήστες και η οποία μπορεί να ενσωματώσει πολυμεσικό περιεχόμενο. Επιπλέον, πρόκειται για ένα είδος πληροφορίας η οποία ενδιαφέρει τους χρήστες όταν είναι πρόσφατη. Συνεπώς, θα πρέπει να αποσταλεί έγκαιρα και ταυτόχρονα σε όλους τους χρήστες που επιθυμούν να λάβουν τη συγκεκριμένη υπηρεσία.

Από την πλευρά της εταιρίας κινητής τηλεφωνίας, η αντιγραφή της ίδιας πληροφορίας και η αποστολή της ξεχωριστά σε κάθε χρήστη, θα ήταν σπατάλη των πόρων του δικτύου. Αντίθετα, μία οικονομικότερη λύση θα ήταν η αποστολή των πολυμεσικών δεδομένων μία μόνο φορά πάνω από ένα σύνδεσμο του δικτύου. Όταν τα δεδομένα εκπέμπονται σε όλους τους χρήστες του δικτύου, τότε η μετάδοση γίνεται broadcast. Όσον αφορά την περίπτωση που τα πολυμεσικά δεδομένα αποστέλλονται μόνο στους χρήστες που έχουν γίνει συνδρομητές της υπηρεσίας, τότε γίνεται χρήση multicast μετάδοσης. Κατά συνέπεια, η υπηρεσία MBMS είναι μία p-t-m υπηρεσία μονής κατεύθυνσης (από τον εξυπηρετητή προς τους χρήστες), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως broadcast είτε ως multicast [7], [64].

Η Εικόνα 29 απεικονίζει γραφικά το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης της MBMS υπηρεσίας στα διαδοχικά πρότυπα του 3GPP. Από την εικόνα παρατηρείται ότι το 3GPP θεωρεί την MBMS υπηρεσία κρίσιμη για την εξέλιξη των κινητών δικτύων επόμενης γενιάς, αφού αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι τόσο της τεχνολογίας HSPA (Release 8) όσο και της LTE (Release 9). Υπενθυμίζεται ότι στόχος της διδακτορικής αυτής διατριβής είναι ο αποτελεσματικός έλεγχος ισχύος κατά τη μετάδοση πολυμεσικών MBMS υπηρεσιών σε δίκτυα HSPA και LTE, γεγονός που βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με το χρονοδιάγραμμα και την πορεία εξέλιξης του 3GPP. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 29, η μετάδοση της υπηρεσίας MBMS πάνω από τεχνολογία HSPA και πάνω από τεχνολογία LTE αποτελεί μέρος των εκδόσεων 8.0 και 9.0 του προτύπου MBMS.

Εικόνα 29. Εξέλιξη της MBMS υπηρεσίας.

5.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS

Όπως φάνηκε από την προηγούμενη παράγραφο, το 3GPP [13] έχει ορίσει δύο λειτουργίες για την υπηρεσία MBMS: τη λειτουργία broadcast και τη λειτουργία multicast. Στις δύο επόμενες παραγράφους περιγράφεται κάθε μία από τις λειτουργίες αυτές.

5.2.1 Λειτουργία Broadcast

Η λειτουργία broadcast είναι μία μονής κατεύθυνσης μετάδοση p-t-m. Η μετάδοση αυτή ξεκινά από ένα εξυπηρετητή και κατευθύνεται προς όλους τους χρήστες της περιοχής εξυπηρέτησης. Το περιεχόμενο της μετάδοσης είναι πολυμεσικά δεδομένα, δηλαδή κείμενο, εικόνα, ήχος και video. Ο σκοπός της συγκεκριμένης λειτουργίας είναι η αποδοτική χρήση των ασύρματων πόρων και γενικότερα των πόρων του δικτύου. Για το λόγο αυτό, η μετάδοση των δεδομένων γίνεται μέσω ενός κοινού ασύρματου καναλιού. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της λειτουργίας broadcast είναι ότι εμφανίζει κάποια χαρακτηριστικά προσαρμοστικότητας. Για την ακρίβεια, το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τη διαθεσιμότητα ασύρματων πόρων.

Ένα παράδειγμα υπηρεσίας που μπορεί να χρησιμοποιήσει τη λειτουργία broadcast είναι οι διαφημίσεις ή ένα μήνυμα καλωσορίσματος στο δίκτυο. Όλοι οι χρήστες του δικτύου θα μπορούν να λαμβάνουν χωρίς χρέωση τέτοιου είδους μηνύματα. Όμως, επειδή είναι πιθανό να υπάρχουν χρήστες του δικτύου που δεν επιθυμούν τη λήψη σχετικών μηνυμάτων, θα υπάρχει η δυνατότητα για ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αυτή της υπηρεσίας broadcast. Κατά συνέπεια, ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι, για τη λειτουργία broadcast του MBMS, δεν απαιτείται συνδρομή στην υπηρεσία. Αντίθετα, όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο, αυτή η διαδικασία απαιτείται για τη λειτουργία multicast [7], [8].

5.2.2 Λειτουργία Multicast

Η λειτουργία multicast είναι μία μονής κατεύθυνσης p-t-m μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων. Η μετάδοση αυτή ξεκινά από ένα εξυπηρετητή και κατευθύνεται προς μία multicast ομάδα μίας περιοχής εξυπηρέτησης. Όπως και στη λειτουργία broadcast, στόχος της λειτουργίας multicast είναι η αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Επίσης, η συγκεκριμένη λειτουργία παρουσιάζει προσαρμοστικότητα μεταβάλλοντας το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τη διαθεσιμότητα ασύρματων πόρων στο UTRAN. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας multicast είναι η δυνατότητα που δίνεται στο δίκτυο να επιλέγει συγκεκριμένες κυψέλες στις οποίες θα μεταδοθεί η πληροφορία. Φυσικά, η πληροφορία θα απευθύνεται στους χρήστες που βρίσκονται στην κυψέλη και οι οποίοι ανήκουν σε μια multicast ομάδα.

Ένα παράδειγμα τέτοιας υπηρεσίας είναι αυτό των αθλητικών νέων, που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1. Αντίθετα με τη λειτουργία broadcast, η λειτουργία multicast απαιτεί μία διαδικασία εγγραφής (Subscription) στη multicast ομάδα. Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να συμμετάσχει (Joining) στη συγκεκριμένη ομάδα. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, αντίθετα με τις υπηρεσίες broadcast, στο μεγαλύτερο ποσοστό των υπηρεσιών multicast, αναμένεται να περιλαμβάνεται χρέωση για το χρήστη [7], [8].

5.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS

Η δομή του δικτύου UMTS για την υπηρεσία MBMS, απεικονίζεται στην Εικόνα 30. Ας σημειωθεί εδώ ότι και το δίκτυο GSM μπορεί να παρέχει την ίδια υπηρεσία. Η μόνη διαφορά έγκειται στο χρησιμοποιούμενο δίκτυο πρόσβασης. Το δίκτυο GSM χρησιμοποιεί το δίκτυο πρόσβασης GERAN και όχι το UTRAN. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30, για την υποστήριξη της υπηρεσίας MBMS, ένας νέος κόμβος έχει εισαχθεί στο δίκτυο. Πρόκειται για τον κόμβο Broadcast / Multicast Service Center (BM-SC). Στο υπόλοιπο της παραγράφου, θα περιγραφούν αναλυτικά οι λειτουργίες του κάθε κόμβου που συμμετέχει στην παροχή της υπηρεσίας MBMS [2], [7], [8], [13].

- **BM-SC:** Ο κόμβος BM-SC είναι υπεύθυνος για την παροχή της υπηρεσίας MBMS. Πρόκειται για μία λειτουργική οντότητα που πρέπει να υπάρχει για κάθε υπηρεσία MBMS. Ουσιαστικά, είναι το σημείο εισόδου των μεταδόσεων στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Κατά συνέπεια, σε αυτόν τον κόμβο πέφτει το βάρος της εγκατάστασης και του χρονοπρογραμματισμού των απαραίτητων συνδέσεων, προκειμένου να γίνει σωστή παράδοση του περιεχομένου των MBMS μεταδόσεων. Αυτό σημαίνει ότι ο κόμβος αυτός αναλαμβάνει να δεσμεύσει τους απαραίτητους πόρους λίγο πριν την εκκίνηση των συνόδων και να τους αποδεσμεύσει αφού οι σύνοδοι τερματιστούν. Μία άλλη λειτουργία του κόμβου αυτού είναι ο έλεγχος και η ταυτοποίηση εξωτερικών παρόχων, προκειμένου να

τους επιτρέπει η multicast μετάδοση δεδομένων εντός του UMTS δικτύου. Ταυτόχρονα, ο κόμβος BM-SC εξασφαλίζει την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων και καταγράφει τις μεταδόσεις των παρόχων καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις χρεώσεις. Μία άλλη αρμοδιότητα του BM-SC είναι η ενημέρωση του κόμβου GGSN σχετικά με τις παραμέτρους της μετάδοσης. Μερικές πιθανές παράμετροι της μετάδοσης είναι το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας και η περιοχή διανομής. Τέλος, ο κόμβος BM-SC αναλαμβάνει τη λειτουργία του Service Announcement. Αυτό σημαίνει ότι έχει την ευθύνη της πληροφόρησης του κάθε χρήστη σχετικά με το περιεχόμενο και τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας. Τέτοιου είδους χαρακτηριστικά είναι η κωδικοποίηση του ήχου και της εικόνας που θα μεταδοθούν, η ώρα μετάδοσης, οι σχετικές διευθύνσεις κ.α.

Εικόνα 30. Η αρχιτεκτονική της υπηρεσίας MBMS.

- GGSN: Ο κόμβος GGSN είναι σε θέση, κατόπιν ειδοποίησης από τον BM-SC, να δημιουργεί άμεσα τις συνδέσεις για τη μεταφορά multicast δεδομένων προς τους χρήστες. Επίσης, ένας άλλος σημαντικός ρόλος του κόμβου GGSN είναι να λειτουργεί ως σημείο διασύνδεσης του κινητού δικτύου με τη multicast κίνηση δεδομένων. Για την ακρίβεια, ο GGSN λαμβάνει τη multicast κίνηση και τη δρομολογεί στις κατάλληλες GPRS Tunneling Protocol (GTP) συνόδους (GTP tunnels) που έχει προηγουμένως δημιουργήσει. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η κίνηση των multicast πακέτων δεν πρέπει πάντα να προωθείται σε όλους τους κόμβους SGSN του δικτύου. Αντίθετα, θα πρέπει να προωθείται μόνο προς

αυτούς που εξυπηρετούν χρήστες οι οποίοι συμμετέχουν στην αντίστοιχη multicast ομάδα.

- **SGSN:** Ο ρόλος του κόμβου SGSN στην αρχιτεκτονική του MBMS είναι να εκτελεί διαδικασίες ελέγχου του δικτύου προκειμένου να γίνονται σωστά οι μεταδόσεις προς το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UTRAN. Κατά συνέπεια, αποτελεί τον κόμβο του CN που υποστηρίζει τις διάφορες διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται με την κινητικότητα χρηστών. Τέτοιου είδους διαδικασίες είναι η intra-SGSN και inter-SGSN relocation. Ταυτόχρονα, είναι σε θέση να παρακολουθεί και να καταγράφει τις χρεώσεις που σχετίζονται με την υπηρεσία MBMS. Τέλος, ο κόμβος SGSN, έπειτα από κατάλληλη σηματοδότηση με τον GGSN, δημιουργεί και τερματίζει τις GTP συνόδους που αφορούν τη μετάδοση κάποιας multicast υπηρεσίας πάνω από τις διεπαφές Iu-PS και Gn.
- **UTRAN:** Το δίκτυο αυτό είναι υπεύθυνο για την παράδοση των multicast δεδομένων στους χρήστες που ανήκουν στη αντίστοιχη multicast ομάδα. Όπως θα δούμε και στην παράγραφο 5.7, αξιολογεί χαρακτηριστικά της μετάδοσης (ρυθμός μετάδοσης, πλήθος χρηστών, κινητικότητα χρηστών κ.α.) και κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις προκειμένου να επιτυγχάνεται κάθε φορά η αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου. Επειδή οι multicast μεταδόσεις μπορούν να ξεκινούν και να τερματίζονται διαρκώς, το δίκτυο UTRAN είναι σε θέση να εξυπηρετεί την εκκίνηση και τον τερματισμό τέτοιου είδους μεταδόσεων από το CN. Επιπλέον, το UTRAN θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να διανέμει σε πολλαπλούς χρήστες multicast δεδομένα που εισέρχονται μόνο μία φορά σε αυτό. Ταυτόχρονα, οι απώλειες πληροφορίας σε περιπτώσεις κινητικότητας των χρηστών και αλλαγής του σημείου πρόσβασης στο UTRAN, θα πρέπει να είναι περιορισμένες.
- **UE:** Όσον αφορά τον εξοπλισμό του χρήστη, αυτός υποστηρίζει λειτουργίες για την ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των MBMS υπηρεσιών. Από τη στιγμή που κάποια υπηρεσία ενεργοποιείται, δε χρειάζεται επιπλέον αίτηση του χρήστη προκειμένου να ξεκινήσει να λαμβάνει τα δεδομένα της υπηρεσίας. Παρόλα αυτά, ο χρήστης ειδοποιείται όταν επίκειται λήψη δεδομένων που σχετίζονται με την υπηρεσία MBMS. Επιπλέον, ο UE παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη, ταυτόχρονα με την υπηρεσία MBMS, να μπορεί να εκτελεί και άλλες υπηρεσίες όπως πραγματοποίηση κλήσεων, αποστολή και λήψη μηνυμάτων κ.α. Μία άλλη σημαντική λειτουργία του UE είναι η αναγνώριση των συνόδων. Με τον όρο αναγνώριση των συνόδων, εννοούμε τη δυνατότητα του εξοπλισμού του χρήστη να αναγνωρίζει μία επικείμενη MBMS μετάδοση και αν χρειάζεται, να την απορρίπτει. Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί λόγοι για τους οποίους ένας κινητός εξοπλισμός UE μπορεί να απορρίψει μία μετάδοση. Ο πιο πιθανός από αυτούς τους λόγους, είναι αυτή η μετάδοση να έχει ήδη παραληφθεί από το συγκεκριμένο UE. Τέλος, μέσα στις αρμοδιότητες του UE είναι και η εκτέλεση λειτουργιών ασφάλειας που είναι ειδικά σχεδιασμένες για multicast υπηρεσίες.

5.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS

Η επίτευξη της υψηλής αποδοτικότητας της MBMS υπηρεσίας, και ένας από τους κύριους λόγους που καθιστούν το MBMS ιδιαίτερα κρίσιμο για τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς είναι η βελτιστοποίηση της ροής πολυμεσικών δεδομένων σε όλες τις διεπαφές από τον κόμβο BM-SC έως και τον τελικό χρήστη.

Η προηγμένη ροή των δεδομένων καθώς και τα πλεονεκτήματα που αυτή μπορεί να επιφέρει στα κυψελωτά αυτά δίκτυα γίνεται εύκολα αντιληπτή από τις επόμενες δύο γραφικές απεικονίσεις (Εικόνα 31 και Εικόνα 32), στις οποίες παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα multicast μετάδοσης χωρίς και με την υποστήριξη του MBMS, αντίστοιχα.

Εικόνα 31. Multicast μετάδοση στο UMTS χωρίς την υποστήριξη της MBMS.

Σύμφωνα με την Εικόνα 31, όταν λαμβάνει χώρα multicast μετάδοση, τα δεδομένα πολλαπλασιάζονται και αποστέλλονται σε όλες τις διεπαφές της αρχιτεκτονικής τόσες φορές όσοι και οι εξυπηρετούμενοι χρήστες. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα αρνητικό στην περίπτωση που το πλήθος των multicast χρηστών αυξάνει σημαντικά, καθώς μπορεί να δημιουργηθεί συμφόρηση. Όλες οι επιμέρους διεπαφές επιβαρύνονται σημαντικά λόγω των πολλαπλών μεταδόσεων (που ουσιαστικά μεταφέρουν το ίδιο ακριβώς περιεχόμενο).

Εικόνα 32. Multicast μετάδοση στο UMTS με την υποστήριξη της MBMS.

Αντίθετα, όταν υποστηρίζεται το MBMS όπως παρατηρούμε από την Εικόνα 32, η ροή δεδομένων κατά μήκος όλης της διαδρομής προς τους τελικούς χρήστες γίνεται βέλτιστη. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα μεταφέρονται μόνο μία φορά πάνω από κάθε διεπαφή, γεγονός που βελτιστοποιεί τη ροή δεδομένων και επιφέρει ελάχιστο φόρτο στο δίκτυο. Έτσι εξοικονομούνται σημαντικοί πόροι του δικτύου. Κατά συνέπεια, είναι εύλογο να ενσωματωθεί το MBMS στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών και να βελτιωθεί περαιτέρω η απόδοσή του.

5.5 ΦΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ MBMS

Στην παρούσα παράγραφο θα περιγραφούν αναλυτικά οι φάσεις της παροχής της υπηρεσίας MBMS. Η Εικόνα 33 απεικονίζει σχηματικά τις φάσεις της broadcast λειτουργίας, ενώ η Εικόνα 34 παρουσιάζει τις αντίστοιχες φάσεις για τη multicast

λειτουργία. Η κατεύθυνση του διανύσματος συμβολίζει τη χρονική αλληλουχία, αν και ενδέχεται ορισμένες φάσεις να επαναλαμβάνονται κατά τη διάρκεια μιας συνόδου MBMS.

Όπως φαίνεται από τις εικόνες, οι φάσεις για τις δύο λειτουργίες (broadcast και multicast) διαφέρουν μεταξύ τους. Για την ακρίβεια, οι φάσεις της λειτουργίας multicast είναι υπερσύνολο των φάσεων της λειτουργίας broadcast. Επιγραμματικά, οι οκτώ διαφορετικές φάσεις που εμφανίζονται κατά την παροχή της υπηρεσίας MBMS είναι: η εγγραφή στην υπηρεσία (Subscription), η ανακοίνωση της υπηρεσίας (Service Announcement), η αίτηση συμμετοχής (Joining), η εκκίνηση της συνόδου (Session Start), η ειδοποίηση για εκκίνηση (MBMS Notification), η μεταφορά δεδομένων (Data Transfer), ο τερματισμός της συνόδου (Session Stop) και η αίτηση αποχώρησης (Leaving). Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα οι συγκεκριμένες φάσεις.

Εικόνα 33. Οι φάσεις της broadcast λειτουργίας.

Εικόνα 34. Οι φάσεις της multicast λειτουργίας.

5.5.1 Subscription

Η φάση Subscription περιλαμβάνει τη διαδικασία κατά την οποία ο χρήστης εγγράφεται στην υπηρεσία MBMS. Πρόκειται για μία διαδικασία που είναι απαραίτητη κατά τη multicast λειτουργία της υπηρεσίας MBMS. Αντίθετα, δε χρησιμοποιείται στη broadcast λειτουργία. Η εκτέλεση της φάσης Subscription από το χρήστη, σημαίνει ότι αυτός έχει ήδη αποφασίσει ότι θέλει να λαμβάνει κατά βούληση multicast δεδομένα από τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Για το σκοπό αυτό, επικοινωνεί με τον πάροχο της υπηρεσίας προκειμένου να συμφωνήσει τους όρους και τις συνθήκες της συνδρομής του. Με τον όρο συνδρομή, εννοούμε μία συμφωνία που συνδέει τον πάροχο με τον ενδιαφερόμενο χρήστη και ορίζει λεπτομερειακά τις παραμέτρους της σχέσης τους. Τέτοιου είδους παράμετροι είναι ο ρυθμός μετάδοσης για τη συγκεκριμένη υπηρεσία καθώς και το επίπεδο ποιότητας της υπηρεσίας. Όλες οι παράμετροι της εγγραφής αποθηκεύονται από την εταιρία τηλεπικοινωνιών στον κόμβο BM-SC. Με αυτόν τον τρόπο, όταν ο χρήστης ζητήσει από το δίκτυο να λάβει τη συμφωνηθείσα υπηρεσία, τα στοιχεία αυτά να είναι δυνατόν να προσπελαστούν και να ελεγχθούν. Με βάση αυτά τα αποθηκευμένα δεδομένα, ο χρήστης θα εξυπηρετηθεί στις επόμενες φάσεις της παροχής της υπηρεσίας MBMS [13].

5.5.2 Service Announcement

Η φάση Service Announcement χρησιμοποιείται τόσο στη λειτουργία broadcast όσο και στη multicast. Πρόκειται για το στάδιο κατά το οποίο ο χρήστης λαμβάνει ανακοινώσεις για μία ή περισσότερες MBMS υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να προσφέρονται είτε από την ίδια την εταιρία κινητής τηλεφωνίας είτε από εξωτερικούς παρόχους υπηρεσιών. Οι ανακοινώσεις που αποστέλλονται έχουν σκοπό να κατατοπίσουν το χρήστη όσον αφορά τα είδη και τα χαρακτηριστικά των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η διαδικασία αυτή γίνεται για κάθε υπηρεσία ξεχωριστά και απευθύνεται είτε σε εγγεγραμμένους χρήστες (για την ενημέρωσή τους) είτε σε μη εγγεγραμμένους (για την εγγραφή τους). Οι ανακοινώσεις αυτές μπορεί να περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας, τις παραμέτρους της (όπως, για παράδειγμα, πότε ξεκινούν οι σύνοδοί της) καθώς και τρόπους εγγραφής και ενεργοποίησης. Αυτές οι πληροφορίες είναι δυνατό να παρέχονται στους χρήστες με διάφορους τρόπους όπως μηνύματα SMS ή MMS, μεταδόσεις MBMS σε λειτουργία broadcast ή multicast, από διευθύνσεις στο Internet κ.α. [13], [27].

5.5.3 Joining

Η φάση Joining περιλαμβάνει την ενεργοποίηση της υπηρεσίας MBMS από το χρήστη. Πρόκειται για μία φάση η οποία περιλαμβάνεται στη λειτουργία multicast και όχι στη broadcast. Για την ακρίβεια, μέσω της διαδικασίας Joining ένας συνδρομητής συμμετέχει, δηλαδή γίνεται μέλος, μίας multicast ομάδας. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης ειδοποιεί το δίκτυο ότι επιθυμεί να λαμβάνει τα multicast δεδομένα της συγκεκριμένης υπηρεσίας MBMS.

Η φάση Joining ενεργοποιεί μία σειρά ενεργειών και ανταλλαγών μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων που απαρτίζουν το μονοπάτι μεταξύ του UE και του κόμβου BM-SC. Η συνολική διαδικασία απαρτίζεται από δύο επιμέρους στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εκδήλωση του ενδιαφέροντος από το χρήστη να συμμετάσχει σε

κάποια υπηρεσία. Ο χρήστης προσδιορίζει κατάλληλα τη συγκεκριμένη υπηρεσία προς το δίκτυο μέσω, για παράδειγμα, της IP multicast διεύθυνσης που χρησιμοποιεί. Έπειτα, στο δεύτερο στάδιο, το δίκτυο αναλαμβάνει να δεσμεύσει τους απαραίτητους πόρους προκειμένου να είναι δυνατή η μετάδοση των multicast δεδομένων προς το χρήστη [13].

5.5.4 Session Start

Η φάση Session Start αναφέρεται στο χρονικό σημείο κατά το οποίο ο κόμβος BM-SC είναι έτοιμος για την αποστολή δεδομένων. Πρόκειται για μία διαδικασία η οποία ενυπάρχει και στις δύο λειτουργίες της υπηρεσίας MBMS (broadcast και multicast). Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η φάση Session Start λαμβάνει χώρα ανεξάρτητα από την ενεργοποίηση της υπηρεσίας από το χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι ένας συγκεκριμένος χρήστης μπορεί να εκτελέσει τη φάση Joining πριν ή μετά από μία Session Start. Ουσιαστικά, η σημαντικότερη λειτουργία της διαδικασίας Session Start είναι η ενεργοποίηση της δέσμευσης των απαραίτητων πόρων προκειμένου να μπορεί να εκτελεστεί η φάση Data Transfer. Στο σημείο αυτό οι εμπλεκόμενοι GGSN και SGSN κόμβοι πληροφορούνται για κάποιες παραμέτρους της υπηρεσίας όπως η ποιότητα υπηρεσίας και η περιοχή κάλυψης της υπηρεσίας. Επίσης, οι κόμβοι RNC που εξυπηρετούν ενδιαφερόμενους χρήστες, ενημερώνονται σχετικά [7], [13].

5.5.5 MBMS Notification

Η MBMS Notification είναι η φάση κατά την οποία το δίκτυο ειδοποιεί τους UEs σχετικά με την επικείμενη εκκίνηση αποστολής MBMS δεδομένων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαδικασία αυτή μπορεί να ενημερώνει τους χρήστες σχετικά με αποστολές δεδομένων που είναι ήδη σε εξέλιξη. Πρόκειται για μία διαδικασία που, συχνά, είναι απαραίτητη τόσο στη broadcast όσο και στη multicast λειτουργία. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις που η συγκεκριμένη φάση μπορεί να παραληφθεί. Μία τέτοια περίπτωση είναι αυτή κατά την οποία η φάση Data Transfer (αναλύεται στην επόμενη παράγραφο) έχει ενσωματωμένη σηματοδότηση που ειδοποιεί και προετοιμάζει το χρήστη για την επικείμενη μετάδοση δεδομένων. Πάντως, σε κάθε περίπτωση, τα μηνύματα της MBMS Notification θα πρέπει να μεταδίδονται σε όλους τους κόμβους του μονοπατιού από τον GGSN μέχρι και τον τελικό χρήστη που θα λάβει την υπηρεσία [13].

5.5.6 Data Transfer

Η Data Transfer είναι κύρια φάση της παροχής υπηρεσίας MBMS. Όπως είναι αναμενόμενο, αποτελεί μία διαδικασία που εκτελείται και στις δύο λειτουργίες του MBMS (multicast και broadcast). Σε αυτή τη φάση, οι πόροι του δικτύου που έχουν προηγουμένως δεσμευθεί, χρησιμοποιούνται προκειμένου να μεταφερθούν δεδομένα προς τον τελικό χρήστη. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν την πληροφορία για την οποία ενδιαφέρεται ο συνδρομητής και η οποία σχετίζεται με την παρεχόμενη υπηρεσία [13].

5.5.7 Session Stop

Η φάση Session Stop λαμβάνει χώρα κατά τη χρονική στιγμή που ο κόμβος BM-SC αποφασίζει ότι, για κάποια περίοδο, η αποστολή δεδομένων που σχετίζονται με

κάποια υπηρεσία MBMS θα σταματήσει. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η συγκεκριμένη χρονική περίοδος παύσης της μετάδοσης, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Για την ακρίβεια η παύση θα πρέπει να έχει τέτοια διάρκεια ώστε να δικαιολογείται η αποδέσμευση των πόρων του δικτύου, που χρησιμοποιούνται από την αντίστοιχη σύνοδο. Η φάση Session Stop χρησιμοποιείται τόσο στη broadcast όσο και τη multicast λειτουργία. Πρόκειται ουσιαστικά για την αντίστροφη διαδικασία της Session Start. Οι διαφορές είναι ότι τα μηνύματα που αποστέλλονται ειδοποιούν όχι για επικείμενη έναρξη, αλλά για επικείμενη λήξη της μετάδοσης δεδομένων για την υπηρεσία. Αυτό σημαίνει ότι, αντί για τη δέσμευση πόρων του δικτύου, λαμβάνει χώρα αποδέσμευση των πόρων που έχουν ήδη δεσμευθεί κατά τη φάση Session Start [13].

5.5.8 Leaving

Η φάση Leaving λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη multicast λειτουργία της υπηρεσίας MBMS. Πρόκειται για μία διαδικασία την οποία μπορεί να εκτελέσει ένας χρήστης που συμμετέχει ήδη σε κάποια multicast υπηρεσία. Αυτό σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος χρήστης έχει προηγουμένως εκτελέσει τη φάση Joining προκειμένου να ενταχθεί στην αντίστοιχη multicast ομάδα. Κατά τη φάση Leaving, ενεργοποιείται ο μηχανισμός διαγραφής του χρήστη από τη συγκεκριμένη multicast ομάδα. Κατά συνέπεια, μετά το πέρας τις διαδικασίας Leaving ο χρήστης σταματά να λαμβάνει τα multicast δεδομένα που προέρχονται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία [13].

5.6 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ CN

Η βασική απαίτηση που τίθεται στο CN προκειμένου να υποστηρίξει την υπηρεσία MBMS, είναι η αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Προς το παρόν, οι τρέχουσες υπηρεσίες, καθιστούσαν το CN ένα τυπικό p-t-p περιβάλλον. Κατά συνέπεια, το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητα στη χρήση των πόρων, είναι η μετατροπή του CN σε ένα p-t-m περιβάλλον. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο τρόπος λειτουργίας, έχουν προταθεί δύο αρχιτεκτονικές. Η πρώτη χρησιμοποιεί τη unicast μορφή του IP στις διεπαφές Gn και Iu, ενώ δεύτερη χρησιμοποιεί τη multicast μορφή του πρωτοκόλλου. Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν οι δύο αρχιτεκτονικές [2], [62].

5.6.1 Εφαρμογή IP Unicast

Η εφαρμογή της unicast μορφής του πρωτοκόλλου IP, αποτελεί την εύκολα υλοποιήσιμη λύση. Ουσιαστικά πρόκειται για τη χρήση πολλαπλών unicast μεταδόσεων προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα με τη multicast μετάδοση. Στην περίπτωση αυτή, τα πρωτόκολλα multicast, χρησιμοποιούνται μέχρι τον κόμβο GGSN. Στη συνέχεια, το CN χρησιμοποιεί IP unicast προκειμένου να βελτιστοποιήσει τη χρήση των πόρων κατά τη μετάδοση δεδομένων.

Η Εικόνα 35 δείχνει το μηχανισμό μετάδοσης δεδομένων όταν το CN χρησιμοποιεί μετάδοση IP unicast. Καταρχάς, τα multicast δεδομένα φτάνουν στον κόμβο GGSN είτε από μία πηγή περιεχομένου multicast, είτε από ένα εξωτερικό multicast server. Τα δεδομένα αυτά απευθύνονται σε μία συγκεκριμένη multicast ομάδα από UEs. Ο κόμβος GGSN έχει πλήρη γνώση της τρέχουσας θέσης όλων των UEs που ανήκουν στη αντίστοιχη multicast ομάδα. Κατά συνέπεια, γνωρίζει ποιοι κόμβοι SGSNs

εξυπηρετούν multicast χρήστες. Σε αυτό το σημείο, ο κόμβος GGSN αντιγράφει τα πακέτα που λαμβάνει και τα αποστέλλει μία φορά σε κάθε κατάλληλο SGSN. Η μετάδοση γίνεται με unicast τεχνική μέσω των συνόδων GTP (GTP tunnels) που έχουν δημιουργηθεί στη διεπαφή Gn. Όπως εξηγείται στην Εικόνα 35, στα GTP-Protocol Data Units (PDUs) που αποστέλλονται προς τους SGSNs περιέχουν (εκτός από το αρχικό πακέτο IP και το αναγνωριστικό του tunnel) την IP διεύθυνση του SGSN για τον οποίο προορίζεται το πακέτο.

Στο επόμενο στάδιο, οι κόμβοι SGSNs θα αντιγράψουν τα πακέτα που έλαβαν από τον GGSN, και θα τα αποστείλουν στους κατάλληλους RNCs. Η διαδικασία εξελίσσεται στη διεπαφή Iu-PS με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που εκτελέστηκε προηγουμένως στη διεπαφή Gn. Προφανώς, κατάλληλοι RNCs είναι μόνο αυτοί οι οποίοι ελέγχουν κυψέλες όπου βρίσκονται multicast χρήστες.

Εικόνα 35. Οι σύνοδοι GTP στη διεπαφή Gn κατά τη χρήση IP unicast μετάδοσης.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί τους υπάρχοντες μηχανισμούς και ελαχιστοποιεί τις αλλαγές που πρέπει να υποστεί η υπάρχουσα υποδομή του συστήματος UMTS. Οι αλλαγές που εισάγονται επηρεάζουν αποκλειστικά τους κόμβους GGSNs και SGSNs. Το βασικό μειονέκτημα, είναι το γεγονός ότι, ουσιαστικά, δε χρησιμοποιείται πλήρης multicast μετάδοση και, κατά συνέπεια, το δίκτυο δεν επωφελείται από όλα τα προτερήματα αυτού του τύπου μετάδοσης. Πιο αναλυτικά, οι κόμβοι GGSNs και SGSNs θα πρέπει να αντιγράφουν και να αποστέλλουν τα πακέτα που λαμβάνουν, εξετάζοντας ποιοι κόμβοι SGSNs και

RNCs αντίστοιχα, θα πρέπει να λάβουν τα πακέτα αυτά. Η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί επιπλέον υπολογιστικούς πόρους, από αυτούς τους ήδη φορτωμένους κόμβους [2].

5.6.2 Εφαρμογή IP Multicast

Ένας εναλλακτικός τρόπος βελτιστοποίησης είναι αυτός της εφαρμογής ειδικών multicast ομάδων μέσα στο ίδιο το GPRS δίκτυο κορμού προκειμένου να γίνονται οι μεταδόσεις στις διεπαφές Gn και Iu-PS. Αντίθετα με την προηγούμενη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί unicast μετάδοση των δεδομένων προς τους κατάλληλους SGSNs, στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, ο GGSN προωθεί κάθε πακέτο μία φορά προς μία multicast ομάδα. Σε αυτή τη multicast ομάδα έχουν καταχωρηθεί όλοι οι κόμβοι SGSNs που θα πρέπει να λάβουν τα συγκεκριμένα δεδομένα. Στη συνέχεια, IP routers αναλαμβάνουν την αντιγραφή των πακέτων, προκειμένου να παραδοθούν στους κατάλληλους SGSNs. Αυτό σημαίνει ότι οι IP routers του CN θα πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να υποστηρίξουν IP multicast.

Εικόνα 36. Οι σύνοδοι GTP στη διεπαφή Gn κατά τη χρήση IP multicast μετάδοσης.

Η Εικόνα 36 απεικονίζει την εφαρμογή της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής στη διεπαφή Gn. Όπως φαίνεται, τα πακέτα IP που λαμβάνει ο κόμβος GGSN, μετατρέπονται σε GTP-PDUs και αντιγράφονται σε ένα GTP tunnel. Αυτή τη φορά όμως το GTP-PDU δεν περιέχει τη διεύθυνση κάποιου SGSN αλλά μία multicast διεύθυνση που αντιστοιχεί στο σύνολο των SGSNs που θα πρέπει να λάβουν το πακέτο. Στη συνέχεια, ο router πραγματοποιεί την αποστολή των πακέτων προς κάθε κόμβο SGSN. Με ανάλογο τρόπο γίνεται η μετάδοση των multicast δεδομένων προς τους κόμβους RNC μέσω της διεπαφής Iu-PS.

Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει ελαχιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, μειώνει το φόρτο στους κόμβους GGSN και SGSN του CN. Παρόλα αυτά τα σημαντικά οφέλη, η μετατροπή των κόμβων προκειμένου να υποστηρίξουν αυτή την αρχιτεκτονική, έχει πολύ μεγάλο κόστος. Επομένως, το εξής ερώτημα καθίσταται σημείο διερεύνησης: ποια από τις δύο αρχιτεκτονικές είναι προτιμότερη (πολλαπλό IP unicast ή καθαρό IP multicast); Θα λέγαμε ότι η προτιμότερη αρχιτεκτονική εξαρτάται από την εφαρμογή: η χρήση πολλαπλού IP unicast συνίσταται σε multicast εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις σε πόρους. Επίσης, η χρήση αυτής της αρχιτεκτονικής κρίνεται αποδοτικότερη για εφαρμογές στις οποίες το πλήθος των χρηστών ανά κυψέλη είναι μικρό. Αντίθετα, η χρήση της αρχιτεκτονικής με IP multicast θα έχει απόδοση σε απαιτητικές εφαρμογές που απευθύνονται σε πολλούς χρήστες ανά κυψέλη. Πάντως, είναι γεγονός πως τα όρια από τα οποία μπορεί να αποφασιστεί ποια αρχιτεκτονική είναι προτιμότερη και ποια όχι, δεν έχουν εντοπιστεί επακριβώς [2], [62].

5.7 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ UTRAN

Όσον αφορά στη μετάδοση δεδομένων στο UTRAN, πρόκειται για ένα ζήτημα το οποίο είναι ακόμα υπό εξέταση στο 3GPP. Ο στόχος είναι η βελτιστοποίηση της ροής δεδομένων για την υπηρεσία MBMS, όταν αυτά διέρχονται από τις διεπαφές του UTRAN (διεπαφές Iub και Uu). Για την ακρίβεια, υπάρχουν δύο ειδών προτάσεις: οι p-t-p και οι p-t-m προτάσεις [45], [79].

Εικόνα 37. Φορείς MBMS για (a) point-to-point, (b) point-to-multipoint μετάδοση.

Σχηματικά, οι p-t-p και p-t-m μεταδόσεις για τις διεπαφές του UTRAN απεικονίζονται στην Εικόνα 37. Στην p-t-p μετάδοση έχουμε χρήση πολλαπλών φορέων p-t-p (ένα κανάλι ανά χρήστη), ενώ στην p-t-m μετάδοση έχουμε χρήση ενός μοναδικού φορέα p-t-m (ένα κοινό κανάλι που εξυπηρετεί όλη την κυψέλη) [15], [23].

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται οι δύο τύποι μετάδοσης. Επίσης, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα του κάθε τύπου.

5.7.1 Μετάδοση *Point-to-Point*

Η μετάδοση p-t-p χρησιμοποιεί αφιερωμένα κανάλια για τη μετάδοση των δεδομένων στο UTRAN. Κάθε αφιερωμένο κανάλι, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.4, αντιστοιχεί σε ένα UE. Παρόλο που αυτός ο τύπος μετάδοσης δε συνάδει με τη λογική της multicast μετάδοσης, το ενδεχόμενο να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση της υπηρεσίας MBMS είναι πολύ πιθανό. Αυτό γιατί, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, οδηγεί στην αποδοτική χρήση των πόρων του UTRAN [23].

Γενικά, η επιλογή του τύπου μετάδοσης εξαρτάται από τις επιλογές του διαχειριστή του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και συνήθως είναι κατάλληλη ώστε να χρησιμοποιεί αποδοτικά τους ασύρματους πόρους. Τα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση αφιερωμένων καναλιών και, κατά συνέπεια, η εφαρμογή της p-t-p μετάδοσης, είναι τα εξής:

- **Ρυθμός μετάδοσης:** Τα αφιερωμένα κανάλια (DCH) προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με τα κοινά κανάλια (FACH) που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση p-t-m. Για την ακρίβεια, τα αφιερωμένα κανάλια υποστηρίζουν ρυθμούς που φτάνουν τα 384 Kbps. Από την άλλη πλευρά τα κοινά κανάλια, σύμφωνα με τα πρότυπα στην Release 6 του 3GPP, μπορούν να υποστηρίζουν ρυθμούς μετάδοσης των 256 Kbps. Οι τρέχουσες προδιαγραφές όμως δεν μπορούν να προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους των 64 Kbps. Κατά συνέπεια, η p-t-p μετάδοση είναι προτιμότερη όταν η παρεχόμενη υπηρεσία απαιτεί υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.
- **Αποδοτικότητα για μικρό πλήθος χρηστών ανά κυψέλη:** Στην περίπτωση που το πλήθος των χρηστών ανά κυψέλη είναι σχετικά μικρό, η χρήση της p-t-p μετάδοσης είναι προτιμότερη. Αυτό γιατί η συνολική ισχύς που καταναλώνεται είναι μικρότερη από την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η p-t-m μετάδοση. Από μελέτες που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο πεδίο, ένα κατώφλι κάτω από το οποίο η χρήση p-t-p μετάδοσης είναι αποδοτικότερη, είναι 7-15 ενεργοί χρήστες ανά κυψέλη [45].
- **Γρήγορος έλεγχος ισχύος:** Ο γρήγορος έλεγχος ισχύος είναι ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας WCDMA. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των αφιερωμένων καναλιών, άρα και της p-t-p μετάδοσης είναι ότι επιτρέπει το γρήγορο έλεγχο ισχύος στο UTRAN. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του σήματος που εκπέμπεται μεταβάλλεται ανάλογα με τη δυνατότητα λήψης του UE. Αντίθετα, στην p-t-m μετάδοση δεν υφίσταται έλεγχος ισχύος. Για την ακρίβεια, στην p-t-m μετάδοση τα δεδομένα που εκπέμπονται απευθύνονται σε όλους τους UEs, ακόμα και σε αυτούς που βρίσκονται στα όρια των κυψελών. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του σήματος που εκπέμπεται θα πρέπει διαρκώς να βρίσκεται στο μέγιστο και, κατά συνέπεια, ο έλεγχος ισχύος δεν έχει καμία εφαρμογή [31].
- **Υποστήριξη της κινητικότητας:** Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης p-t-p μετάδοσης είναι η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών. Τα αφιερωμένα κανάλια DCH είναι τα μόνα κανάλια τα οποία υποστηρίζουν τη διαδικασία του soft-handover. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.5.1, η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει με τον καλύτερο τρόπο την αδιάλειπτη παροχή των υπηρεσιών προς το UE. Αντίθετα, το κανάλι FACH δεν υποστηρίζει κάποιο

σχετικό μηχανισμό, με αποτέλεσμα την αμφίβολη υποστήριξη της υπηρεσίας όταν ο multicast χρήστης μετακινείται μεταξύ των κυψελών [48].

5.7.2 Μετάδοση *Point-to-Multipoint*

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η μετάδοση p-t-m χρησιμοποιεί τα κοινά κανάλια FACH για τη μετάδοση των δεδομένων στο UTRAN. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4, τα κοινά κανάλια χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από όλους τους UEs της κυψέλης. Επιπλέον, τα κανάλια FACH δίνουν τη δυνατότητα για παροχή πολλαπλών MBMS υπηρεσιών πάνω από το ίδιο κανάλι, με χρήση πολυπλεξίας χρόνου. Οι επιπλέον πληροφορίες ελέγχου, όπως για παράδειγμα οι διαθέσιμες υπηρεσίες και πληροφορίες για τις γειτονικές κυψέλες, μεταδίδονται σε ξεχωριστό κανάλι FACH [2], [23].

Η μετάδοση p-t-m στο UTRAN αποτελεί επέκταση της multicast λογικής σε ολόκληρο το UMTS. Αυτό γιατί αποσκοπεί στη δημιουργία μίας μόνο ροής δεδομένων για κάθε υπηρεσία MBMS [45]. Η χρήση της p-t-m μετάδοσης έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω:

- Ικανοποιητικός ρυθμός μετάδοσης όταν οι απαιτήσεις είναι χαμηλές: Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα αφιερωμένα κανάλια (DCH) προσφέρουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε σχέση με τα κοινά κανάλια (FACH). Σύμφωνα, με τις τρέχουσες προδιαγραφές, τα κανάλια FACH δε μπορούν να προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους των 64 Kbps. Ο συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης θεωρείται ικανοποιητικός για ένα μεγάλο ποσοστό υπηρεσιών, ακόμα και όταν αυτές περιλαμβάνουν μετάδοση πολυμέσων. Για το λόγο αυτό, αν η συγκεκριμένη MBMS υπηρεσία δεν απαιτεί υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ο ρυθμός που προσφέρουν τα κανάλια FACH δεν είναι περιοριστικός.
- Αποδοτικότητα για μεγάλο πλήθος χρηστών ανά κυψέλη: Στην περίπτωση που το πλήθος των χρηστών ανά κυψέλη είναι σχετικά μεγάλο (7-15 ενεργοί χρήστες είναι το κάτω όριο), η χρήση p-t-m μετάδοσης είναι προτιμότερη. Ειδικότερα μετά την επέκταση της υπηρεσίας MBMS, η χρήση της p-t-m τεχνικής θα είναι μονόδρομος προκειμένου να εξοικονομηθούν πόροι του UTRAN [45].

5.7.3 Χρήση της Διεπαφής *Iur*

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί ένας προβληματισμός που έχει προκύψει σχετικά με τη χρήση της διεπαφής Iur κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων [2]. Ας θεωρήσουμε το σενάριο που απεικονίζεται στην Εικόνα 38. Στην περίπτωση αυτή υποθέτουμε ότι ο UE1 ανήκει σε μία multicast ομάδα και εξυπηρετείται από ένα DRNC μέσω της διεπαφής Iur. Το συγκεκριμένο RNC αποτελεί ταυτόχρονα το SRNC για κάποιους άλλους UEs που ανήκουν στις κυψέλες που ελέγχει. Ας υποθέσουμε ότι ένας τέτοιος UE είναι το UE2. Επίσης, θεωρούμε ότι ο UE2 ανήκει στην εξεταζόμενη multicast ομάδα. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο μονοπάτια που μπορούν να οδηγήσουν τα multicast δεδομένα προς το UE1:

- Το πρώτο μονοπάτι είναι αυτό που απεικονίζεται με την ενιαία γραμμή στην Εικόνα 38. Πρόκειται για το μονοπάτι που διέρχεται από τον SRNC, τη διεπαφή Iur και τον DRNC. Ο τελευταίος RNC λαμβάνει δύο φορές την ίδια ροή δεδομένων: από τη διεπαφή Iu καθώς και από την Iur. Κατά συνέπεια, θα πρέπει

να επιλέξει ποια από τις δύο ροές θα μεταδώσει στους UEs. Παρόλα αυτά, καθώς οι χρήστες κινούνται, ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν την υπηρεσία, η επιλογή της κατάλληλης διεπαφής μπορεί να μεταβάλλεται διαρκώς. Επομένως, απαιτείται ένας μηχανισμός ο οποίος, σε κάθε χρονική στιγμή, θα έχει τη δυνατότητα να παρέχει την κατάλληλη διεπαφή.

- Το δεύτερο μονοπάτι είναι αυτό που απεικονίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή. Στην περίπτωση αυτή κάθε RNC δέχεται τα δεδομένα απευθείας μέσω της διεπαφής Iu. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε όλους τους multicast χρήστες που ανήκουν στις κυψέλες που ελέγχονται από το συγκεκριμένο RNC. Η μετάδοση γίνεται προς όλους τους UEs της multicast ομάδας, ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιούν το RNC ως SRNC ή ως DRNC. Συνεπώς, με την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής, η διεπαφή Iur δε χρησιμοποιείται για τη multicast μετάδοση δεδομένων.

Εικόνα 38. Οι πιθανές επιλογές μονοπατιών προς το UE1.

5.8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ MBMS

Ένα κρίσιμο σημείο που εντοπίζεται κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών είναι ο αποτελεσματικός έλεγχος ισχύος. Οι σταθμοί βάσης των κυψελωτών αυτών δικτύων διαθέτουν περιορισμένους πόρους ισχύος (άρα και περιορισμένη χωρητικότητα κυψέλης), γεγονός που επιβάλλει τη χρήση μίας βέλτιστης στρατηγικής για την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων ισχύος. Ο έλεγχος ισχύος στοχεύει στη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος, στην ελαχιστοποίηση του θορύβου στο κυψελωτό δίκτυο και κατά συνέπεια στη διασφάλιση μεγαλύτερης χωρητικότητας επιπλέον χρηστών. Με βάση τη σημασία του αποδοτικού ελέγχου ισχύος, στις επόμενες παραγράφους θα γίνει παράθεση των βασικότερων μεθόδων ελέγχου ισχύος στο UMTS.

Ο αποδοτικός έλεγχος ισχύος είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση των CDMA συστημάτων. Είναι απαραίτητος για την αντιμετώπιση των φαινομένων εξασθένησης

σήματος και παρεμβολής. Ωστόσο, είναι αποδοτικός μόνο σε ορισμένους τύπους καναλιών ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιείται. Η λανθασμένη χρήση του μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό επίπεδο σπατάλης ισχύος. Ο έλεγχος ισχύος χρειάζεται τόσο στον ανερχόμενο όσο και στον κατερχόμενο σύνδεσμο [64], [90], [29].

5.8.1 Έλεγχος Ισχύος κατά τη Multicast Μετάδοση

Ο έλεγχος ισχύος δεν έχει καλή απόδοση όταν η μετάδοση κατευθύνεται σε πολλά τερματικά με διαφορετικά μοντέλα διάδοσης. Στην απλούστερη περίπτωση ο πιο αδύναμος σύνδεσμος στη multicast ομάδα καθορίζει την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης, οδηγώντας έτσι σε αυξημένη παρεμβολή για όλους τους χρήστες και άρα σε απώλεια χωρητικότητας.

Στις p-t-p μεταδόσεις στην κατεύθυνση του κατερχόμενου συνδέσμου είναι επιθυμητό να παρέχεται ένα οριακό ποσό επιπλέον ισχύος στους χρήστες που βρίσκονται στα άκρα της κυψέλης αφού αυτοί υφίστανται αυξημένη παρεμβολή από γειτονικές κυψέλες. Επιπλέον, στην κατεύθυνση αυτή είναι απαραίτητος ένας τρόπος ώστε να ενισχύονται τα σήματα που εξασθενούν από το φαινόμενο του Rayleigh fading στις χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών. Με άλλα λόγια, ο έλεγχος ισχύος χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την ποιότητα του συνδέσμου και να παρέχει μια αξιόπιστη σύνδεση ώστε ο χρήστης να λαμβάνει δεδομένα με αποδεκτούς ρυθμούς σφαλμάτων. Επίσης, η εκπομπή με όσο το δυνατόν λιγότερη ισχύ εξασφαλίζει ότι θα υπάρχει ελάχιστη παρεμβολή που θα επηρεάζει τις γειτονικές κυψέλες.

Στις p-t-m μεταδόσεις επιτυγχάνονται όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα όταν εφαρμόζεται έλεγχος ισχύος. Σε μια απλή μορφή, ο Node B εκπέμπει σε ένα επίπεδο ισχύος αρκετό ώστε να υποστηρίξει τη σύνδεση με το χρήστη που έχει την υψηλότερη ανάγκη ισχύος ανάμεσα σε όλους τους χρήστες της multicast ομάδας. Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική αφού ο χρήστης με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος θα χρειαζόταν την ίδια ισχύ και στην p-t-p μετάδοση. Έτσι ικανοποιώντας αυτή την ανάγκη σε ισχύ, η ισχύς μετάδοσης θα είναι αρκετή για όλους τους άλλους χρήστες της multicast ομάδας.

Συνεπώς, η εκπεμπόμενη ισχύς διατηρείται σε ένα υψηλό επίπεδο για μεγάλη χρονική διάρκεια, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει την ποιότητα κάθε δέκτη στη multicast ομάδα. Ωστόσο, η μέση ισχύς και η μέση λαμβανόμενη ποιότητα θα είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη. Το σημαντικό πλεονέκτημα του ελέγχου ισχύος είναι ότι ελαχιστοποιεί την εκπεμπόμενη ισχύ [80].

5.8.2 Έλεγχος Ισχύος και Κανάλια Μεταφοράς

Σε αυτή την ενότητα το ερώτημα που τίθεται είναι κάτω από ποιες προϋποθέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα κατανομής ισχύος, ένα κανάλι είναι κατάλληλο για τη μετάδοση του multicast περιεχομένου.

Η κυρίαρχουσα άποψη για την υποστήριξη multicast μετάδοσης στο UTRAN είναι η χρησιμοποίηση των υπαρχόντων καναλιών με μικρές διαφοροποιήσεις (π.χ. εισαγωγή multicast διευθυνσιοδότησης). Τα κανάλια μεταφοράς του UMTS που είναι διαθέσιμα στον κατερχόμενο σύνδεσμο και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για

multicast μετάδοση είναι το DCH, το FACH και το HS-DSCH. Κάθε κανάλι έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τον έλεγχο ισχύος [58], [75], [80].

Ωστόσο, ενώ τα Release '99 κανάλια (DCH και FACH) έχουν ήδη προτυποποιηθεί για την μετάδοση MBMS υπηρεσιών, η εφαρμογή της υπηρεσίας MBMS πάνω από το κανάλι HS-DSCH είναι μία πρόσφατη ιδέα που μέχρι στιγμής έχει γνωρίσει μικρό ερευνητικό ενδιαφέρον. Βέβαια, η ιδέα αυτή για χρήση του HS-DSCH αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του MBMS και αποτελεί ουσιαστικό αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Η κύρια απαίτηση είναι να γίνεται αποδοτική χρήση των πόρων του συστήματος. Αυτή η απαίτηση κατατάσσει τα κοινά κανάλια ως την πρώτη επιλογή αφού πολλοί χρήστες μπορούν να μοιραστούν ταυτόχρονα τους ίδιους πόρους. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών της multicast ομάδας, τον τύπο υπηρεσίας καθώς και από την ποιότητα υπηρεσίας QoS που μπορεί να διασφαλιστεί. Για το λόγο αυτό, όταν ο αριθμός των χρηστών που λαμβάνουν την MBMS υπηρεσία είναι μικρός είναι πιο αποδοτικό να χρησιμοποιηθούν αφιερωμένα κανάλια μεταφοράς ξεχωριστά για κάθε χρήστη ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εκπεμπόμενη ισχύς και η παρεμβολή. Το σημαντικό ερώτημα λοιπόν που τίθεται στο σημείο αυτό είναι το σημείο εναλλαγής (switching point) μεταξύ αφιερωμένων και κοινών καναλιών.

Για το λόγο αυτό, στο MBMS στάνταρ έχει αναπτυχθεί ένας μηχανισμός που αποκαλείται MBMS Counting Mechanism [23]. Ο μηχανισμός αυτός είναι υπεύθυνος για την επιλογή ανάμεσα σε p-t-p (χρήση πολλαπλών DCH) ή p-t-m (χρήση ενός μοναδικού FACH) μεταδόσεις. Τα σημαντικότερα προβλήματα του υπάρχοντος MBMS Counting Mechanism είναι η απουσία ευρυζωνικών χαρακτηριστικών (δηλαδή της HSPA τεχνολογίας) καθώς και η σπατάλη σημαντικού τμήματος των (ούτως ή άλλως περιορισμένων) πόρων ισχύος.

Ειδικότερα, η χρήση του HS-DSCH στη λειτουργικότητα του MBMS δεν έχει ακόμη καθοριστεί στο μηχανισμό αυτό. Το HS-DSCH διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που το καθιστούν ιδανικό για τη μετάδοση MBMS εφαρμογών. Επιπλέον, ο MBMS Counting Mechanism θεωρεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι εναλλαγής μεταξύ DCH και FACH. Το κατώφλι αυτό ορίζεται με βάση το πλήθος των χρηστών που λαμβάνουν μία MBMS υπηρεσία σε μία κυψέλη. Για λίγους χρήστες προτιμάται η χρήση του DCH, ενώ για μεγάλο αριθμό χρηστών ευνοείται η χρήση του FACH καναλιού. Ωστόσο, η πληροφορία για το πλήθος των χρηστών μόνο δεν είναι αρκετή για να ορίσει το σημείο εναλλαγής. Έτσι, υπάρχει περίπτωση ένας αριθμός χρηστών που χρησιμοποιεί αφιερωμένα κανάλια και που είναι μεγαλύτερος από το σημείο εναλλαγής να χρειάζεται λιγότερη ισχύ από την περίπτωση χρησιμοποίησης ενός μόνο κοινού καναλιού. Πράγματι, οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης χρειάζονται περισσότερη ισχύ από αυτούς που βρίσκονται κοντά στο Node B [30], [80].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής που πραγματεύεται η παρούσα διδακτορική διατριβή. Περιγράφονται με λεπτομέρεια όλες οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής και παρουσιάζονται τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούν τους μηχανισμούς ή τεχνικές που αναπτύχθηκαν στις εν λόγω εργασίες με τους αντίστοιχους μηχανισμούς ή τεχνικές που προτείνονται στην παρούσα εργασία.

Για λόγους ορθότερης παρουσίασης των σχετικών εργασιών θα χωρίσουμε την ερευνητική περιοχή της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε τρία τμήματα τα οποία και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια:

- Μέθοδοι multicast μετάδοσης δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών.
- Έλεγχος συμφόρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών.
- Forward error correction για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Μία από τις μεθόδους που έχουν προταθεί για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών, περιγράφεται στη δημοσίευση [58]. Στη συγκεκριμένη δημοσίευση, οι συγγραφείς ξεκινούν μελετώντας την εισαγωγή στο σύστημα UMTS ορισμένων IP multicast αρχιτεκτονικών που χρησιμοποιούνται ευρέως στα σταθερά δίκτυα. Για την ακρίβεια, αναλύονται τρεις multicast αρχιτεκτονικές που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε κινητά δίκτυα UMTS. Η πρώτη αρχιτεκτονική είναι η υπάρχουσα multicast αρχιτεκτονική που έχει ήδη προτυποποιηθεί σαν ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό των κινητών δικτύων UMTS. Σε αυτή την περίπτωση, το πρωτόκολλο που εκτελεί τη multicast δρομολόγηση τερματίζεται στη gateway μεταξύ του Internet και του δικτύου UMTS. Η λύση αυτή απαιτεί την ανάμειξη ελάχιστων κόμβων του UMTS στη multicast δρομολόγηση. Όμως, η συγκεκριμένη λύση δεν εξασφαλίζει αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Οι άλλες δύο προτάσεις αφορούν αρχιτεκτονικές όπου οι multicast λειτουργίες προωθούνται διαδοχικά από το Internet, στο εσωτερικό του δικτύου UMTS και τέλος στους UEs. Πρόκειται για αρχιτεκτονικές που απαιτούν από πολλούς κόμβους του UMTS να υποστηρίζουν λειτουργίες που σχετίζονται με τη multicast μετάδοση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας των λειτουργιών στους κόμβους του δικτύου. Το όφελος είναι η εξοικονόμηση πόρων του δικτύου. Τελικά, ο μηχανισμός που προτείνεται χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Internet Group Management Protocol (IGMP) για τη διαχείριση των multicast ομάδων. Όσον αφορά στη μετάδοση των πακέτων, ο προτεινόμενος μηχανισμός βασίζεται στο ιεραρχικό tunneling που έχει προτυποποιηθεί στο UMTS. Παρόλα αυτά, ο μηχανισμός του ιεραρχικού tunneling δεν επαρκεί για την αποδοτική μετάδοση των multicast πακέτων. Αυτό γιατί κάθε tunnel ανατίθεται σε μία σύνοδο που αντιστοιχεί σε ένα μόνο χρήστη. Συνεπώς, αν υποθεθεί μία ομάδα που αποτελείται από N multicast χρήστες, αυτό σημαίνει ότι κάθε πακέτο θα πρέπει να αντιγραφεί και να μεταδοθεί μέσω του δικτύου N φορές. Ειδικότερα, για ορισμένες κατανομές multicast χρηστών σε μία περιοχή κάλυψης, ο

μηχανισμός αυτός μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα άσκοπη χρήση των πόρων του δικτύου.

Μία λύση στο πρόβλημα που αναφέρθηκε προηγουμένως, παρουσιάζεται στις δημοσιεύσεις των αναφορών [56] και [85]. Οι συγγραφείς αυτών των δημοσιεύσεων, στοχεύουν στην παράκαμψη της σχέσης ένα-προς-ένα που υπάρχει μεταξύ ενός συνδρομητή και ενός GTP tunnel. Προκειμένου να το πετύχουν αυτό, υλοποιούν ένα πλαίσιο πρωτοκόλλου Multicast-Packet Data Protocol (M-PDP) για κάθε multicast ομάδα στους κόμβους GGSNs και SGSNs. Σε αυτή την προσέγγιση οι συγγραφείς δεν υιοθετούν τη χρήση των IP multicast πρωτοκόλλων για τη multicast δρομολόγηση στο UMTS. Αντίθετα, παρουσιάζουν μία εναλλακτική λύση. Για την ακρίβεια, προτείνουν τη χρήση κάποιων νέων πινάκων στους κόμβους GGSN, SGSN και RNC, προκειμένου να γίνεται η διαχείριση των multicast ομάδων. Όσον αφορά στην προώθηση των multicast πακέτων, οι ερευνητές προτείνουν κάποιες αλλαγές στο πρωτόκολλο GTP.

Ο συγγραφέας της δημοσίευσης [66] προτείνει μία μέθοδο multicast μετάδοσης που μπορεί να εφαρμοστεί στη μεταγωγή κυκλώματος των κινητών δικτύων. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η αποστολή SMS μηνυμάτων μόνο στις Location Areas (LAs) στις οποίες βρίσκονται multicast χρήστες. Πιο αναλυτικά, προκειμένου να επιτευχθεί multicast δρομολόγηση, χρησιμοποιείται η υπάρχουσα αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων για την υπηρεσία SMS. Για το σκοπό αυτό εισάγονται δύο νέοι πίνακες, ένας στη βάση δεδομένων HLR και ένας στη VLR. Ο πίνακας της HLR αποθηκεύει τους κόμβους MSCs που εξυπηρετούν μέλη της multicast ομάδας. Αντίθετα, ο πίνακας της VLR καταγράφει τις Location Area (LAs) οι οποίες ελέγχονται από το αντίστοιχο MSC και περιέχουν multicast χρήστες. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση αυτή, τα multicast μηνύματα παραδίδονται σε όλα τα κελιά της LA, ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν multicast χρήστες σε όλα τα κελιά. Ειδικότερα στην περίπτωση που μία LA είναι μεγάλη ή οι χρήστες είναι αραιά διασκορπισμένοι σε αυτή, η χρήση των πόρων δεν είναι αποδοτική.

Μία άλλη μέθοδος multicast μετάδοσης δεδομένων προτείνεται στη δημοσίευση [85]. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναβαθμίσεις λογισμικού στις κινητές συσκευές. Σε αυτή την προσέγγιση, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τους γνωστούς υπάρχοντες μηχανισμούς για IP multicast προκειμένου να εκτελέσουν τη διαχείριση των ομάδων καθώς και τη multicast δρομολόγηση στο UMTS. Όσον αφορά στην εγγραφή σε μία multicast ομάδα, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IGMP. Τέλος, για τη multicast δρομολόγηση, οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση multicast πρωτοκόλλων όπως το Distance Vector Multicast Routing Protocol (DVMRP), το Multicast Open Shortest Path (MOSFP) και το Protocol Independent Multicast (PIM).

Ο συγγραφέας της δημοσίευσης [62] παρουσιάζει και συγκρίνει δύο μεθόδους για την υλοποίηση της υπηρεσίας MBMS στα συστήματα UMTS. Η κύρια ιδέα των προσεγγίσεων αυτών είναι ο μετασχηματισμός των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή στο UMTS, προκειμένου να προσφέρουν υποστήριξη σε ένα είδος multicasting παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή στα δίκτυα IP. Η πρώτη μέθοδος τροποποιεί τις υπάρχουσες διαδικασίες του UMTS προκειμένου να υποστηρίξουν το IP multicast. Αντίθετα, η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί κάποιες λειτουργίες του UMTS προκειμένου η υποστήριξη του IP multicast να επεκταθεί στους κόμβους του UMTS και να φτάσει μέχρι τον τελικό χρήστη. Έπειτα από ανάλυση και σύγκριση των δύο μηχανισμών, ο ερευνητής καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ενώ η πρώτη μέθοδος είναι απλούστερη στην

υλοποίηση, η δεύτερη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιήσει με ευελιξία και αποδοτικότητα τους πόρους του δικτύου.

6.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ

Ο έλεγχος συμφόρησης για τη multicast μετάδοση σε σταθερά δίκτυα είναι ένα πεδίο όπου ασκείται ακόμα έντονη έρευνα. Έχουν προταθεί μέχρι στιγμής μία πληθώρα από λύσεις πάνω στο ερευνητικό αυτό πεδίο. Ένα τεχνικό θέμα υψίστης σημασίας όσον αφορά στον έλεγχο συμφόρησης για τη multicast μετάδοση είναι η επεκτασιμότητα. Γενικότερα στους μηχανισμούς αυτού του είδους, η πηγή λαμβάνει μία αρνητική ανατροφοδότηση από το δίκτυο προκειμένου να προσαρμόσει ανάλογα το ρυθμό με τον οποίο μεταδίδει δεδομένα. Με σκοπό την αποφυγή ενός καταιγισμού από ανατροφοδοτήσεις, η λύση που προτείνεται γενικά είναι να επιλέγεται ένας εκπρόσωπος που είναι ο αποδέκτης που αντιμετωπίζει το χειρότερο επίπεδο συμφόρησης. [84], [101]. Μόνο ο αντιπρόσωπος μεταδίδει τις πληροφορίες ανατροφοδότησης που σχετίζονται με τον έλεγχο συμφόρησης και έτσι ο αριθμός των ανατροφοδοτήσεων περιορίζεται. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης της έννοιας του αντιπροσώπου είναι ότι ο άσκοπος περιορισμός του ρυθμού μετάδοσης αποφεύγεται. Αντίθετα, σε περιπτώσεις μηχανισμών όπου διαφορετικοί αποδέκτες στέλνουν πολλαπλές αρνητικές ανατροφοδοτήσεις, τότε υπάρχει ο κίνδυνος μεγάλου και αδικαιολόγητου περιορισμού του ρυθμού μετάδοσης.

Οι αναφορές [101] και [84] περιγράφουν τους μηχανισμούς TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) και Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC), αντίστοιχα. Μία αναλυτική περιγραφή των μηχανισμών αυτών παρέχεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 8) της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Αντίθετα, στο σημείο αυτό θα περιγραφεί ο μηχανισμός, TCP - Emulation at Receivers (TEAR) [83] που αποτελεί ένα μηχανισμό που είναι βασισμένος και σε παράθυρο αλλά και στο ρυθμό (window and rate-based). Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο εξομίωσης παραθύρου που μοιάζει με αυτόν του πρωτοκόλλου TCP. Όμως το παράθυρο αυτό δε χρησιμοποιείται για τον απευθείας έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης. Αντίθετα, υπολογίζεται μέσο παράθυρο και το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται για να μετατραπεί σε ένα ομαλό ρυθμό μετάδοσης. Ο ρυθμός αυτός λαμβάνεται από τον αποστολέα για τη ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης. Το πλεονέκτημα του μηχανισμού TEAR έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτεί το μοντέλο του TCP το οποίο συνεπάγεται πολλαπλές παραδοχές προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός μετάδοσης.

Αντίθετα με το πρόβλημα του ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση σε σταθερά δίκτυα, για την εκδοχή του ίδιου προβλήματος στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, δεν έχουν προταθεί παρά ελάχιστες λύσεις. Η εργασία που μπορεί να θεωρηθεί ως πιο στενά συσχετισμένη με το ερευνητικό αυτό πεδίο, είναι αυτή που παρουσιάζεται στη δημοσίευση [86]. Στη δημοσίευση αυτή παρουσιάζεται το πρόβλημα των διακυμάνσεων κατά την επιλογή αντιπροσώπου σε ασύρματα περιβάλλοντα. Η κατάσταση αυτή προκαλεί συχνές αλλαγές του αντιπροσώπου σε μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης για multicast μετάδοση δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα. Ο αποστολέας προσαρμόζει το ρυθμό με τον οποίο μεταδίδει δεδομένα βασισμένος στις πληροφορίες ενός αποδέκτη που είναι αρκετά αβέβαιο αν όντως αποτελεί τον αποδέκτη με το χειρότερο επίπεδο συμφόρησης. Το γεγονός αυτό έχει ως άμεση συνέπεια τη σοβαρή υποβάθμιση της απόδοσης στη multicast μετάδοση δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο. Οι ερευνητές προτείνουν δύο πιθανές λύσεις τις

οποίες και αξιολογούν. Από την αξιολόγηση της απόδοσης των λύσεων σε διάφορες συνθήκες συμπεραίνεται ότι η από άκρο σε άκρο προσέγγιση είναι πιο ευαίσθητη σε σφάλματα. Από την άλλη πλευρά, η προσέγγιση ενεργού υπηρεσίας οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης. Η εργασία αυτή αφορά πάντως στην ευρύτερη ομάδα των δικτύων ασύρματης πρόσβασης και για το λόγο αυτό δεν είναι επαρκώς ευθυγραμμισμένη με τις προδιαγραφές του 3GPP για τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

6.3 FORWARD ERROR CORRECTION

Τα πρώτα βήματα της έρευνας σχετικά με την εφαρμογή του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων έγιναν στο πεδίο των σταθερών δικτύων. Η εφαρμογή του IP multicast στο Internet Multicast Backbone έκανε την υλοποίηση των λειτουργιών ελέγχου λαθών περισσότερο ενδιαφέρουσα στη multicast μετάδοση παρά στη unicast. Σαν αποτέλεσμα, πολλές μελέτες δημοσιεύτηκαν από τότε. Μία πολύ αντιπροσωπευτική έρευνα σχετικά με αυτό το πεδίο περιγράφεται στην αναφορά [93]. Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς προτείνουν ένα πολύ-επίπεδο μηχανισμό FEC για τη multicast μετάδοση video σε σταθερά δίκτυα. Αυτός ο μηχανισμός ορίζει ότι οι αποδέκτες μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικά επίπεδα προστασίας με FEC που είναι προσαρμοσμένα στις αντίστοιχες συνθήκες δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με οργάνωση του FEC σε πολλαπλά επίπεδα. Τα αποτελέσματα των καταγιγιστικών απωλειών αντιμετωπίζονται με προσαρμογή των ροών του FEC έγκαιρα. Στο σημείο αυτό προκύπτει η διεκυστίνδα της καθυστέρησης έναντι στην ποιότητα.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα έρευνα είναι αυτή που περιγράφεται στην αναφορά [74]. Η εργασία αυτή αναφέρεται στην κατηγορία των κωδίκων FEC τύπου κρήνης (fountain). Πρόκειται για τους πιο αποδοτικούς κώδικες που μπορούν να εφαρμοστούν σε κανάλια με απώλειες πακέτων, μία μοντελοποίηση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το Internet. Στο μοντέλο των καναλιών με απώλειες πακέτων, θεωρείται ότι ένα αρχείο τεμαχίζεται σε πολλαπλά μικρά πακέτα. Κάθε ένα από αυτά τα πακέτα μπορεί είτε να ληφθεί επιτυχώς από τον αποδέκτη είτε να μη ληφθεί εντελώς. Τα υπάρχοντα πρωτόκολλα μεταφοράς αρχείων απλά τεμαχίζουν ένα αρχείο σε K τεμάχια μεγέθους όσο ένα πακέτο. Στη συνέχεια μεταδίδουν κάθε πακέτο επανειλημμένα έως ότου ληφθεί επιτυχώς από τον αποδέκτη ή το σύνολο των αποδεκτών. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο ένα κανάλι επικοινωνίας προς τα πίσω, από τον αποδέκτη προς τον αποστολέα, προκειμένου να παρέχεται χρήσιμη πληροφορία για τις αναμεταδόσεις πακέτων. Από την άλλη πλευρά, οι κώδικες τύπου κρήνης δημιουργούν πακέτα που αποτελούν τυχαίες συναρτήσεις ολόκληρου του αρχείου. Ο αποστολέας δημιουργεί μία ροή πακέτων προς τον αποδέκτη χωρίς να γνωρίζει ποια πακέτα έχουν ληφθεί ή όχι. Στη συνέχεια, εφόσον ο αποδέκτης έχει λάβει οποιαδήποτε N πακέτα, όπου N είναι ένα πλήθος πακέτων ελάχιστα μεγαλύτερο από το αρχικό πλήθος K , τότε το αρχείο μπορεί να ανακτηθεί. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό ότι το υπολογιστικό κόστος για τους κώδικες τύπου κρήνης είναι εκπληκτικά μικρό και μεταβάλλεται γραμμικά με το μέγεθος αρχείου. Στη συγκεκριμένη αναφορά, εξετάζονται διάφορες τεχνολογίες κωδίκων τύπου κρήνης οι οποίες είναι: οι τυχαίοι γραμμικοί κώδικες κρήνης (random linear fountain codes), οι κώδικες Luby Transform (LT) και οι κώδικες Rapid Tornado (Raptor).

Στη συνέχεια, ο οργανισμός προτυποποίησης 3GPP όρισε ως πρότυπο για τον FEC στο επίπεδο εφαρμογής της MBMS τους κώδικες Raptor [13]. Οι προδιαγραφές υποχρεώνουν τον κινητό εξοπλισμό να μπορεί να υποστηρίξει κώδικες Raptor κατά τη διάρκεια της μεθόδου streaming delivery καθώς και κατά τη διάρκεια της μεθόδου

download delivery [27]. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετάδοσης streaming, κώδικες Raptor εφαρμόζονται στο επίπεδο εφαρμογής πάνω από τις ροές του πρωτοκόλλου UDP. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μεμονωμένα είτε σε δέσμες από ροές. Από την άλλη πλευρά, κατά τη μέθοδο μετάδοσης download, το χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο File Delivery over Unidirectional Transport (FLUTE) μπορεί να παρέχει αξιοπιστία με τη χρήση FEC με χρήση κωδικών Raptor.

Η προτυποποίηση της υπηρεσίας MBMS από τον οργανισμό 3GPP έδωσε το έναυσμα για έρευνα σχετικά με την εφαρμογή του FEC κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων στο πεδίο των κινητών δικτύων. Παρόλο που αυτή η ερευνητική περιοχή είναι σχετικά νέα, έχουν προταθεί πολλές λύσεις μέχρι στιγμής. Στην αναφορά [73] παρουσιάζεται μια εισαγωγή στη δομή του κώδικα Raptor για FEC σε multicast μετάδοση πάνω από κινητά δίκτυα. Οι κώδικες Raptor περιγράφονται μέσω συμβολισμών απλής γραμμικής άλγεβρας. Παρουσιάζονται διάφορες οδηγίες για την υλοποίηση των σχετικών κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών και επιβεβαιώνεται η καλή απόδοση της μετάδοσης αρχείων μέσω των κωδικών Raptor. Η ίδια μελέτη περιλαμβάνει και τη διερεύνηση της αποδοτικής υλοποίησης των κωδικών Raptor σε παραδοσιακά συστήματα broadcast όπως το Digital Video Broadcast (DVB).

Η εργασία που παρουσιάζεται στο [60] εστιάζει στον καθορισμό των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του προτυποποιημένου μηχανισμού FEC για την υπηρεσία MBMS. Η μελέτη γίνεται με σκοπό την εφαρμογή μίας βέλτιστης υπηρεσίας από την οπτική του διαχειριστή του δικτύου. Η απόδοση του προτυποποιημένου κώδικα Raptor για FEC αξιολογείται μέσω πειραμάτων εξομοίωσης και τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται διεξοδικά. Τα πειραματικά δεδομένα αναλύονται και το ποσό των πρόσθετων δεδομένων επανόρθωσης (repair data) εκτιμάται για διάφορους ρυθμούς απώλειας πακέτων. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι παρόλο που η κωδικοποίηση Raptor προσθέτει πλεονάζοντα (redundant) πακέτα και βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της υπηρεσίας MBMS με την ανάκτηση χαμένων πακέτων κατά τη μετάδοση. Επομένως, η εφαρμογή των κωδικών Raptor θα δώσει τη δυνατότητα στο διαχειριστή του δικτύου να μειώσει την ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης για την παροχή της υπηρεσίας MBMS με ταυτόχρονη βελτίωση της ποιότητας της MBMS και επέκταση της κάλυψης της υπηρεσίας MBMS.

Οι συγγραφείς της μελέτης που παρουσιάζεται στην αναφορά [69] διερευνούν την εφαρμογή των κωδικών Raptor στην υπηρεσία MBMS σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον εξομοίωσης. Αυτή η εργασία εστιάζει στη μέθοδο μετάδοση download της υπηρεσίας MBMS και χρησιμοποιεί ένα συνολικό μοντέλο του συστήματος που αναπαριστά με ακρίβεια όχι μόνο το επίπεδο εφαρμογής αλλά επίσης και το φυσικό επίπεδο. Επίσης το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει και αναπαράσταση της κινητικότητας χρηστών. Σε αυτό το ρεαλιστικό περιβάλλον εξομοίωσης, προτείνονται οι βέλτιστες παράμετροι του συστήματος και για το επίπεδο εφαρμογής αλλά και για το φυσικό επίπεδο. Οι βέλτιστες αυτές παράμετροι αφορούν σε διάφορα μοντέλα κινητικότητας και διάφορες παραμέτρους φορέων. Η βελτιστοποίηση που επιτυγχάνεται μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων ορίζει χαμηλή ισχύ μετάδοσης και ένα μέτριο ποσό από κωδικοποίηση Turbo FEC στο φυσικό επίπεδο που έχει σαν αποτέλεσμα σε σχετικά μεγάλο ρυθμό απώλειας πακέτων στον ασύρματο σύνδεσμο. Αυτός ο αυξημένος ρυθμός απώλειας πακέτων εξισορροπείται με τη χρήση ενός ικανού μεγέθους κωδικοποίησης Raptor. Τελικά, συμπεραίνεται ότι αυτές οι βέλτιστες ρυθμίσεις λειτουργίας χρησιμοποιούν αρκετά λιγότερη ενέργεια μετάδοσης για το κατέβασμα

κάποιου αρχείου σε σχέση με την αντίστοιχη που καταναλώνεται όταν δεν χρησιμοποιούνται κώδικες Raptor στο επίπεδο εφαρμογής.

Η εργασία που παρουσιάζεται στην αναφορά [68] εστιάζει στην μέθοδο download της υπηρεσίας MBMS. Το θέμα με το οποίο ασχολείται είναι η διελκυστίνδα μεταξύ της προστασίας απέναντι στα λάθη με χρήση FEC με την επακόλουθη διαδικασία αποκατάστασης του αρχείου. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα καινοτόμο μηχανισμό αποκατάστασης αρχείου, ο οποίος συνδυάζει μία μετάδοση p-t-m του αρχείου με μία επακόλουθη διαδικασία p-t-p για την αποκατάσταση του αρχείου. Η προσέγγιση είναι τέτοια ώστε ο στόχος να είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του κινητού δικτύου UMTS. Ο προτεινόμενος μηχανισμός στοχεύει στην εξισορρόπηση της επιβάρυνσης που δημιουργεί η χρήση του FEC σε συνδυασμό με τη χρήση των διαδικασιών αποκατάστασης του αρχείου που ακολουθούν τη μετάδοση MBMS. Αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι η χρήση ενός και μόνου μηχανισμού αποκατάστασης αρχείου που είναι βασισμένος σε μετάδοση p-t-m, δεν είναι αποδοτική προσέγγιση. Αυτό διότι ο αποστολέας αγνοεί το ποσό των πλεοναζόντων δεδομένων που απαιτούνται. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης καθώς και η ανάλυσή τους δείχνουν ότι ο νέος μηχανισμός επιτυγχάνει μια καλύτερη απόδοση σε σχέση με μία διαδικασία αποκατάστασης που βασίζεται αποκλειστικά και μόνο σε μετάδοση p-t-p για την αποστολή των δεδομένων αποκατάστασης του αρχείου.

Η υιοθέτηση του FEC εξετάζεται από μία άλλη οπτική στην εργασία που παρουσιάζεται στην αναφορά [98]. Στην μελέτη αυτή, ένα πιθανό bottleneck στο ασύρματο τμήμα του δικτύου λαμβάνεται υπόψη. Οι συγγραφείς διερευνούν ποιες είναι οι βέλτιστες ρυθμίσεις του δικτύου προκειμένου να εξοικονομηθούν ασύρματοι πόροι και να χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο φάσμα πιο αποδοτικά. Τα πειράματα εξομοίωσης που διεξάγονται καθώς και τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν ξεκάθαρα τη βελτίωση της απόδοσης που προσδίδει η χρήση κωδίκων Raptor για FEC όσον αφορά στην κάλυψη της υπηρεσίας MBMS. Για την ακρίβεια, η αποδοτικότητα της χρήσης του διαθέσιμου φάσματος βελτιώνεται σημαντικά και επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση πόρων στο ασύρματο δίκτυο.

Παρά την υψηλή ποιότητα και τη βάσιμη επιστημονική υπόσταση των μελετών που έχουν εκδοθεί, καμία από αυτές δεν παρουσιάζει μία πλήρη μελέτη για την αξιολόγηση της χρήσης του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η πεποίθηση που αποτυπώνεται στην παρούσα διατριβή και αποτελεί κίνητρο για την έρευνα που διεξάχθηκε και περιγράφεται είναι ότι η κατανομή των multicast χρηστών, ο έλεγχος ισχύος καθώς και η αποδοτική επιλογή φορέα κατά τη μετάδοση της MBMS υπηρεσίας είναι θέματα υψίστης σημασίας για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών που δεν έχουν εξεταστεί μέχρι στιγμής. Επιπλέον, όλες οι υπάρχουσες μελέτες είναι βασισμένες στο παραδοσιακό σύστημα UMTS και η εφαρμογή του FEC δεν έχει παρουσιαστεί σε ένα πλαίσιο που ενσωματώνει τις εξελίξεις των δικτύων UMTS πέραν της 3^{ης} του γενιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας νέος μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Ο προτεινόμενος αυτός μηχανισμός έχει σχεδιαστεί με βάση τις τρέχουσες προδιαγραφές της υπηρεσίας MBMS, έτσι όπως αυτές έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Ο σχεδιασμός του μηχανισμού αυτού έχει γίνει με τρόπο που ελαχιστοποιεί τα μεταδιδόμενα πακέτα και κάνει αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Εκτός από την τυπική multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα, εξετάζεται και ο χειρισμός ειδικών περιπτώσεων που προκαλούνται από σενάρια κινητικότητας χρηστών. Η κινητικότητα των χρηστών είναι το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τα κινητά δίκτυα από τα σταθερά δίκτυα επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό οι καταστάσεις κινητικότητας χρηστών θεωρήθηκαν υψίστης σημασίας για τα κινητά δίκτυα και εξετάστηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια μέσω εξομοιώσεων. Ο προτεινόμενος μηχανισμός φαίνεται να μπορεί να ανταπεξέλθει στην κινητικότητα των χρηστών χωρίς καμία διακοπή της παροχής της multicast υπηρεσίας και χωρίς απώλειες πακέτων. Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσης διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη ενός μηχανισμού που μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί και που εισάγει περιορισμένες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων καθώς και στους υπάρχοντες μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας έτσι όπως έχουν καθοριστεί για τη unicast μετάδοση δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών [13].

Η άλλη σημαντική συνεισφορά του ερευνητικού έργου που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο, είναι το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος μηχανισμός έχει υλοποιηθεί σαν ένα καινούριο τμήμα λογισμικού στον ευρύτατα χρησιμοποιούμενο εξομοιωτή δικτύων ns-2 [94]. Αυτό το νέο λογισμικό χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μηχανισμού multicast δρομολόγησης. Είναι σημαντικό και θα πρέπει να τονιστεί ότι η συνεισφορά αυτού του ερευνητικού έργου είναι μία πλατφόρμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ερευνητές για την αξιολόγηση και την ανάλυση μηχανισμών multicast μετάδοσης σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Ορισμένες περιοχές στις οποίες υπάρχει έντονη ερευνητική δραστηριότητα και οι οποίες μπορούν να επωφεληθούν από τη χρήση του νέου αυτού λογισμικού είναι ο έλεγχος συμφόρησης για την υπηρεσία MBMS, η διαχείριση των multicast ομάδων χρηστών σε κινητά δίκτυα, η διαχείριση των ασύρματων πόρων των κινητών δικτύων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων, η διαχείριση της ποιότητας υπηρεσίας κατά την υπηρεσία MBMS και η ανάλυση και ο έλεγχος σεναρίων κινητικότητας χρηστών. Στο παρόν ερευνητικό έργο η πλατφόρμα αυτή χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση και τη μελέτη δύο γνωστών μηχανισμών για τον έλεγχο συμφόρησης κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων, μία θεματική ενότητα που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι όλες οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών και οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 6.1 έχουν αξιολογηθεί μέσω αναλυτικών μοντέλων και διαδικασιών. Κανένα πείραμα εξομοίωσης δεν έχει διεξαχθεί προκειμένου να αξιολογήσει τη παροχή της υπηρεσίας MBMS καθώς και την επίδραση της κινητικότητας των χρηστών στην αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας. Η έρευνα που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο εστιάζει προς αυτή την κατεύθυνση.

Κατά συνέπεια, ο στόχος που επιτυγχάνεται από την παρούσα διδακτορική διατριβή είναι τριπλός. Σε πρώτη φάση, δεδομένου ότι κανένα πείραμα εξομοίωσης δεν έχει διεξαχθεί για την αξιολόγηση της υπηρεσίας MBMS καθώς και για την επίδραση της κινητικότητας χρηστών, ο προτεινόμενος μηχανισμός παρέχει μία ρεαλιστική προσέγγιση για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση και τον έλεγχο της διαδικασίας παροχής της υπηρεσίας MBMS. Σε δεύτερη φάση, σημαντική συνεισφορά αποτελεί το λογισμικό εξομοίωσης για τη multicast δρομολόγηση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Το λογισμικό αυτό γεφυρώνει την εξομοίωση των κινητών δικτύων με τη multicast μετάδοση δεδομένων στον εξομοιωτή δικτύων ns-2 και είναι διαθέσιμο προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από άλλες ερευνητικές ομάδες που αναλύουν και αξιολογούν μηχανισμούς multicast μετάδοσης σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Τέλος, ο προτεινόμενος μηχανισμός βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τις προδιαγραφές του 3GPP αλλά επιπλέον εισάγει κάποιες βασικές και αναγκαίες βελτιώσεις.

Αυτό το κεφάλαιο δομείται ως εξής: στο Υποκεφάλαιο 7.1 περιγράφεται ο προτεινόμενος μηχανισμός για τη μετάδοση πακέτων. Επίσης στο ίδιο υποκεφάλαιο παρουσιάζεται και ο χειρισμός των διαφόρων περιπτώσεων κινητικότητας χρηστών. Το Υποκεφάλαιο 7.2 περιγράφει την υλοποίηση του προτεινόμενου μηχανισμού στον εξομοιωτή δικτύων ns-2. Το Υποκεφάλαιο 7.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης. Τέλος, κάποιες παρατηρήσεις και συμπεράσματα παρουσιάζονται στο Υποκεφάλαιο 7.4.

7.1 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφεται ο προτεινόμενος μηχανισμός μετάδοσης πακέτων. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του μηχανισμού είναι η εισαγωγή των Routing Lists (RLs) σε κάθε κόμβο του δικτύου εκτός των UEs. Για λόγους απλότητας, κατά την παρουσίαση του μηχανισμού θεωρείται ότι οι λειτουργίες του BM-SC έχουν ενσωματωθεί και εκτελούνται από τον κόμβο GGSN. Επομένως, στο εξής μόνο ο κόμβος GGSN θα αναφέρεται προκειμένου να είναι πιο σαφής η παρουσίαση του μηχανισμού.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται διεξοδικά οι RLs, δηλαδή οι λίστες μέσω των οποίων γίνεται η δρομολόγηση των πακέτων. Επίσης, παρουσιάζεται ο μηχανισμός μέσω του οποίου γίνεται η multicast προώθηση πακέτων από κόμβο σε κόμβο. Επίσης, εξετάζονται οι κρίσιμες φάσεις της παροχής της υπηρεσίας MBMS. Για την ακρίβεια εξετάζονται οι φάσεις Joining και Leaving, καθώς και η συμπεριφορά του συστήματος όταν κατά την Data Transfer φάση υπάρχει κινητικότητα των χρηστών. Τέλος, περιγράφεται ο τρόπος που ο προτεινόμενος μηχανισμός χειρίζεται την κινητικότητα των χρηστών. Ο βασικός στόχος είναι η διατήρηση της αδιάλειπτης παροχής της MBMS υπηρεσίας καθώς και η βελτίωση της απόδοσης. Για την ακρίβεια, μελετούνται οι επιδράσεις του handover πάνω στον προτεινόμενο μηχανισμό καθώς και η προσαρμογή του μηχανισμού στη διαδικασία Serving RNS (SRNS) relocation [32], [38], [40] και [41].

7.1.1 Λίστες Δρομολόγησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προτεινόμενος μηχανισμός εισάγει τις RLs σε κάθε κόμβο του δικτύου, εκτός των UEs. Οι RLs είναι διπλά διασυνδεδεμένες λίστες

(Εικόνα 39), οι οποίες περιέχουν πληροφορία σχετική με τη δρομολόγηση πακέτων που απευθύνονται σε μία multicast ομάδα. Για την ακρίβεια, κάθε κόμβος του δικτύου μπορεί να περιέχει μία ή περισσότερες RLs. Κάθε RL ενός κόμβου έχει αποθηκευμένη πληροφορία σχετικά με το ποιοι κόμβοι του αμέσως κατώτερου επιπέδου, συνδέουν το συγκεκριμένο κόμβο με UEs που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη multicast ομάδα. Κατά συνέπεια, σε κάθε κόμβο, υπάρχει μόνο μία RL για κάθε multicast ομάδα.

Εικόνα 39. Η δομή μίας Routing List.

Ας θεωρήσουμε την τοπολογία που απεικονίζεται στην Εικόνα 40. Υποθέτουμε ότι οι απεικονιζόμενοι UEs (UE1, UE2, UE3 και UE4) ανήκουν στη multicast ομάδα MG1. Κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί μία RL για αυτή τη multicast ομάδα. Αναλυτικότερα, ο κόμβος GGSN διατηρεί μία RL για την ομάδα MG1, η οποία περιέχει όλους τους κόμβους SGSN οι οποίοι συνδέουν τον GGSN με UEs που ανήκουν στο MG1. Αυτοί οι κόμβοι είναι ο SGSN1 και ο SGSN2. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος SGSN διατηρεί μία RL η οποία περιέχει εκείνους τους κόμβους RNC οι οποίοι εξυπηρετούν multicast χρήστες για τη συγκεκριμένη multicast ομάδα. Επομένως, η RL του SGSN1 περιέχει τον RNC1, η RL του SGSN2 περιέχει τον RNC3 και τον RNC4, ενώ στο SGSN3 η RL που σχετίζεται με το MG1 είναι άδεια. Ομοίως, η RL του RNC1 περιέχει το UE1 και το UE2, η RL του RNC3 περιέχει το UE3 και η αντίστοιχη του RNC4 περιέχει το UE4. Οι υπόλοιποι κόμβοι RNCs έχουν άδειες RLs.

Εικόνα 40. Ο μηχανισμός μετάδοσης πακέτων.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί η ύπαρξη άλλων δύο ειδών από λίστες. Εκτός από τις RLs, οι Drift Routing Lists (DRLs) χρησιμοποιούνται στους κόμβους RNC καθώς επίσης και οι Multicast Group Lists (MGLs) χρησιμοποιούνται στον κόμβο GGSN (δείτε την Εικόνα 41). Οι DRLs είναι λίστες που χρησιμοποιούνται όταν ένα ή περισσότερα inter-RNS handovers έχουν λάβει χώρα. Κάθε DRL αντιστοιχεί σε μία multicast ομάδα και περιέχει ζεύγη του τύπου RNC-UE. Η χρήση αυτών των λιστών στοχεύει στη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από την Iur διεπαφή. Η λειτουργία αυτού του είδους λιστών θα παρουσιαστεί αναλυτικά στις παραγράφους 7.1.5 και 7.1.6. Όσον αφορά στις MGLs, κάθε λίστα αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη multicast ομάδα και περιέχει τους UEs οι οποίοι ανήκουν σε αυτή την ομάδα. Αυτές οι λίστες περιέχονται μόνο στον κόμβο GGSN και στην ουσία αποτελούν μέρος των λειτουργιών που έχουν προσδοθεί στον GGSN λόγω της ενσωμάτωσης του BM-SC σε αυτόν. Μέσω αυτών των λιστών ο κόμβος αυτός έχει τη δυνατότητα να ανακτά τους UEs που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη multicast ομάδα.

Προφανώς οι MGLs όπως και οι RLs δεν είναι στατικές οντότητες αλλά ενημερώνονται κάθε φορά που ένας κινητός εξοπλισμός UE εντάσσεται ή αποχωρεί από μία multicast ομάδα ή όποτε η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Επομένως είναι απαραίτητο, για τη σωστή μετάδοση των multicast δεδομένων, οι συγκεκριμένες λίστες να είναι κάθε χρονική στιγμή πλήρως ενημερωμένες.

Εικόνα 41. DRLs και MGLs.

7.1.2 Μηχανισμός Μετάδοσης Πακέτων

Ο μηχανισμός μετάδοσης των πακέτων είναι βασισμένος στην επεξεργασία των RLs σε κάθε κόμβο. Ας υποθέσουμε ότι σε ένα κόμβο, εκτός των UEs, εισέρχεται ένα πακέτο το οποίο απευθύνεται σε μία multicast ομάδα. Αμέσως μετά ελέγχεται αν η αντίστοιχη RL είναι άδεια. Αν η λίστα δεν είναι άδεια, ενεργοποιείται μία σάρωσή της. Για κάθε κόμβο κατώτερου επιπέδου που περιέχεται στη λίστα, το πακέτο αντιγράφεται και μεταδίδεται προς το συγκεκριμένο κόμβο μία μόνο φορά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αναδρομικά στους κόμβους κατώτερου επιπέδου που λαμβάνουν το πακέτο έως ότου κάθε αντίγραφο του πακέτου φτάσει στους UEs της multicast ομάδας για την οποία προορίζεται.

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου κίνηση απευθυνόμενη στη multicast ομάδα MG1, εισέρχεται στο PLMN που απεικονίζεται στην Εικόνα 40. Αν εστιάσουμε στην περίπτωση που ένα πακέτο της εισερχόμενης κίνησης λαμβάνεται από τον κόμβο GGSN, ο κόμβος αυτός θα ελέγξει αν η RL που αντιστοιχεί στο MG1 είναι άδεια. Αν η RL δεν είναι άδεια, μία σάρωση της λίστας θα ενεργοποιηθεί. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα η RL του GGSN δεν είναι άδεια και περιέχει τους κόμβους SGSN1 και SGSN2. Για κάθε ένα από τους κόμβους αυτούς θα λάβει χώρα μία αποστολή ενός αντιγράφου του εισερχόμενου πακέτου. Το πακέτο θα μεταδοθεί μία μόνο φορά σε κάθε κόμβο της λίστας. Στη συνέχεια, κάθε κόμβος SGSN που θα

λάβει το πακέτο θα ελέγξει την αντίστοιχη RL που περιέχει προκειμένου να μεταδώσει αντίγραφο του πακέτου προς τους κατάλληλους κόμβους κατώτερου επιπέδου (RNCs). Όσον αφορά το παράδειγμα που εξετάζουμε, τα πακέτα θα προωθηθούν προς τους κόμβους RNC1 από τον SGSN1 και RNC3, RNC4 από τον SGSN2. Στη συνέχεια οι κόμβοι RNC θα προωθήσουν τα πακέτα στους τελικούς τους προορισμούς που είναι οι UE1 και UE2 για τον RNC1, ο UE3 για τον RNC3 και ο UE4 για τον RNC4. Είναι προφανές ότι με την παραπάνω διαδικασία τα πακέτα μεταδίδονται μία μόνο φορά στον ίδιο σύνδεσμο μέχρι να φτάσουν στους τελικούς τους προορισμούς, δηλαδή τα μέλη της multicast ομάδας MG1.

7.1.3 Φάση Joining

Ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο UMTS το οποίο παρέχει την υπηρεσία MBMS. Υποθέτουμε ότι ένας κινητός εξοπλισμός UE έχει ολοκληρώσει τη φάση Subscription και επιθυμεί να συμμετάσχει σε μία multicast ομάδα η οποία παρέχεται από τον κόμβο GGSN. Σε αυτή την περίπτωση, η φάση Service Announcement λαμβάνει χώρα. Για την ακρίβεια, ο UE στέλνει ένα μήνυμα στον κόμβο GGSN, με το οποίο ζητά μία λίστα από τις διαθέσιμες multicast ομάδες. Όταν το μήνυμα φτάνει στον GGSN, ο GGSN στέλνει την απάντησή του με ένα μήνυμα που περιέχει τις διαθέσιμες multicast ομάδες. Στο σημείο αυτό η φάση Service Announcement τερματίζεται. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο μηχανισμός ενημέρωσης των RLs κατά τη φάση που εντάσσονται σε μία multicast ομάδα (φάση Joining) και κατά τη φάση που αποχωρούν από μία multicast ομάδα στην οποία έχουν ενταχθεί προηγουμένως (φάση Leaving).

Εικόνα 42. Η φάση Joining.

Η φάση Joining είναι χρονικά η τρίτη φάση της παροχής υπηρεσίας MBMS. Κατά τη φάση αυτή ο UE ζητά τη συμμετοχή σε μία multicast ομάδα. Στη συνέχεια το δίκτυο εξετάζει εάν ο συγκεκριμένος UE πληροί τις προϋποθέσεις για να συμμετάσχει στη συγκεκριμένη multicast ομάδα. Αν οι προϋποθέσεις πληρούνται, το δίκτυο κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις προκειμένου να γίνει δυνατή η μετάδοση multicast πακέτων προς το συγκεκριμένο UE και ειδοποιεί σχετικά τον ίδιο το UE. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι λειτουργίες που θα πρέπει να προστεθούν στον υπάρχοντα μηχανισμό προκειμένου να γίνεται ορθή ενημέρωση των RLs κάθε κόμβου. Η Εικόνα 42 απεικονίζει τα βήματα της φάσης Joining της υπηρεσίας MBMS, ενώ η Εικόνα 43

παρουσιάζει για τις διάφορες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη φάση αυτή και οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Ο UE στέλνει ένα μήνυμα join request στο GGSN. Στο μήνυμα αυτό ζητά να συμμετάσχει σε μία multicast ομάδα προσδιορίζοντας ποια είναι η ομάδα.
2. Ο κόμβος GGSN εξετάζει το προφίλ του συνδρομητή ελέγχοντας αν πρέπει να γίνει δεκτή η αίτηση του UE. Αν υποθέσουμε ότι πληρούνται οι προϋποθέσεις τότε ο GGSN προσθέτει το συγκεκριμένο UE στην MGL που διατηρεί για τη multicast ομάδα. Στη συνέχεια, εξετάζει αν ο SGSN που εξυπηρετεί το UE υπάρχει στη σχετική RL. Αν ο SGSN δεν υπάρχει, τότε προστίθεται στη λίστα. Τελικά, ο GGSN στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης στον SGSN που εξυπηρετεί το UE.
3. Όταν ο κόμβος SGSN λάβει το μήνυμα επιβεβαίωσης εξετάζει αν ο RNC κόμβος που εξυπηρετεί το UE υπάρχει στην RL που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη multicast ομάδα. Αν ο RNC δεν υπάρχει στην RL, τότε προστίθεται στη λίστα και το μήνυμα επιβεβαίωσης προωθείται προς αυτόν.
4. Όταν ο RNC λάβει την επιβεβαίωση, προσθέτει το UE στην κατάλληλη RL και προωθεί την επιβεβαίωση στο UE.

Τελικά, όταν ο UE λάβει την επιβεβαίωση, η φάση της εγγραφής στην υπηρεσία έχει ολοκληρωθεί.

Εικόνα 43. Διαδικασίες κατά τη φάση Joining.

7.1.4 Η Φάση Leaving

Η φάση Leaving εκτελείται στην περίπτωση που ένας UE αποφασίζει να εγκαταλείψει μία multicast ομάδα. Στην περίπτωση αυτή η ακολουθία των μηνυμάτων που αποστέλλονται είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οι διαδικασίες της φάσης αυτής απεικονίζονται στην Εικόνα 44.

1. Ο UE στέλνει ένα μήνυμα leave request στο GGSN. Στο μήνυμα αυτό ζητά να αποχωρήσει από μία multicast ομάδα, προσδιορίζοντας ποια είναι η ομάδα.
2. Ο κόμβος GGSN διαγράφει το συγκεκριμένο UE από την αντίστοιχη MGL που διατηρεί για τη multicast ομάδα. Στη συνέχεια, εξετάζει αν υπάρχει άλλος UE ο οποίος να εξυπηρετείται από τον ίδιο SGSN. Αν δεν υπάρχει, ο κόμβος SGSN που εξυπηρετεί το UE που αποχωρεί διαγράφεται από την RL. Τελικά, ο GGSN στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης στον SGSN που εξυπηρετεί το UE.
3. Όταν ο κόμβος SGSN λάβει το μήνυμα επιβεβαίωσης εξετάζει αν υπάρχει άλλος UE που εξυπηρετείται από τον ίδιο RNC και συμμετέχει στην ίδια multicast ομάδα. Αν δεν υπάρχει, ο κόμβος RNC διαγράφεται από τη λίστα και το μήνυμα επιβεβαίωσης προωθείται προς αυτόν.
4. Όταν ο RNC λάβει την επιβεβαίωση, διαγράφει το συγκεκριμένο UE από την αντίστοιχη RL και προωθεί την επιβεβαίωση στο UE.

Εικόνα 44. Διαδικασίες κατά τη φάση Leaving.

Όταν ο UE λάβει το μήνυμα επιβεβαίωσης η φάση ολοκληρώνεται. Στο εξής ο συγκεκριμένος UE δεν αποτελεί μέλος της συγκεκριμένης multicast ομάδας και τα πακέτα που εισέρχονται στο PLMN και απευθύνονται σε αυτή τη multicast ομάδα δεν θα προωθούνται προς το UE αυτό.

7.1.5 Handover

Ας θεωρηθεί ένα UE το οποίο είναι μέλος μίας multicast ομάδας και την MBMS υπηρεσία η οποία βρίσκεται στη φάση Data Transfer. Υποθέτουμε ότι καθώς multicast πακέτα μεταδίδονται στα μέλη της multicast ομάδας, ο εξεταζόμενος UE αλλάζει κελί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν τα εξής τρία σενάρια για αυτό το handover:

- Inter-Node B/intra-RNS handover
- Inter-Node B/inter-RNS/intra-SGSN handover
- Inter-Node B/inter-RNS/inter-SGSN handover

Στην πρώτη περίπτωση, από τη στιγμή που το SRNS αποφασίσει να εκτελέσει ένα intra-RNS handover, στέλνει ένα radio link configuration μήνυμα στους Node Bs, καθώς επίσης και ένα radio resource control physical channel reconfiguration μήνυμα στο UE [64]. Σε αυτή την περίπτωση, οι υπάρχουσες RLs στους κόμβους του δικτύου παραμένουν αμετάβλητες. Συνεπώς, αυτή η περίπτωση δεν έχει καμία επίδραση στον προτεινόμενο μηχανισμό.

Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις υπάρχουν δύο ενδεχόμενα ανάλογα με τον τύπο καναλιού μεταφοράς που χρησιμοποιείται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο UMTS έχει εισαχθεί ένας νέος τύπος handover. Πρόκειται για το λεγόμενο soft handover το οποίο χρησιμοποιείται από τα αφιερωμένα κανάλια μεταφοράς. Για τα κοινά κανάλια μεταφοράς, όπως το HS-DSCH και το FACH, χρησιμοποιείται απευθείας η διαδικασία SRNS relocation για την οποία ο προτεινόμενος μηχανισμός θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο. Επίσης, ας σημειωθεί εδώ, ότι η τεχνική του soft handover δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα δίκτυα GSM. Για την ακρίβεια, στα δίκτυα GSM και σε αντίστοιχα σενάρια ακολουθείται η διαδικασία του hard handover, αφού άλλωστε τα δίκτυα GSM δεν διαθέτουν διεπαφές Iur.

Στο υπόλοιπο της παρούσας παραγράφου θα ασχοληθούμε με το χειρισμό του soft handover από τον προτεινόμενο μηχανισμό. Όσον αφορά στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις (inter-Node B/inter-RNS/intra-SGSN handover και inter-Node B/inter-RNS/inter-SGSN handover), ο χειρισμός που προτείνεται είναι πανομοιότυπος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η βασική ιδέα του inter-RNS handover είναι ότι ολόκληρη η διαδικασία δε γίνεται γνωστή και δεν εμπλέκει κόμβους SGSN. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μίας νέας διεπαφής, της Iur. Επομένως για τους δύο τύπους inter-RNS handover (για τον intra-SGSN και για τον inter-SGSN) τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω της διεπαφής Iur. Στον προτεινόμενο μηχανισμό χρησιμοποιούνται οι DRLs προκειμένου να αποκατασταθεί μία multicast μετάδοση πακέτων πάνω από τη διεπαφή Iur. Αυτού του είδους η multicast μετάδοση λαμβάνει χώρα και αποδίδει όταν πολλαπλά handovers από το ίδιο αρχικό RNS προς το ίδιο τελικό RNS έχουν λάβει χώρα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αρχικός RNC αποκαλείται SRNC ενώ ο τελικός RNC λέγεται Drift RNC (DRNC). Στην περίπτωση που ο ίδιος UE εκτελεί διαδοχικά handovers, χρησιμοποιούνται πολλαπλοί κόμβοι DRNCs. Στην πραγματικότητα, για τη συγκεκριμένη σύνοδο του UE, μόνο ο SRNC έχει σύνδεση με το CN. Για την ακρίβεια, τα δεδομένα φτάνουν στον DRNC μέσω της διεπαφής Iur και ο DRNC αναλαμβάνει να τα αποστείλει στον τελικό τους προορισμό.

Εικόνα 45. Τα βήματα του inter-RNS handover.

Η Εικόνα 45 παρουσιάζει σχηματικά τα βήματα της διαδικασίας του inter-RNS handover ενώ η Εικόνα 46 παρουσιάζει αναλυτικά τη διαδικασία. Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι βασισμένος στην υπάρχουσα διαδικασία για το handover στο UMTS. Επιπλέον, έχουν προστεθεί κάποιες επεκτάσεις προκειμένου να εξασφαλισθεί η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας MBMS. Στην παρακάτω ανάλυση δίνεται μεγαλύτερη σημασία σε αυτές τις επεκτάσεις.

1. Ο κόμβος SRNC αποφασίζει να εκτελέσει ένα handover. Η απόφαση βασίζεται σε μετρήσεις που έχει κάνει πάνω στο UE. Στο σημείο αυτό μία σύνδεση μέσω της διεπαφής Iur αποκαθίσταται μεταξύ του SRNC και του DRNC. Από αυτή τη σύνδεση και χωρίς ανάμειξη κάποιου SGSN ο SRNC ζητά την αποκατάσταση ενός ασύρματου συνδέσμου.
2. Αν οι απαραίτητοι πόροι είναι διαθέσιμοι στον DRNC, ο DRNC προωθεί την αίτηση για ασύρματο σύνδεσμο στον Node B στον οποίο ανήκει το νέο κελί.
3. Όταν η δέσμευση των απαραίτητων πόρων έχει ολοκληρωθεί, ο Node B στέλνει ένα μήνυμα επιβεβαίωσης στον DRNC. Μετά την αποστολή της επιβεβαίωσης, ο Node B αρχίζει να δέχεται δεδομένα από το UE. Επίσης, όταν ο DRNC λάβει την επιβεβαίωση, προσθέτει το UE στις RLs που σχετίζονται με τις multicast ομάδες στις οποίες ανήκει ο UE. Στη συνέχεια, ο DRNC προωθεί την επιβεβαίωση στον SRNC.
4. Όταν ο SRNC λάβει την επιβεβαίωση, εισάγει το ζευγάρι UE/DRNC στις DRLs που σχετίζονται με τις multicast ομάδες στις οποίες ανήκει ο UE.
5. Τελικά, ο UE ενημερώνεται ότι εκτελέστηκε το handover και λαμβάνει τις πληροφορίες που σχετίζονται με τη σύνδεση.

Όσον αφορά στο μηχανισμό προώθησης πακέτων, ένας επιπλέον έλεγχος πρέπει να γίνεται τους κόμβους RNC. Αυτός ο έλεγχος οφείλεται στην πιθανότητα προηγούμενης εκτέλεσης ενός ή περισσότερων inter-RNS handovers. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν συνδέσεις μέσω των διεπαφών Iur οπότε θα πρέπει να γίνει επεξεργασία των DRLs. Για την ακρίβεια, όταν ένα multicast πακέτο φθάνει σε ένα RNC, επιπλέον της προώθησης των πακέτων προς τους UEs, θα πρέπει να λάβει χώρα σάρωση της αντίστοιχης DRL. Αν η DRL δεν είναι άδεια, το πακέτο αντιγράφεται και μεταδίδεται μία μόνο φορά σε κάθε DRNC που υπάρχει στην DRL. Αυτές οι

μεταδόσεις γίνονται μέσω των αντίστοιχων διεπαφών Iur και ακολουθούν την multicast αντίληψη που ακολουθεί ολόκληρος ο προτεινόμενος μηχανισμός. Στην περίπτωση που ένας UE έχει εκτελέσει πολλαπλά διαδοχικά handovers, τότε πολλαπλά DRNCs αντιστοιχούν στη σύνοδό του. Για το λόγο αυτό η διαδικασία επαναλαμβάνεται αναδρομικά στους DRNCs έως ότου το πακέτο φθάσει στον τελευταίο DRNC. Τελικά, αυτό το DRNC θα αναλάβει να μεταδώσει το πακέτο στο UE.

Εικόνα 46. Η διαδικασία inter-RNS handover.

7.1.6 SRNS Relocation

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαδικασία του SRNS relocation βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα UMTS και όχι σε GSM. Χρησιμοποιείται για να μεταφερθεί το σημείο σύνδεσης του UTRAN με το CN από τον SRNC στον DRNC. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί από δύο αιτίες. Η πρώτη αιτία σχετίζεται με προηγούμενη εκτέλεση ενός ή περισσότερων soft handovers. Εφόσον ο SRNC αποφασίσει ότι η κίνηση πρέπει να διοχετευθεί στο UE μέσω κάποιου DRNC, τότε ζητά την εκτέλεση μίας διαδικασίας SRNS relocation. Η δεύτερη αιτία ενεργοποίησης της διαδικασίας SRNS relocation είναι όταν ο χρήστης που μετακινείται σε ένα νέο RNS, χρησιμοποιεί ένα κοινό κανάλι μεταφοράς (δηλαδή όχι ένα αφιερωμένο DCH). Αυτό γιατί τα κοινά κανάλια μεταφοράς δεν υποστηρίζουν τη διαδικασία του soft handover.

Τα είδη του SRNS relocation είναι δύο. Αν ο DRNC είναι συνδεδεμένος με τον ίδιο κόμβο SGSN που είναι συνδεδεμένος ο SRNC, τότε μία διαδικασία intra-SGSN

SRNS relocation εκτελείται. Σε αντίθετη περίπτωση, αν ο DRNC είναι συνδεδεμένος με διαφορετικό SGSN, η διαδικασία που λαμβάνει χώρα είναι η inter-SGSN SRNS relocation. Η Εικόνα 47 απεικονίζει τα βήματα της δεύτερης περίπτωσης η οποία είναι και η γενικότερη από τις δύο.

Εικόνα 47. Τα βήματα της διαδικασίας inter-SGSN SRNS relocation.

Η Εικόνα 48 παρουσιάζει αναλυτικά τη διαδικασία. Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι βασισμένος στην υπάρχουσα διαδικασία για το handover στο UMTS. Επιπλέον, έχουν προστεθεί κάποιες επεκτάσεις προκειμένου να εξασφαλισθεί η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας MBMS. Στην παρακάτω ανάλυση δίνεται μεγαλύτερη σημασία σε αυτές τις επεκτάσεις.

1. Ο τρέχων SRNC αποφασίζει ότι είναι αναγκαία μία SRNS relocation του UE προς τον DRNC. Ο SRNC στέλνει ένα μήνυμα προς τον παλιό SGSN με το οποίο ζητά τη διαδικασία SRNS relocation. Στο μήνυμα αυτό προσδιορίζει το DRNC που αποτελεί τον RNC-στόχο της διαδικασίας.
2. Ο παλιός SGSN προωθεί την αίτηση στο νέο SGSN. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο, ο νέος SGSN ενημερώνεται για τις multicast ομάδες στις οποίες συμμετέχει ο UE και μεταφέρεται το πλαίσιο της υπηρεσίας MBMS.
3. Ο νέος SGSN στέλνει το ίδιο μήνυμα στον RNC-στόχο. Ο RNC-στόχος ενημερώνεται από το νέο SGSN για τις multicast ομάδες στις οποίες ανήκει το UE. Τελικά, ο RNC-στόχος εκτελεί μία ενημέρωση των αντιστοίχων RLs. Αν ένα soft handover έχει προηγηθεί της διαδικασίας του SRNS relocation, τότε αυτό είναι προαιρετικό αφού ο UE έχει ήδη εισαχθεί στις RLs κατά τη διάρκεια του handover. Στην περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί soft handover, η προσθήκη του UE είναι υποχρεωτική.
4. Ένα μήνυμα επιβεβαίωσης της SRNS relocation επιστρέφεται από τον RNC-στόχο προς το νέο SGSN. Ο νέος SGSN εξετάζει κάθε RL που σχετίζεται με τις multicast ομάδες στις οποίες συμμετέχει ο UE. Για κάθε RL, αν ο RNC-στόχος δεν περιέχεται, προστίθεται σε αυτή.
5. Ο νέος SGSN δημιουργεί το πλαίσιο του MBMS φορέα και καταχωρείται στον GGSN. Ο GGSN εξετάζει κάθε RL που σχετίζεται με τις multicast ομάδες στις οποίες ανήκει ο UE. Αν ο νέος GGSN δεν περιέχεται σε μια RL, προστίθεται σε αυτήν.

6. Ο κόμβος GGSN ειδοποιεί το νέο SGSN για την επιτυχή καταχώρηση του UE. Με αυτόν τον τρόπο έχει ολοκληρωθεί η μεταγωγή της σύνδεσης από τον παλιό SGSN προς το νέο SGSN.

Εικόνα 48. Η διαδικασία inter-SGSN SRNS relocation.

7. Ο GGSN ειδοποιεί τον παλιό SGSN ότι η υπηρεσία έχει καταργηθεί για το συγκεκριμένο UE. Ο παλιός SGSN εξετάζει κάθε RL που σχετίζεται με τις multicast ομάδες στις οποίες ο UE συμμετέχει. Αν δεν υπάρχει άλλος UE το οποίο να εξυπηρετείται από τον αρχικό RNC και να συμμετέχει στην αντίστοιχη multicast ομάδα, ο αρχικός RNC διαγράφεται από την RL.
8. Ο αρχικός RNC ειδοποιείται από τον παλιό SGSN ότι η SRNS relocation ολοκληρώθηκε. Όλες οι εγγραφές που περιέχουν το UE διαγράφονται από όλες τις DRLs του αρχικού RNC. Στη συνέχεια, ο UE διαγράφεται από τις σχετικές RLs. Από αυτή τη στιγμή, ο RNC-στόχος θεωρείται ότι είναι ο SRNS του UE.

Η περίπτωση του intra-SGSN SRNS relocation είναι παρόμοια. Όλα τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι έγκυρα, απλώς πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο τελικός RNC είναι συνδεδεμένος στον ίδιο SGSN με τον αρχικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να παραλείπονται τα μηνύματα μεταξύ του παλιού και του νέου SGSN, όπως επίσης και η ενημέρωση των RLs του κόμβου GGSN (αφού ο σχετικός SGSN δεν αλλάζει). Από τα παραπάνω, για την περίπτωση του intra-SGSN SRNS relocation η εικόνα που περιγράφει τη διαδικασία είναι η εξής:

Εικόνα 49. Η διαδικασία intra-SGSN SRNS relocation.

7.1.7 Μετάδοση Δεδομένων στο UTRAN

Όπως ήδη αναφέρθηκε, για τη multicast μετάδοση δεδομένων στο UTRAN, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση των δεδομένων στις διεπαφές Iub και Uu του UTRAN μπορεί να γίνει με κανάλια DCH, FACH ή HS-DSCH. Η χρήση κάθε καναλιού παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κανάλι που οδηγεί σε αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου, εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το πλήθος των χρηστών ανά κελί, την κινητικότητα των χρηστών κ.α. Κατά συνέπεια, η βέλτιστη επιλογή μπορεί να διαφέρει κατά περίπτωση. Για το λόγο αυτό, ο προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε από τα τρία αυτά κανάλια. Η τελική επιλογή του τύπου

του καναλιού έγκειται στην κρίση του διαχειριστή του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επιλέξει τη χρήση αποκλειστικά ενός καναλιού ή τη χρήση περισσότερων καναλιών, με την τελική επιλογή να γίνεται κατά περίπτωση. Για παράδειγμα, για κάποια υπηρεσία με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και στην οποία έχουν εγγραφεί πολλοί multicast χρήστες, μπορεί να χρησιμοποιείται FACH κανάλι. Από την άλλη πλευρά, σε μία άλλη υπηρεσία με υψηλό ρυθμό μετάδοσης το χρησιμοποιούμενο κανάλι μπορεί να είναι το HS-DSCH.

7.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά το μοντέλο εξομοίωσης που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετηθεί και να αξιολογηθεί ο προτεινόμενος μηχανισμός. Για την ακρίβεια, παρουσιάζεται ο εξομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε ως βάση των πειραμάτων καθώς και οι επεκτάσεις που προστέθηκαν σε αυτόν προκειμένου να μπορεί να εξομοιώσει με ακρίβεια τον προτεινόμενο μηχανισμό. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου το πειραματικό μοντέλο να έχει χαρακτηριστικά ενός πραγματικού συστήματος. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει με μία ενδεικτική περιγραφή ενός κώδικα εξομοίωσης.

7.2.1 Εξομοιωτής ns-2

Ο μηχανισμός που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή network simulator ns-2 [94]. Πρόκειται για ένα open-source εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Ο ns-2 αποτελεί ένα πολύ ισχυρό περιβάλλον εξομοίωσης το οποίο μπορεί να εξομοιώσει πολλά είδη δικτύων, όπως ασύρματα και δορυφορικά δίκτυα. Η υλοποίηση του ns-2 ξεκίνησε το 1989 στο πανεπιστήμιο Berkeley. Η αρχική ιδέα για την ανάπτυξη του ήταν η δημιουργία μίας παραλλαγής του Real network simulator. Το 1995, η ανάπτυξη του υποστηρίχθηκε και από την υπηρεσία του υπουργείου άμυνας των Η.Π.Α. DARPA μέσα από το έργο Virtual InterNetwork Testbed (VINT). Το VINT ήταν ένα έργο στο οποίο συνεργάστηκαν οι εταιρίες USC/ISI, Xerox PARC, LBNL και το πανεπιστήμιο Berkeley. Στις μέρες μας, η υποστήριξη του ns-2 γίνεται από την DARPA μέσα από το έργο SAMAN και από την NSF μέσα από το έργο CONSER.

Μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί πολλές εκδόσεις του συγκεκριμένου συστήματος εξομοίωσης. Οι διάφορες εκδόσεις του ns-2 διατίθενται ελεύθερα και απευθύνονται σε διάφορες πλατφόρμες λειτουργικών συστημάτων όπως τα Linux, Solaris, Windows και το FreeBSD. Για την παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.28 που είναι και η τελευταία διαθέσιμη έκδοση. Επίσης, η εγκατάσταση έγινε στην πλατφόρμα Linux Mandrake 10. Ο εξομοιωτής δεν λειτουργήσε μεμονωμένα αλλά στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου πακέτου, του ns-allinone-2.28. Το συγκεκριμένο πακέτο περιέχει, εκτός από τον ίδιο τον εξομοιωτή ns-2, μία σειρά από άλλα πακέτα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά κατά την εξομοίωση δικτύων με τον ns-2. Τα πακέτα αυτά είναι τα εξής:

- Το πακέτο *nam*. Το συγκεκριμένο πακέτο δίνει τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης της τοπολογίας του δικτύου καθώς και της λειτουργίας του.

- Το πακέτο *xgraph*. Πρόκειται για ένα πακέτο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων διαφόρων δεδομένων της εξόδου της εφαρμογής.
- Η γλώσσα *perl*. Μέσω του πακέτου αυτού ο ns-2 έχει τη δυνατότητα να εκτελεί προγράμματα γραμμένα σε γλώσσα *perl*.
- Το πακέτο *tcl-debug*. Αυτό το πακέτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για debugging.
- Το πακέτο μετατροπής *sgb2ns*. Το πακέτο *sgb2ns* χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της εξόδου του *gt-itm* σε μορφή συμβατή με τον ns-2. Χρησιμοποιείται σε τοπολογίες που έχουν παραχθεί αυτόματα από το σύστημα *gt-itm*. Το σύστημα *gt-itm* παρέχει πολλές δυνατότητες για την παραγωγή μίας τοπολογίας και μπορεί να παράγει είτε τυχαίες είτε τοπολογίες με ορισμένα χαρακτηριστικά.
- Το πακέτο μετατροπής *tiers2ns*. Πρόκειται για κάτι αντίστοιχο με το πακέτο που περιγράφηκε προηγουμένως. Αυτή τη φορά χρησιμοποιείται ως είσοδος η έξοδος του Tiers Topology Generator.
- Τέλος, πρέπει να αναφερθεί το πακέτο *Cweb* το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ευανάγνωστων C++ προγραμμάτων.

Η υλοποίηση του εξομοιωτή έχει γίνει σε γλώσσα C++. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται η scripting γλώσσα OTcl ως διεπαφή λήψης εντολών και ρύθμισης παραμέτρων. Με άλλα λόγια, ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει επακριβώς τα πειράματα εξομοίωσης μέσω της γλώσσας OTcl. Τα scripts που γράφονται στη γλώσσα αυτή δίνονται ως είσοδος στον εξομοιωτή και αυτός με τη σειρά του τα εκτελεί. Μέσω των OTcl scripts ο χρήστης μπορεί να ορίσει τοπολογίες δικτύων που αποτελούνται από κόμβους και συνδέσμους. Δίνεται η δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων των συνδέσμων, όπως το εύρος ζώνης και οι καθυστερήσεις στις ουρές. Στη συνέχεια μπορεί να καθοριστούν οι πηγές και οι προορισμοί των κινήσεων πληροφορίας. Ο τρόπος που δημιουργούνται αυτές οι οντότητες είναι αρκετά απλός και γίνεται με τον ορισμό *agents*. Η έξοδος που παράγεται μπορεί να έχει διάφορες μορφές ανάλογα με τα συμπληρωματικά πακέτα που χρησιμοποιούνται. Δύο από τους πιο συνηθισμένους τύπους εξόδου είναι *log* αρχεία τα οποία περιγράφουν την κίνηση πακέτων πάνω από ένα σύνδεσμο ή την κατάσταση μίας ουράς. Τα αρχεία αυτά μπορούν, αφού δεχθούν κάποια επεξεργασία, να υπολογίσουν συγκεκριμένες μετρικές που ενδιαφέρουν άμεσα τον ερευνητή, όπως για παράδειγμα το *throughput* της κίνησης ή την καθυστέρηση μετάδοσης ενός πακέτου.

Ο ns-2 υποστηρίζει πολλά δικτυακά πρωτόκολλα (όπως τα TCP, UDP και RTP), διάφορους τύπους κίνησης (όπως FTP, Telnet, HTTP, CBR και VBR), μηχανισμούς διαχείρισης ουρών (όπως τους RED, DropTail και CBQ), αλγορίθμους δρομολόγησης (όπως τους Dijkstra και Bellman Ford). Επίσης, ο ns-2 υποστηρίζει εξομοιώσεις σφαλμάτων στη λειτουργία του δικτύου, όπως ντετερμινιστικές και πιθανοτικές απώλειες πακέτων καθώς και *link failures* [55].

Η χρησιμότητα του ns-2 είναι μεγάλη στο σχεδιασμό νέων πρωτοκόλλων καθώς και στον έλεγχο της ορθότητας και της αποδοτικότητας νέων μηχανισμών μετάδοσης. Επίσης, ο ns-2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εκπαιδευτικούς σκοπούς διότι, μέσω του πακέτου *nam*, μπορεί να απεικονίσει γραφικά τα δίκτυα και τις συμπεριφορές των πρωτοκόλλων. Για όλους τους παραπάνω λόγους ο ns-2 αποτελεί ένα πολύ ισχυρό και

εύκολο στη χρήση περιβάλλον εξομοίωσης το οποίο η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί ευρύτατα.

7.2.2 Θέματα Υλοποίησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προτεινόμενος μηχανισμός υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή ns-2 προκειμένου να μελετηθεί και να αξιολογηθεί. Συμπληρωματικά του ns-2 χρησιμοποιήθηκε η επέκταση EURANE. Πρόκειται για το πακέτο Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions (EURANE) το οποίο αποτελείται από επεκτάσεις του ns-2 προκειμένου ο εξομοιωτής να υποστηρίξει τις λειτουργίες του UMTS συστήματος. Ο ns-2 προς το παρόν δεν έχει ενσωματωμένη υποστήριξη των λειτουργιών του UMTS δικτύου. Οι συγκεκριμένες επεκτάσεις αφορούν στους τρεις κόμβους του UTRAN τους οποίους δεν υποστηρίζει ο ns-2. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι RNC, Node B και UE έχουν υλοποιηθεί στο EURANE. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το EURANE υποστηρίζει τις λειτουργίες των καναλιών μεταφοράς δεδομένων και πιο συγκεκριμένα του FACH, του RACH, του DCH και του HS-DSCH [96].

Δεδομένου ότι ο εξομοιωτής ns-2 καθώς και η επέκταση EURANE δεν υποστηρίζουν multicast μετάδοση δεδομένων στο UMTS, ο multicast μηχανισμός μετάδοσης πακέτων προστέθηκε εξ' ολοκλήρου στον εξομοιωτή. Καταρχάς εισήχθησαν οι RLs μέσα σε κάθε κόμβο του δικτύου UMTS, εκτός των UE. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μία νέα κλάση η οποία ονομάστηκε `Routing_List`. Επίσης, δημιουργήθηκε η κλάση που θα αντιπροσωπεύει τις DRLs τους κόμβους RNC, η οποία ονομάστηκε `Drift_Routing_List` (δείτε την Εικόνα 41). Τέλος, δημιουργήθηκε μία άλλη νέα κλάση που ονομάστηκε `Multicast_Group_List` και η οποία αναπαριστά τις MGLs (Εικόνα 41).

Κάθε λίστα που δημιουργήθηκε στον ns-2 είναι μία διπλά διασυνδεδεμένη λίστα η οποία περιέχει όλες τις απαραίτητες μεθόδους προκειμένου να προσπελαστεί ή να τροποποιηθεί. Σε ένα κόμβο SGSN για παράδειγμα, είναι δυνατόν να ανακτηθούν οι κόμβοι του κατώτερου επιπέδου (RNCs) ο οποίοι εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο SGSN και οι οποίοι είναι μέλη της multicast ομάδας `m_group_id`, μέσω της κλήσης της μεθόδου `Get_Next_Level_Nodes(m_group_id)`. Ανάλογες μέθοδοι υπάρχουν και για την εισαγωγή ή τη διαγραφή κόμβων από τις RLs, όπως η μέθοδος `Set_Next_Level_Node(m_group_id, next_level_node)`. Η μέθοδος αυτή προσθέτει τον υποδεικνυόμενο κόμβο κατώτερου επιπέδου στην RL που αντιστοιχεί στο όρισμα `m_group_id`. Προφανώς, στην περίπτωση που η αντίστοιχη RL δεν έχει ήδη δημιουργηθεί, η μέθοδος `Set_Next_Level_Node()` δημιουργεί μία νέα RL συσχετισμένη με το `m_group_id` και εισάγει σε αυτή το νέο κόμβο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κόμβοι RNC περιέχουν ένα επιπλέον είδος διπλά διασυνδεδεμένων λιστών, που υλοποιούνται από την κλάση `Drift_Routing_List`. Προκειμένου να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της απόδοσης κατά τη μετάδοση δεδομένων εκτός από τους συνδέσμους που διασυνδέουν τις εγγραφές των DRLs υπάρχει και ένα άλλο είδος συνδέσμων μεταξύ των εγγραφών. Οι σύνδεσμοι αυτοί διασυνδέουν τις εγγραφές με τα διαφορετικά DRNCs που υπάρχουν στη λίστα. Αν παρατηρήσετε το παράδειγμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 50, οι τέσσερις διαφορετικοί DRNCs που εμφανίζονται διασυνδέονται ξεχωριστά με ένα άλλο είδος συνδέσμων που απεικονίζονται κάτω από τις εγγραφές. Αυτή η διασύνδεση βελτιώνει την απόδοση κατά τη λειτουργία του μηχανισμού προώθησης πακέτων. Όταν ένα

multicast πακέτο πληροφορίας ληφθεί από ένα κόμβο RNC, τότε στον κόμβο εκτελείται μία σάρωση του DRL που αντιστοιχεί στη multicast ομάδα που απευθύνεται το πακέτο. Η σάρωση αυτή έχει σκοπό να ανακτήσει όλα τα διαφορετικά DRNCs τις λίστες. Στη μέθοδο `Get_DRNCs(m_group_id)` που υλοποιήθηκε για το σκοπό αυτό η σάρωση διατρέχει τις εγγραφές, όχι μέσω των αρχικών συνδέσμων, αλλά μέσω αυτών που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αυτό προκαλεί μείωση των επαναλήψεων καθώς το πλήθος των επαναλήψεων ισούται με το πλήθος των διαφορετικών DRNCs που χρησιμοποιούνται και όχι με το πλήθος των UE που έχουν εκτελέσει handovers. Η βελτίωση της απόδοσης που προσφέρει αυτού του είδους η υλοποίηση είναι πολύ σημαντική καθώς μειώνει κατά πολύ τον υπολογιστικό φόρτο κατά τη διάρκεια των αναμεταδόσεων πακέτων. Τέλος, όπως και για τη μέθοδο `Routing_List`, υπάρχουν μέθοδοι τροποποίησης των περιεχομένων των αντικειμένων.

Εικόνα 50. Η διασύνδεση των DRLs.

Το τρίτο και τελευταίο είδος λίστες που υλοποιήθηκε είναι οι MGLs. Η υλοποίησή τους γίνεται από την κλάση `Multicast_Group_List`, η οποία βρίσκεται μόνο στον κόμβο GGSN. Για την προσπέλαση των UEs που ανήκουν σε μία multicast ομάδα παρέχεται η μέθοδος `Get_UEs(m_group_id)` η οποία επιστρέφει τους UEs που ανήκουν στο `m_group_id`. Προφανώς υπάρχουν και ανάλογες μέθοδοι τροποποίησης των MGLs.

Το επόμενο βήμα της υλοποίησης ήταν η οργάνωση της όλης διαδικασίας. Για την ακρίβεια, δημιουργήθηκε ο μηχανισμός δρομολόγησης που επεξεργάζεται τις λίστες, αναλαμβάνει τη δημιουργία των αντιγράφων των πακέτων και στη συνέχεια προωθεί τα πακέτα προς τους κατάλληλους κόμβους. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι διαδικασίες μέσω των οποίων ένας UE μπορεί να ενταχθεί ή να αποχωρήσει από μία multicast ομάδα. Τέλος, δημιουργήθηκαν οι μηχανισμοί που εκτελούν την ενημέρωση των λιστών όταν φαινόμενα κινητικότητας χρηστών, δηλαδή handovers και SRNS relocations λαμβάνουν χώρα.

Όσον αφορά στην επικοινωνία των κόμβων όπως επίσης και για τη μετάδοση των video δεδομένων, χρησιμοποιούνται μηνύματα Real-time Transport Protocol (RTP) και Real-time Transport Control Protocol (RTCP). Λόγω του γεγονότος ότι τα πρωτόκολλα RTP και RTCP δεν είναι πλήρως λειτουργικά στην επέκταση EURANE, μία τροποποίησή τους έλαβε χώρα προκειμένου να μπορούν να υποστηρίξουν μεταφορά επιπλέον πληροφορίας. Παραδείγματα τέτοιου είδους πληροφορίας είναι ο τύπος της αίτησης, το αναγνωριστικό της multicast ομάδας (`m_group_id`) και το προφίλ του UE όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσίας QoS [96].

7.2.3 Παράμετροι του Μοντέλου Εξομοίωσης

Το μοντέλο εξομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 51. Για την ακρίβεια, θεωρούμε ότι το εξεταζόμενο δίκτυο αποτελείται από τρεις κόμβους SGSN από τους οποίους καθένας εξυπηρετεί δύο κόμβους RNC. Τέλος, θεωρούμε ότι κάθε RNC ελέγχει τρεις Node Bs. Επειδή μία συμμετρική τοπολογία δεν είναι επιθυμητή, διαφοροποιούμε τον αριθμό των UEs που εξυπηρετούνται από τον ίδιο Node B. Για λόγους απλότητας θεωρούμε ότι υπάρχει μόνο μία multicast ομάδα στην οποία μπορούν να συμμετάσχουν οι UEs. Στην Εικόνα 51, υποτίθεται ότι όλοι οι UEs που απεικονίζονται, ανήκουν στην εξεταζόμενη multicast ομάδα. Επομένως, οι UEs που ανήκουν στην ομάδα και οι οποίοι εξυπηρετούνται από τον ίδιο Node B κυμαίνονται από μηδέν έως τρεις. Παρόλο που το πλήθος τους ανά κελί δεν είναι ρεαλιστικό (στην πραγματικότητα μπορούν να είναι πολύ περισσότερα), αρκεί για να δείξει την ορθότητα του προτεινόμενου μηχανισμού καθώς και τη σημαντική βελτίωση της απόδοσης που προσφέρει σε σχέση με τις πολλαπλές unicast μεταδόσεις.

Εικόνα 51. Η εξεταζόμενη τοπολογία.

Στο μοντέλο εξομοίωσης η μετάδοση των δεδομένων πάνω από τους ασύρματους συνδέσμους γίνεται με χρήση διαφόρων τύπων καναλιών. Για την ακρίβεια στα πειράματα χρησιμοποιούνται κανάλια DCH, FACH καθώς και HS-DSCH. Όσον αφορά στην ακολουθία δεδομένων video, αυτή είναι κωδικοποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ITU-H.263 [63][52]. Το video trace που χρησιμοποιείται έχει ληφθεί από το [52] και θεωρούμε ότι εισάγεται στο δίκτυο PLMN από ένα εξωτερικό κόμβο ο οποίος συνδέεται με τον κόμβο GGSN. Υποθέτουμε ότι ο συγκεκριμένος εξωτερικός κόμβος είναι ένας media server που μεταδίδει κίνηση video προς τους UEs που ανήκουν στη multicast ομάδα. Για τη μετάδοση των δεδομένων video χρησιμοποιείται κίνηση RTP. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση RTCP αναφορών, ο κόμβος GGSN έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει χρήσιμες στατιστικές πληροφορίες. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι το bitrate της εισερχόμενης κίνησης video είναι 64Kbps ενώ το μέγεθος πακέτου είναι 512 bytes.

Όσον αφορά τα πειράματα, η προσοχή εστιάζεται στη φάση Data Transfer, δηλαδή την κύρια φάση κατά την παροχή υπηρεσίας MBMS. Επιπλέον, εξετάζονται διάφορα σενάρια κινητικότητας των χρηστών προκειμένου να καλυφθούν όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις. Επομένως, εξετάζεται η περίπτωση ενός inter-Node B / inter-RNS / intra-SGSN handover ακολουθούμενου από μία intra-SGSN SRNS relocation, καθώς και η περίπτωση ενός inter-Node B / inter-RNS / inter-SGSN handover με μία inter-SGSN SRNS relocation να ακολουθεί. Επίσης, εξετάζεται η συμπεριφορά του μηχανισμού κατά την multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από την Iur διεπαφή στην περίπτωση όπου πολλαπλά handovers συμβαίνουν από τον ίδιο αρχικό RNC προς τον ίδιο τελικό. Τέλος, μελετάται η συμπεριφορά του μηχανισμού ανάλογα με τον τύπο καναλιού μεταφοράς (FACH, HS-DSCH και DCH) που χρησιμοποιείται στο UTRAN.

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από την εξομοίωση. Οι δύο παράμετροι που θα εξεταστούν είναι η αποδοτικότητα του multicast μηχανισμού μετάδοσης πακέτων καθώς και η ορθότητά του σε σενάρια κινητικότητας χρηστών όπου handovers και SRNS relocations λαμβάνουν χώρα.

7.3.1 Αποδοτικότητα

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού, η στατιστική παράμετρος στην οποία εστιάζεται η προσοχή είναι το throughput. Πιο συγκεκριμένα, καταρχάς υπολογίζεται το throughput στους συνδέσμους του δικτύου UMTS όταν αυτό χρησιμοποιεί το multicast μηχανισμό για τη μετάδοση των δεδομένων video. Στη συνέχεια μεταδίδουμε την ίδια κίνηση video στο ίδιο δίκτυο UMTS χρησιμοποιώντας την απλοϊκή τεχνική του πολλαπλού unicast. Μετά το τέλος του πειράματος γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών όσον αφορά το throughput πάνω από τον ίδιο σύνδεσμο.

Η Εικόνα 52 και η Εικόνα 53 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τους συνδέσμους GGSN-SGSN1 και SGSN1-RNC1 αντίστοιχα, και για την τοπολογία δικτύου που απεικονίζεται στην Εικόνα 51. Στην πρώτη περίπτωση οι αποδέκτες των multicast πακέτων είναι δέκα UEs (UE1 έως UE10) οι οποίοι εξυπηρετούνται από τον κόμβο SGSN1, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι αποδέκτες είναι πέντε UE (UE1 έως UE5) οι οποίοι βρίσκονται στο RNS που ελέγχεται από τον RNC1.

Τα διαγράμματα απεικονίζουν τα δεδομένα που συνελέγησαν. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το throughput που προκύπτει κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων είναι περίπου το ίδιο με το θεωρητικό bitrate (64 Kbps) το οποίο αντιπροσωπεύεται από την ευθεία γραμμή που υπάρχει στα διαγράμματα πάνω στην αντίστοιχη τιμή. Στην πραγματικότητα η ίδια παρατήρηση ισχύει όχι μόνο για τους εξεταζόμενους συνδέσμους, αλλά για όλους τους συνδέσμους του δικτύου πάνω από τους οποίους γίνεται μετάδοση δεδομένων. Αυτό συμβαίνει διότι, κατά τη multicast μετάδοση, τα πακέτα μεταδίδονται μόνο μία φορά πάνω από κάθε σύνδεσμο του δικτύου. Το γεγονός αυτό καθιστά, όσον αφορά στις αποστολές πακέτων, τη multicast μετάδοση πολύ πιο οικονομική σε σχέση με χρήση πολλαπλών unicast μεταδόσεων.

Εικόνα 52. Το throughput στο σύνδεσμο GGSN-SGSN1.

Εικόνα 53. Το throughput στο σύνδεσμο SGSN1-RNC1.

Η επόμενη παρατήρηση προέρχεται από τη σύγκριση των διαγραμμάτων για τη multicast και τη unicast μετάδοση του video. Στις παραπάνω εικόνες μπορεί κανείς να διακρίνει ότι το throughput για τις πολλαπλές unicast μεταδόσεις είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό για τον multicast μηχανισμό. Στη unicast τεχνική, τα ίδια

πακέτα μεταδίδονται περισσότερες από μία φορές πάνω από κάθε σύνδεσμο με αποτέλεσμα αύξηση του throughput. Στην περίπτωση της multicast τεχνικής, μόνο ένα αντίγραφο κάθε πακέτου μεταδίδεται σε κάθε σύνδεσμο του δικτύου και, επομένως, το throughput περιορίζεται. Στο σημείο αυτό φαίνεται η χρησιμότητα της multicast τεχνικής προκειμένου να αποφευχθούν συμφορήσεις του δικτύου οι οποίες θα ήταν πιθανό να συμβούν κατά τη χρήση πολλαπλών unicast μεταδόσεων.

Είναι αναμενόμενο ότι το μέγεθος της απόστασης των δύο γραφικών παραστάσεων (unicast και multicast) που απεικονίζεται στις παραπάνω εικόνες, εξαρτάται από τον πλήθος των μελών της multicast ομάδας στα οποία απευθύνεται η κίνηση. Για παράδειγμα, θεωρήστε την Εικόνα 52 όπου φαίνεται το throughput στο σύνδεσμο μεταξύ του κόμβου GGSN και του SGSN1. Σε αυτή την περίπτωση, παρατηρούμε ότι το throughput κατά τη unicast μετάδοση είναι περίπου δέκα φορές μεγαλύτερο από το throughput στον ίδιο σύνδεσμο όταν χρησιμοποιείται multicast μετάδοση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι εύλογο και προβλέψιμο καθώς το συνολικό πλήθος των UEs που ανήκουν στη multicast ομάδα και εξυπηρετούνται από τον SGSN1 είναι δέκα. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση πάνω από αυτόν το σύνδεσμο κατά τη unicast μετάδοση είναι περίπου δέκα επί το θεωρητικό bitrate του video. Με ανάλογο τρόπο μπορεί να αναλυθεί το εύρος της απόστασης των δύο γραμμών (throughput στη unicast και στη multicast μετάδοση) στην Εικόνα 53. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο αριθμός των UEs που ελέγχονται από τον RNC1 είναι πέντε.

7.3.2 Κινητικότητα Χρηστών

Στις παρακάτω παραγράφους εξετάζεται μέσω εξομοιώσεων η συμπεριφορά του μηχανισμού σε διάφορα σενάρια κινητικότητας χρηστών. Οι εξομοιώσεις σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξεταστεί ο προτεινόμενος μηχανισμός από δύο άποψεις. Η μία άποψη είναι η εξασφάλιση της ορθότητας του μηχανισμού ενώ η άλλη άποψη είναι η βελτίωση της απόδοσης κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από τη διεπαφή Iur.

Εικόνα 54. Ο έλεγχος της ορθότητας κατά την κινητικότητα χρηστών.

Ο έλεγχος της ορθότητας έγκειται στο να ελεγχθεί η εξασφάλιση της συνεκτικότητας της παροχής υπηρεσίας κατά την κινητικότητα των χρηστών. Για το σκοπό αυτό

σχεδιάστηκε και εξομοιώθηκε το παρακάτω πείραμα: Καταρχάς εξακολουθούμε να εξετάζουμε την προηγούμενη τοπολογία δικτύου UMTS. Υποθέτουμε την ορισμένη κίνηση video των 64 Kbps που περιγράψαμε προηγουμένως και η οποία απευθύνεται στην εξεταζόμενη multicast ομάδα. Θεωρούμε ότι η παροχή υπηρεσίας MBMS βρίσκεται στη φάση Data Transfer. Σε πρώτη φάση, υποθέτουμε ότι ο UE1 βρίσκεται στο κελί που εξυπηρετείται από τον Node B1 (όπως φαίνεται στην Εικόνα 54). Μετά από είκοσι δευτερόλεπτα λήψης δεδομένων video, ο UE1 εκτελεί ένα handover προς το κελί που εξυπηρετείται από τον Node B4 (καμπύλη διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 54). Προφανώς πρόκειται για ένα inter-Node B / inter-RNS / intra-SGSN handover που λαμβάνει χώρα. Στο σημείο αυτό τα video πακέτα μεταδίδονται προς το UE1 μέσω της διεπαφής Iur που συνδέει τον RNC1 με τον RNC2. Στα σαράντα δευτερόλεπτα εξομοίωσης, μία intra-SGSN SRNS relocation αιτείται από τον RNC1. Όταν η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί, ο RNC2 είναι ο νέος SRNC του UE1 και η διεπαφή Iur αποδεσμεύεται.

Στη συνέχεια του πειράματος, στα εξήντα δευτερόλεπτα εξομοίωσης, ένα νέο handover λαμβάνει χώρα. Όπως δείχνει και η Εικόνα 54, ο UE1 μετακινείται από το κελί που ελέγχεται από τον Node B4 προς το κελί που ελέγχεται από τον Node B7. Συνεπώς, αυτή τη φορά πρόκειται για ένα inter-Node B / inter-RNS / inter-SGSN handover που ο UE1 εκτελεί από τον RNC2 προς τον RNC3. Στο σημείο αυτή η διεπαφή Iur που διασυνδέει τον RNC2 με τον RNC3 αναλαμβάνει να μεταδώσει τα δεδομένα που απευθύνονται προς το UE1. Τελικά, στα ογδόντα δευτερόλεπτα, μία δεύτερη SRNS relocation ζητείται. Αυτή τη φορά ο αιτών είναι ο κόμβος RNC2 και πρόκειται για μία inter-SGSN SRNS relocation. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας relocation η διεπαφή Iur μεταξύ των RNC2 και RNC3 αποδεσμεύεται και ο RNC3 γίνεται ο SRNC του UE1. Η εξομοίωση σταματά στα εκατό δευτερόλεπτα και ενώ ο UE1 βρίσκεται στο κελί που ελέγχεται από τον Node B7.

Εικόνα 55. Το bitrate της λήψης δεδομένων από το UE1.

Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, υπολογίζεται το bitrate των δεδομένων video που λαμβάνεται από το UE1. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 55. Όπως μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε, το bitrate των δεδομένων που λαμβάνονται από το UE1 είναι σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας που περιγράφηκε προηγουμένως. Συνεπώς, η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας εξασφαλίζεται και ο UE1 λαμβάνει διαρκώς δεδομένα καθώς διέρχεται από διαφορετικά RNSs και καθώς εξυπηρετείται από διεπαφές Iur. Το γεγονός αυτό μπορεί επίσης να διαπιστωθεί από τα αρχεία log που προκύπτουν ως έξοδος της εξομοίωσης. Στα αρχεία αυτά φαίνεται ότι καμία απώλεια πακέτου δε συμβαίνει, καθώς όλα τα πακέτα που εισέρχονται στο PLMN και απευθύνονται στην εξεταζόμενη multicast ομάδα, λαμβάνονται από το UE1.

7.3.3 Αποδοτικότητα στη Διεπαφή Iur

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστεί ένα πείραμα εξομοίωσης το οποίο θα παρουσιάσει τη βελτίωση της απόδοσης που προσφέρει ο προτεινόμενος μηχανισμός λόγω της εισαγωγής της multicast μετάδοσης δεδομένων πάνω από τη διεπαφή Iur. Στο πείραμα αυτό πολλαπλά inter-RNS handovers λαμβάνουν χώρα από τον ίδιο αρχικό RNC προς τον ίδιο τελικό RNC. Για το σκοπό αυτό θεωρούμε την τοπολογία δικτύου που έχει εξεταστεί στις προηγούμενες περιπτώσεις και υποθέτουμε ότι η παροχή υπηρεσίας MBMS βρίσκεται στη φάση Data Transfer. Εστιάζουμε σε τέσσερα από τους UEs που βρίσκονται στο RNS που ελέγχεται από τον RNC1 (έστω ότι είναι οι UE1, UE2, UE3 και UE4). Αυτοί οι UEs είναι μέλη της multicast ομάδας στην οποία απευθύνεται η εισερχόμενη κίνηση video. Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, κάθε ένας από τους τέσσερις εξεταζόμενους UEs εκτελούν ένα inter-RNS handover προς κελιά που ελέγχονται από τον RNC2 (Εικόνα 56). Τα handovers λαμβάνουν χώρα τις χρονικές στιγμές είκοσι, σαράντα, εξήντα και ογδόντα δευτερολέπτων εξομοίωσης και δεν ακολουθούνται από διαδικασίες SRNS relocation. Η εξομοίωση έχει συνολική διάρκεια εκατό δευτερολέπτων.

Η Εικόνα 56 παρουσιάζει σχηματικά το εξεταζόμενο σενάριο κινητικότητας χρηστών. Οι μετακινήσεις των UEs απεικονίζονται με διακεκομμένες καμπύλες γραμμές.

Εικόνα 56. Πολλαπλά inter-RNS handovers από RNC1 προς RNC2.

Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης υπολογίζεται το throughput στη διεπαφή Iur που διασυνδέει τον κόμβο RNC1 με τον RNC2. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λαμβάνονται όταν στην τοπολογία του δικτύου UMTS που εξετάζουμε, χρησιμοποιηθούν πολλαπλές unicast μεταδόσεις. Η Εικόνα 57 απεικονίζει γραφικά τη σύγκριση των δύο τεχνικών (multicast και unicast μεταδόσεων).

Όπως φαίνεται από τη γραφική απεικόνιση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 57, ο μηχανισμός που προτείνεται στην εργασία αυτή, χρησιμοποιεί με αποδοτικό τρόπο τη διεπαφή Iur. Στην πραγματικότητα, το throughput παραμένει σταθερό χωρίς να εξαρτάται από το πλήθος των UEs που έχουν εκτελέσει handover. Από την άλλη πλευρά όταν η μετάδοση γίνεται με χρήση επιμέρους unicast μεταδόσεων, κάθε handover συνεισφέρει προσθετικά στο φόρτο της διεπαφής Iur. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του φόρτου της διεπαφής Iur καθώς αυξάνεται ο αριθμός των handovers που εκτελέστηκαν. Επιπλέον, αν λάβουμε υπόψη ότι σε ένα πραγματικό PLMN τα τρέχοντα handovers είναι πολύ περισσότερα από αυτά που εξομοιώθηκαν, είναι φανερό ότι, με τη χρήση πολλαπλών unicast μεταδόσεων, η διεπαφή Iur καθίσταται δυνητικό σημείο συμφόρησης (bottleneck) για τη μετάδοση δεδομένων.

Εικόνα 57. Το throughput στη διεπαφή Iur.

7.3.4 Μετάδοση Δεδομένων στο UTRAN

Ένα άλλο σημείο που διερευνήθηκε μέσω της διαδικασίας εξομοίωσης ήταν η συμπεριφορά των διαφόρων τύπων καναλιών μεταφοράς του UTRAN. Για την

ακρίβεια, προκειμένου να γίνει η μετάδοση των multicast δεδομένων στις διεπαφές Iub και Uu του UTRAN, εξομοιώθηκαν τρεις τύποι καναλιών μεταφοράς. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το κανάλι FACH, HS-DSCH καθώς και το DCH. Για κάθε ένα από τα κανάλια αυτά, μετρήθηκε το throughput του συνδέσμου που συνδέει τον κόμβο RNC1 και τον Node B1 (Εικόνα 51). Όσον αφορά τη μεταδιδόμενη πληροφορία, πρόκειται για την ίδια κίνηση video, ρυθμού μετάδοσης 64 Kbps που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα πειράματα. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πείραμα διήρκεσε 100 δευτερόλεπτα για κάθε κανάλι. Η Εικόνα 58 απεικονίζει γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα τρία κανάλια.

Εικόνα 58. Το throughput στο σύνδεσμο RNC1-Node B1 για κάθε κανάλι.

Όπως είναι αναμενόμενο, στην περίπτωση που το χρησιμοποιούμενο κανάλι μεταφοράς είναι το FACH, κάθε multicast πακέτο μεταδίδεται μία μόνο φορά από τη διεπαφή Iub. Στη συνέχεια, το πακέτο μεταδίδεται προς όλους τους χρήστες που ανήκουν στη συγκεκριμένη multicast ομάδα και εξυπηρετούνται από τον αντίστοιχο Node B. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το throughput στη διεπαφή Iub να είναι σταθερό, ανεξάρτητα από τους multicast χρήστες που βρίσκονται στα κελιά. Κατά συνέπεια, το throughput στην εξεταζόμενη διεπαφή Iub κυμαίνεται στα 64 Kbps. Από την άλλη πλευρά, κατά τη χρήση των καναλιών HS-DSCH οι πόροι διαμοιράζονται μεταξύ των χρηστών με χρήση πολυπλεξίας χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε χρήστη υπάρχει μία ξεχωριστή χρονοσχισμή που μπορεί να χρησιμοποιεί για να λαμβάνει multicast δεδομένα. Επομένως, το πλήθος των διαφορετικών χρονοσχισμών που απαιτούνται για τη multicast μετάδοση δεδομένων είναι ίσο με το πλήθος των multicast χρηστών που εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο Node B. Κατά συνέπεια, επειδή οι χρήστες που εξυπηρετούνται από τον Node B1 είναι δύο (UE1 και UE2 στην Εικόνα 51) το throughput στην εξεταζόμενη διεπαφή Iub είναι περίπου διπλάσιο από το ρυθμό μετάδοσης του video. Άρα συγκριτικά με το throughput που προκύπτει κατά τη χρήση καναλιών FACH, το throughput στα κανάλια HS-DSCH είναι περίπου διπλάσιο. Τέλος, για την περίπτωση της μετάδοσης των multicast δεδομένων μέσω της χρήσης καναλιών DCHs, τα αποτελέσματα όσον αφορά το throughput είναι παρόμοια με

αυτά των καναλιών HS-DSCH. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη χρήση των DCH κάθε πακέτο μεταδίδεται ξεχωριστά σε κάθε UE που ανήκει στη multicast ομάδα. Κατά συνέπεια, και σε αυτή την περίπτωση το throughput που προκύπτει είναι περίπου διπλάσιο από το αντίστοιχο throughput κατά τη χρήση των καναλιών FACH.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τη σημαντική βελτίωση στο throughput που προσφέρουν τα κανάλια FACH, τα κανάλια αυτά δεν αποτελούν πάντα την ενδεικνυόμενη λύση στο ζήτημα της επιλογής του καναλιού μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, τον έλεγχο ισχύος, την κατανομή των χρηστών στα κελιά καθώς και την κινητικότητα των χρηστών.

7.3.5 Πολυπλοκότητα Μηνυμάτων

Τέλος, ένα σημαντικό θέμα που δε θα πρέπει να παραβλεφθεί είναι πώς η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων κλιμακώνεται σε συνάρτηση με τον αριθμό των κινητών εξοπλισμών UE. Με αυτό το σκοπό, θεωρήθηκε μία μόνο multicast ομάδα και υπολογίστηκε η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων για διάφορα πλήθη από μέλη των multicast ομάδων. Το πλήθος των μελών της multicast ομάδας μεταβλήθηκε από 1 έως 100 κινητούς εξοπλισμούς UE. Σε αυτό το πείραμα οι τυπικές πιθανότητες για την εκτέλεση των handover και των διαδικασιών SRNS relocation βασίστηκαν σε αυτές που παρουσιάζονται στην αναφορά [87]. Επιπλέον, για λόγους απλότητας, η επιβάρυνση στην πολυπλοκότητα για κάθε μήνυμα θεωρείται ότι είναι πάντα το ίδιο και δεν εξαρτάται από τον κόμβο αφετηρίας ή προορισμού. Το πείραμα εκτελείται δύο φορές. Στη πρώτη εκτέλεση του πειράματος, οι κινητοί εξοπλισμοί συμμετέχουν στη multicast ομάδα, ενώ στη δεύτερη οι παράμετροι του δικτύου είναι ακριβώς οι ίδιες αλλά χωρίς να υπάρχει συμμετοχή σε κάποια multicast ομάδα. Κατά τη διάρκεια της κάθε εκτέλεσης του πειράματος μετρήθηκε η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων που σχετίζεται με τους εξεταζόμενους κινητούς εξοπλισμούς UE.

Εικόνα 59. Επιβάρυνση στην πολυπλοκότητα των μηνυμάτων ελέγχου.

Η Εικόνα 59 δίνει μία εικόνα του λόγου της πολυπλοκότητας των μηνυμάτων για την εκτέλεση του πειράματος κατά την οποία δεν υπάρχει συμμετοχή σε multicast ομάδες. Ο λόγος προκύπτει με κανονικοποίηση της πολυπλοκότητας αυτής με την πολυπλοκότητα που προκύπτει όταν κανένα από τους κινητούς εξοπλισμούς δεν

συμμετέχει σε multicast ομάδα. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει το πλήθος των κινητών εξοπλισμών που συμμετέχουν στη multicast ομάδα. Ο κάθετος άξονας δείχνει την αθροισμένη πολυπλοκότητα των μηνυμάτων που έχει κανονικοποιηθεί με την αντίστοιχη πολυπλοκότητα που προκύπτει όταν δε χρησιμοποιείται multicast μετάδοση δεδομένων.

Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 59 επιβεβαιώνουν τη μικρή επιβάρυνση που προστίθεται στην τυπική πολυπλοκότητα των μηνυμάτων κατά τη unicast μετάδοση. Αυτό που είναι ακόμα πιο σημαντικό και αποδεικνύει την επεκτασιμότητα του προτεινόμενου μηχανισμού είναι ότι όταν ο αριθμός των μελών της multicast ομάδας αυξάνει, η επιβάρυνση στην πολυπλοκότητα των μηνυμάτων δεν προκύπτει να επηρεάζεται από τον αριθμό των κινητών εξοπλισμών UE και μάλιστα τείνει να προσεγγίσει μια τιμή μεταξύ 12 και 13%.

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονιστεί ότι παρόμοια πειράματα τα οποία περιλαμβάνουν περισσότερες multicast ομάδες έχουν διεξαχθεί. Για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση από το αποτέλεσμα που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό είναι αναμενόμενο και αυτό διότι η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων δεν εξαρτάται από τον αριθμό των multicast ομάδων που έχουν οριστεί στο εξεταζόμενο κινητό δίκτυο επικοινωνιών.

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στον παρόν κεφάλαιο προτάθηκε και μελετήθηκε ένας μηχανισμός για την εισαγωγή της multicast μετάδοσης δεδομένων σε κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς και πιο συγκεκριμένα στο σύστημα UMTS. Για την ακρίβεια, προτάθηκε η χρήση των Routing Lists σε κάθε κόμβο του δικτύου εκτός των UEs, όπως επίσης η χρήση επιπλέον λιστών, των Drift Routing Lists, στους κόμβους RNC. Όσον αφορά στις RLs αυτές καταγράφουν τους κόμβους του αμέσως κατώτερου επιπέδου του δικτύου στους οποίους πρέπει να προωθηθούν τα πακέτα πληροφορίας που απευθύνονται σε μία multicast ομάδα. Επιπρόσθετα, οι DRLs περιέχουν πληροφορία σχετικά με τα inter-RNS handovers που έχουν εκτελεστεί και η επεξεργασία τους διευκολύνει στη multicast μετάδοση δεδομένων μεταξύ των RNCs μέσω της διεπαφής Iur.

Ο συνολικός μηχανισμός που προτείνεται, υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή δικτύων ns-2 και αξιολογήθηκε μέσω πειραμάτων. Τα πειράματα εξομοίωσης εστιάστηκαν στην φάση Data Transfer της παροχής υπηρεσίας MBMS και έγιναν προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα και η αποδοτικότητα του μηχανισμού. Για την ακρίβεια, διερευνήθηκαν με πληρότητα οι λειτουργίες του μηχανισμού, καθώς αυτός υποβλήθηκε σε πειράματα που αντιστοιχούν στις διάφορες πιθανές συνθήκες στις οποίες μπορεί να περιέλθει το δίκτυο. Τέλος, τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά.

Όσον αφορά στο σκέλος του μηχανισμού για τη multicast μετάδοση πακέτων, ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητά του πάνω από διάφορους συνδέσμους. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα, η χρήση των RLs οδηγεί στη εφαρμογή ενός μηχανισμού δρομολόγησης με τον οποίο παρουσιάζεται μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων και αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου UMTS. Μάλιστα, η βελτίωση της απόδοσης διευρύνεται με την αύξηση του πλήθους των τελικών παραληπτών της multicast κίνησης.

Επιπλέον, εξομοιώθηκαν τα πιθανά σενάρια κινητικότητας χρηστών που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Στην περίπτωση αυτή,

εξετάστηκε το κατά πόσο ο προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να υποστηρίξει τα διάφορα σενάρια κινητικότητας, καθώς και αν ευσταθεί υπό αυτές τις συνθήκες. Εξετάστηκαν τα δύο σενάρια handover που έχουν επίδραση στις RLS και στις DRLs (πρόκειται για inter-RNS / intra-SGSN και inter-RNS / inter-SGSN) καθώς και οι αντίστοιχες διαδικασίες SRNS relocation. Η εξομοίωση απέδειξε την ορθότητα του μηχανισμού καθώς από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι, σε κάθε περίπτωση, η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας είναι εξασφαλισμένη.

Επιπλέον, τα πειράματα εξομοίωσης διερεύνησαν τη μετάδοση δεδομένων μέσω της διεπαφής Iur. Ο προτεινόμενος μηχανισμός εισάγει τη multicast τεχνική και σε αυτόν τον τύπο διεπαφής, μέσω της χρήσης των DRLs. Τα αποτελέσματα για αυτή την περίπτωση είναι ανάλογα με του συνολικού μηχανισμού. Για την περίπτωση αυτή η βελτίωση της απόδοσης εντείνεται με την αύξηση του πλήθους των inter-RNS handovers. Η σημασία αυτής της βελτίωσης είναι μεγάλη διότι η Iur διεπαφή είναι ένα δυνητικό σημείο συμφόρησης όταν πολλαπλά inter-RNS handovers έχουν λάβει χώρα. Με τον περιορισμό του φόρτου πάνω σε αυτού του είδους των συνδέσμων το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει περισσότερα handovers χωρίς να υπάρχει ανάγκη για εκτέλεση της SRNS relocation διαδικασίας.

Ένα άλλο σημείο που διερευνήθηκε μέσω της διαδικασίας εξομοίωσης ήταν η συμπεριφορά των διαφόρων τύπων καναλιών μεταφοράς του UTRAN. Προκειμένου να γίνει η μετάδοση των multicast δεδομένων στις διεπαφές Iub και Uu του UTRAN, εξομοιώθηκαν τρεις τύποι καναλιών μεταφοράς. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα κανάλια FACH, HS-DSCH καθώς και το DCH. Για κάθε ένα από τα κανάλια αυτά, μετρήθηκε το throughput του συνδέσμου που συνδέει τον κόμβο RNC και τον Node B και επιβεβαιώθηκε ότι το κοινό κανάλι FACH προσφέρει σημαντική βελτίωση στην κατανάλωση throughput σε σχέση με τα κανάλια DCH και HS-DSCH. Παρόλα αυτά τα κανάλια FACH δεν αποτελούν πάντα την ενδεικνυόμενη λύση στο ζήτημα της επιλογής καναλιού μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, τον έλεγχο ισχύος, την κατανομή των χρηστών στα κελιά καθώς και την κινητικότητα των χρηστών.

Επίσης, ένα άλλο σημείο που επιβεβαιώθηκε πειραματικά είναι ότι ο υπάρχων μηχανισμός προσθέτει μία μικρή επιβάρυνση στην τυπική πολυπλοκότητα των μηνυμάτων χωρίς να επηρεάζεται η επεκτασιμότητα. Αυτό διότι η επιβάρυνση δεν εξαρτάται από τον αριθμό των κινητών εξοπλισμών.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί η απλότητα στην ενσωμάτωση του μηχανισμού στους υπάρχοντες μηχανισμούς λειτουργίας και διαχείρισης της κινητικότητας που υπάρχουν στα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Όπως φάνηκε από την περιγραφή του μηχανισμού, ο μηχανισμός βασίζεται στην υποδομή του UMTS. Οι πρόσθετες λειτουργίες που απαιτούνται είναι πολύ μικρές και εύκολα υλοποιήσιμες. Αυτό άλλωστε φάνηκε και από την εύκολη ενσωμάτωση του μηχανισμού στο σύστημα εξομοίωσης του ns-2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ

Έλεγχος συμφόρησης είναι ένας τρόπος διαχείρισης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, ο οποίος κάνει προσαρμογή του ρυθμού σύμφωνα με τις συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Στην ιεραρχία πρωτοκόλλων για το IP multicast, το πρωτόκολλο UDP χρησιμοποιείται για το επίπεδο μεταφοράς. Αυτό το πρωτόκολλο δεν υλοποιεί κανένα έλεγχο συμφόρησης. Αντίθετα, το πρωτόκολλο TCP προσαρμόζει το δικό του ρυθμό μετάδοσης σύμφωνα με τις συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Είναι προφανές ότι η συνύπαρξη multicast κίνησης δεδομένων ταυτόχρονα με κίνηση TCP μπορεί να οδηγήσει σε άδικη χρήση των πόρων του δικτύου. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις, η εφαρμογή ελέγχου συμφόρησης και για τη multicast μετάδοση δεδομένων είναι μονόδρομος. Αυτή η πολιτική ελέγχου συμφόρησης είναι γνωστή ως φιλικότητα προς το TCP (TCP-friendliness) [97].

Η υιοθέτηση ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα θέτει ένα πρόσθετο σύνολο από προκλήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι όλοι οι αλγόριθμοι ελέγχου συμφόρησης αντιμετωπίζουν τις απώλειες πακέτων σε μία προφανή εκδήλωση συμφόρησης του δικτύου. Όμως αυτή η υπόθεση δεν είναι πάντα ο κανόνας σε δίκτυα με ασύρματους συνδέσμους. Στους ασύρματους συνδέσμους οι απώλειες πακέτων πολλές φορές οφείλονται σε λόγους που δε σχετίζονται με συμφόρηση του δικτύου. Τέτοιοι λόγοι είναι ο θόρυβος ή κάποιο σφάλμα στον ασύρματο σύνδεσμο. Προφανώς, σε τέτοιες περιπτώσεις η δραστική μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν αποτελεί λύση [54]. Ένα άλλο περιοριστικό στοιχείο είναι η υπολογιστική ισχύς των κινητών τερματικών συσκευών. Οι συσκευές αυτές δεν μπορούν να εκτελέσουν πολύπλοκες στατιστικές μετρήσεις και παρακολούθηση της κίνησης. Κατά συνέπεια, αυτού του είδους οι διαδικασίες δεν πρέπει να εκτελούνται στις συσκευές αυτές.

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής, το οποίο σχετίζεται με τον έλεγχο συμφόρησης, μελετάται η εφαρμογή δύο ήδη γνωστών μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης πάνω σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί είναι ο TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC) και ο Pragmatic General Multicast Congestion Control (PGMCC). Οι δύο αυτοί μηχανισμοί ανήκουν στην ομάδα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού οι οποίοι αναπόφευκτα δεν προσφέρουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως κάνουν οι πολύ-επίπεδοι μηχανισμοί. Παρόλα αυτά είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν μία θεμελιώδη απαίτηση για τη multicast μετάδοση σε UMTS δίκτυα που είναι η επεκτασιμότητα για τις εφαρμογές που απευθύνονται σε χιλιάδες χρήστες [39], [42] και [43].

Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία στο κεφάλαιο αυτό είναι ο χειρισμός της υποβάθμισης των ασύρματων καναλιών στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης UTRAN. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί δυσλειτουργίες στους υπάρχοντες μηχανισμούς TFMCC και PGMCC. Η καινοτομία που εισάγεται προκύπτει από το γεγονός ότι οι αρχικοί μηχανισμοί TFMCC και PGMCC τροποποιούνται μερικώς και επεκτείνονται προκειμένου να υποστηρίξουν τις ιδιαιτερότητες του ασύρματου δικτύου πρόσβασης UTRAN. Οι προτάσεις που τίθενται εισάγουν ελάχιστες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική του συστήματος κινητών δικτύων UMTS. Επίσης, αποφεύγεται η εκτέλεση πολύπλοκων λειτουργιών, όπως οι στατιστικές μετρήσεις ή η παρακολούθηση της κίνησης, στον κινητό εξοπλισμό. Τέλος, πολύ σημαντικό είναι το

γεγονός ότι αξιολογείται η απόδοση των τροποποιημένων μηχανισμών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω σύγκρισης του ενός μηχανισμού με τον άλλο.

Η δομή του παρόντος κεφαλαίου έχει ως εξής: στο Υποκεφάλαιο 8.1 περιγράφονται οι μηχανισμοί TFMCC και PGMCC οι οποίοι είναι οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων. Στο Υποκεφάλαιο 8.2 παρουσιάζεται το πρόβλημα της υποβάθμισης τους ασύρματου καναλιού το οποίο κάνει αδύνατη την άμεση εφαρμογή των παραπάνω μηχανισμών στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Το Υποκεφάλαιο 8.3 είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση των τροποποιήσεων που εισάγονται στους υπάρχοντες μηχανισμούς TFMCC και PGMCC προκειμένου να ανταποκριθούν στις ιδιαιτερότητες των κινητών δικτύων. Το Υποκεφάλαιο 8.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης. Τέλος, κάποιες παρατηρήσεις και συμπεράσματα παρουσιάζονται στο Υποκεφάλαιο 8.5.

8.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ MULTICAST ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Οι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων που μελετούνται είναι ο TFMCC και ο PGMCC. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των μηχανισμών είναι η απλότητα και η επεκτασιμότητα [67]. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι δύο αυτοί μηχανισμοί και αναλύεται η λειτουργία τους.

8.1.1 TFMCC

Ο TFMCC είναι ένας πολύ γνωστός μηχανισμός για τον έλεγχο συμφόρησης στη multicast μετάδοση δεδομένων και ο οποίος είναι βασισμένος σε εξίσωση (equation-based). Η λογική του μηχανισμού έχει προκύψει από το πρωτόκολλο TCP-Friendly Rate Control (TFRC) το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στη unicast μετάδοση δεδομένων πάνω από πρωτόκολλο UDP [53]. Προκειμένου να εξασφαλιστεί δικαιοσύνη ως προς τις ανταγωνιστικές ροές του πρωτοκόλλου TCP, οι αποδέκτες που χρησιμοποιούν το μηχανισμό TFMCC μετρούν τις επικρατούσες συνθήκες του δικτύου. Κάθε αποδέκτης κάνει τις δικές του μετρήσεις και υπολογίζει τον TCP-friendly ρυθμό μετάδοσης για το μονοπάτι από τον αποστολέα προς αυτόν. Ο υπολογισμός του ρυθμού βασίζεται στη χρήση μίας υπάρχουσας εξίσωσης για που προσδιορίζει το throughput του πρωτοκόλλου TCP. Η εξίσωση αυτή ορίζει το ρυθμό μετάδοσης για το πρωτόκολλο TCP σε συνάρτηση του ρυθμού απώλειας πακέτων, του RTT και του μεγέθους πακέτου. Ο ρυθμός μετάδοσης για τη multicast μετάδοση δεδομένων προσαρμόζεται στον αποδέκτη που αντιμετωπίζει τις χειρότερες συνθήκες μέσα στο δίκτυο. Για την ακρίβεια ο μηχανισμός TFMCC λειτουργεί ως εξής:

- Κάθε αποδέκτης το δικό του ρυθμό απώλειας πακέτων καθώς και το χρόνο RTT προς τον αποστολέα.
- Στη συνέχεια, κάθε αποδέκτης χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία και με την εξίσωση για το throughput του TCP εξάγει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ο οποίος είναι TCP-friendly.
- Μέσω ενός κατανεμημένου μηχανισμού ο οποίος περιορίζει τις ανατροφοδοτήσεις, η αποστολή των ανατροφοδοτήσεων επιτρέπεται σε ένα μόνο υποσύνολο της ομάδας των αποδεκτών. Με αυτό τον τρόπο καταστέλλεται το φαινόμενο του καταιγισμού ανατροφοδοτήσεων στον αποστολέα.

- Οι αποδέκτες των οποίων η αποστολή ανατροφοδότησης δεν περιορίζεται, αναφέρουν το ρυθμό μετάδοσης που υπολόγισαν στον αποστολέα μέσω των επονομαζόμενων αναφορών αποδέκτη. Οι αναφορές αποδέκτη εξυπηρετούν δύο σκοπούς: αφενός να ειδοποιούν τον αποστολέα για τον κατάλληλο ρυθμό μετάδοσης και αφετέρου να επιτρέπουν στους αποδέκτες τον υπολογισμό του RTT.
- Ο αποστολέας επιλέγει τον αποδέκτη που αναφέρει το χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης ως τον τρέχοντα περιοριστικό αποδέκτη (Current Limiting Receiver – CLR). Οποτεδήποτε μία ανατροφοδότηση με ένα ακόμα χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης φθάσει τον αποστολέα, ο αντίστοιχος αποδέκτης γίνεται ο CLR και ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται ώστε να συμπίσει με το ρυθμό που υπολόγισε ο αποδέκτης αυτός. Ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται όταν ο CLR αναφέρει τον υπολογισμό ενός ρυθμού μετάδοσης μεγαλύτερο από τον τρέχοντα ρυθμό μετάδοσης.

Για το μηχανισμό TFMCC θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε εξίσωση η οποία συσχετίζει με ρεαλιστικό τρόπο το throughput του TCP με το ρυθμό απώλειας πακέτων και τον RTT. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση αυτή θα πρέπει πάντα να αντανakλά τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου TCP όσον αφορά στο χρονικό όριο για την αναμετάδοση πακέτου. Αυτό διότι η συμπεριφορά αυτή καθορίζει το throughput του TCP όταν ο ρυθμός απώλειας είναι μεγάλος. Η εξίσωση που δίνει το throughput και η οποία συστήνεται για χρήση στο μηχανισμό TFMCC είναι μία ελαφρώς απλοποιημένη εκδοχή της εξίσωσης του throughput για το πρωτόκολλο Reno TCP. Η εξίσωση αυτή δίνεται και αναλύεται στην αναφορά [76] και είναι η εξής:

$$T_{TCP} = \frac{8s}{t_{RTT} \left(\sqrt{\frac{2p}{3}} + \left(12\sqrt{\frac{3p}{8}} \right) p(1 + 32p^2) \right)}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το αναμενόμενο throughput T_{TCP} είναι ο ρυθμός μετάδοσης εκφρασμένος σε bits/second.

Το αναμενόμενο throughput T_{TCP} μιας ροής δεδομένων του πρωτοκόλλου TCP υπολογίζεται ως συνάρτηση του ρυθμού απώλειας πακέτων p για τη σταθερή κατάσταση (steady state), του χρόνου RTT t_{RTT} και του μεγέθους πακέτου s . Κάθε αποδέκτης που εφαρμόζει το μηχανισμό TFMCC μετρά το δικό του ρυθμό απώλειας πακέτων και εκτιμά το δικό του RTT προς τον αποστολέα. Στη συνέχεια χρησιμοποιεί την παραπάνω εξίσωση προκειμένου να υπολογίσει το T_{TCP} . Ο υπολογισμός αυτός αποτελεί μία εκτίμηση του throughput μιας ροής δεδομένων του πρωτοκόλλου TCP που θα εφαρμοζόταν στο μονοπάτι του δικτύου από τον αποστολέα προς τον ίδιο αποδέκτη κάτω από τις ίδιες συνθήκες δικτύου. Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στο μηχανισμό TFMCC, ο αναγνώστης θα μπορούσε να παραπεμφθεί στις δημοσιεύσεις που παρουσιάζονται στις αναφορές [99] και [101].

8.1.2 PGMCC

Ο PGMCC αποτελεί ένα μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού ο οποίος έχει τα χαρακτηριστικά ενός TCP-friendly μηχανισμού. Έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του πρωτοκόλλου Pragmatic General Multicast (PGM) [92]. Ένα από τα προτερήματα του μηχανισμού αυτού είναι η γρήγορη απόκριση σε αλλαγές που

λαμβάνουν χώρα στις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί εξίσου αποτελεσματικά σε αξιόπιστες και μη μεταφορές δεδομένων. Γενικότερα, οι αναφορές των αποδεκτών είναι το θεμελιώδες στοιχείο του μηχανισμού αυτού. Οι αναφορές αυτές στέλνονται πίσω στον αποστολέα σαν αρνητικές επιβεβαιώσεις (Negative Acknowledgement – NAK) ή θετικές επιβεβαιώσεις ACK. Ο αποστολέας με της σειρά του προσαρμόζει το ρυθμό μετάδοσης με βάση τις αναφορές αυτές. Όσον αφορά στις αρνητικές επιβεβαιώσεις, τα πεδία που τις συνθέτουν είναι τα εξής:

- Η ταυτότητα του αποδέκτη (`recv_id`).
- Ο ρυθμός απώλειας πακέτων που έχει μετρηθεί τοπικά στον αποδέκτη (`recv_loss`).
- Ο μεγαλύτερος σειριακός αριθμός πακέτου που έχει ληφθεί (`recv_lastseq`).

Επιπλέον, ο αποδέκτης που μπορεί να λαμβάνει δεδομένα με το χειρότερο throughput επιλέγεται να έχει το ρόλο του επιβεβαιωτή (`acker`). Ο `acker` είναι ο αποδέκτης που αναλαμβάνει την υποχρέωση να στέλνει θετικές επιβεβαιώσεις ACK στον αποστολέα. Η ταυτότητα του `acker` μεταφέρεται ως πεδίο σε κάθε πακέτο δεδομένων. Οι θετικές επιβεβαιώσεις περιέχουν τα ίδια ακριβώς πεδία με τις αρνητικές επιβεβαιώσεις καθώς και δύο επιπλέον πεδία. Τα επιπλέον πεδία είναι τα εξής:

- Το σειριακό αριθμό του πακέτου δεδομένων το οποίο προκάλεσε την αποστολή της επιβεβαίωσης (`ack_seq`),
- Ένα πίνακα bitmap μεγέθους 32-bit ο οποίος δείχνει την κατάσταση σχετικά με τη λήψη των 32 τελευταίων πακέτων (`bitmask`).

Κάθε αποδέκτης υπολογίζει το δικό του ρυθμό απώλειας πακέτων. Η εκτίμηση του κάθε αποδέκτη για ρυθμό απώλειας πακέτων (`recv_loss`) στέλνεται πίσω στον αποστολέα της multicast μετάδοσης μέσω των αρνητικών και των θετικών επιβεβαιώσεων. Προκείμενου να υπολογίσει το δικό του ρυθμό απώλειας πακέτων, κάθε αποδέκτης μεταφράζει την άφιξη ενός πακέτου σαν ένα διακριτό σήμα. Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε ένα χαμένο πακέτο, ενώ η τιμή 0 σε ένα πακέτο που έχει ληφθεί επιτυχώς. Το σήμα που προκύπτει περνά από ένα γραμμικό φίλτρο διακριτού χρόνου προκειμένου να δώσει το ζητούμενο ρυθμό απώλειας πακέτων. Για το φίλτρο αυτό η απόκριση και τα υπολογιστικά κόστη επιλέγονται κατάλληλα. Τέλος, ο αποστολέας ρυθμίζει το ρυθμό μετάδοσης με βάση το χειρότερο throughput που έχει λάβει.

Οι βασικοί στόχοι του PGMCC είναι η επίτευξη της TCP-friendliness και η επεκτασιμότητα. Η επεκτασιμότητα επιτυγχάνεται με την αποκέντρωση της λειτουργικότητας όσο το δυνατόν περισσότερο. Η υιοθέτηση του περιορισμού των αρνητικών επιβεβαιώσεων και η επιλογή ενός μόνο κόμβου ως αυτού που θα έχει την υποχρέωση να στέλνει θετικές επιβεβαιώσεις είναι λύσεις που απαιτούν ένα σταθερό υπολογιστικό κόστος στους κόμβους, ανεξάρτητα από το μέγεθος της multicast ομάδας.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του μηχανισμού αυτού είναι η γρήγορη απόκριση σε αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή της έννοιας της θετικής επιβεβαίωσης από τον `acker`, αντί για την ύπαρξη αποκλειστικά και μόνο αρνητικών επιβεβαιώσεων κάτι που προτείνουν άλλοι σχετικοί μηχανισμοί. Η υιοθέτηση της χρήσης θετικών επιβεβαιώσεων επιτρέπει μία πιο γρήγορη διασπορά της πληροφόρησης. Για περισσότερες πληροφορίες πάνω στο μηχανισμό PGMCC, ο αναγνώστης θα μπορούσε να παραπεμφθεί στη δημοσίευση της αναφοράς [84].

8.2 ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

Οι μηχανισμοί ελέγχου συμφοράρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε σταθερά δίκτυα δεδομένων χειρίζονται τις απώλειες πακέτων σαν μία εκδήλωση της συμφοράρησης μέσα στο δίκτυο. Αυτοί οι υπάρχοντες μηχανισμοί μεταφράζουν μία απώλεια πακέτου ως απόρριψη πακέτου που προκλήθηκε από υπερχειλίση ενός buffer σε ένα κόμβο του δικτύου. Επομένως, η αντίδραση του δικτύου στο φαινόμενο της απώλειας πακέτων είναι μία δραστική μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων στον αποστολέα. Ο απώτερος σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του δικτύου προκειμένου να αποφευχθούν οι περιπτώσεις υπερχειλίσης των buffers και αναμετάδοσης πακέτων.

Ένα σενάριο σαν αυτό που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να συμβεί και σε ένα κινητό δίκτυο επικοινωνιών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 60(a), μία απόρριψη πακέτου μπορεί να συμβεί εξαιτίας μίας υπερχειλίσης που συμβαίνει σε ένα buffer του ενσύρματου τμήματος του δικτύου. Ο κινητός εξοπλισμός UE αντιλαμβάνεται αυτή την απόρριψη πακέτου σαν απώλεια πακέτου και το μέτρο που θα πρέπει να ληφθεί από τον multicast εξυπηρετητή προκειμένου να επιλυθεί αυτή η κατάσταση είναι η μείωση του ρυθμού με τον οποίο μεταδίδει.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των υπάρχοντων μηχανισμών ελέγχου συμφοράρησης για multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών αντιμετωπίζει ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα. Στα κινητά δίκτυα υπάρχει η περίπτωση μία απώλεια πακέτου να μη σημαίνει συμφοράρηση του δικτύου. Με άλλα λόγια, η ποιότητα του ασύρματου καναλιού μπορεί να υποβαθμιστεί εξαιτίας λόγων που δε σχετίζονται με τη συμφοράρηση του δικτύου. Τέτοιοι λόγοι είναι ο θόρυβος ή η εξασθένηση του σήματος. Κατά τη διάρκεια μίας περιόδου υποβάθμισης, ο ρυθμός λαθών ανά bit (bit error rate) στον ασύρματο σύνδεσμο μπορεί να γίνει προσωρινά πολύ υψηλός. Παρόλα αυτά, υπό φυσιολογικές συνθήκες και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, ο ασύρματος σύνδεσμος αναμένεται να ανακάμψει. Σε αυτή τη φάση, οι απώλειες πακέτων δεν εξαρτώνται από το ρυθμό άφιξης πακέτων αλλά από τη διάρκεια της υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού. Μετά το τέλος της περιόδου εξασθένησης, το πρόβλημα με τις απώλειες πακέτων θα πάψει να υφίσταται χωρίς να υπάρχει καμία ανάγκη για μείωση του ρυθμού multicast μετάδοσης. Αν οι απώλειες πακέτων προκαλούνται από υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού, η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δε θα επηρεάσει το ρυθμό απόρριψης πακέτων. Η Εικόνα 60(b) δίνει μία περιγραφή της περίπτωσης όπου μία απώλεια πακέτου συμβαίνει εξαιτίας προσωρινής υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού.

Η υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση των υπάρχοντων μηχανισμών ελέγχου συμφοράρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων. Αν ένας κινητός εξοπλισμός UE αντιμετωπίζει εξασθένηση του λαμβανόμενου σήματος τότε ο ρυθμός απώλειας πακέτων για αυτόν τον UE θα αυξηθεί προσωρινά. Αυτή η αύξηση του ρυθμού απώλειας πακέτων είναι πιθανό να οδηγήσει στην επιλογή του συγκεκριμένου UE ως αντιπροσώπου. Το επόμενο βήμα είναι η μείωση του ρυθμού μετάδοσης του αποστολέα σύμφωνα με τον αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης που υπολογίστηκε στον εξεταζόμενο UE. Το πρόβλημα είναι ότι αυτή η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεν είναι απαραίτητη επειδή η αιτία που προκάλεσε τις απώλειες πακέτων σχετίζεται με την ασύρματη διεπαφή και όχι με το ίδιο το δίκτυο. Όταν ο UE ανακάμψει από τη φάση της υποβάθμισης της ποιότητας της ασύρματης διεπαφής, το αποδεκτό throughput του αντιπροσώπου θα αυξηθεί. Αν

θεωρηθεί ότι πολλοί UE συμμετέχουν στη multicast ομάδα, τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, ένας UE να αντιμετωπίζει εξασθένηση σήματος. Επομένως, σύντομα, ένας άλλος UE που αντιμετωπίζει εξασθένηση θα επιλεγεί σαν αντιπρόσωπος και θα προκαλέσει νέα μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Τελικά, η υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού θα προκαλέσει μία σημαντική και διαρκή υποβάθμιση της απόδοσης ολόκληρης της υπηρεσίας. Είναι προφανείς λοιπόν οι λόγοι που η αντίδραση του δικτύου στις απώλειες πακέτων εξαιτίας της υποβάθμισης του ασύρματου συνδέσμου δεν πρέπει να είναι μία δραστική μείωση του ρυθμού μετάδοσης στον αποστολέα.

Εικόνα 60. Απώλεια πακέτου που προκλήθηκε από: (α) συμφόρηση δικτύου, (β) προσωρινή υποβάθμιση ασύρματου καναλιού και (c) μόνιμη υποβάθμιση ασύρματου καναλιού.

Ένα άλλο πιθανό σενάριο σχετίζεται με την περίπτωση που, κάτω από κάποιες συνθήκες, μία μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού προσβάλλει ένα συγκεκριμένο UE. Όταν μία μόνιμη υποβάθμιση λάβει χώρα στον ασύρματο σύνδεσμο, ο buffer του κόμβου που βρίσκεται στα όρια του ενσύρματου δικτύου, δηλαδή του Node B, πιθανότατα θα υπερχειλίσει. Άμεση συνέπεια θα είναι η απόρριψη κάποιων multicast πακέτων δεδομένων. Επιπλέον, θα υπάρξουν αιτήσεις για αναμεταδόσεις των πακέτων που απορρίφθηκαν. Είναι προφανές ότι η σταθερή αδυναμία του UE να λάβει πακέτα επηρεάζει συνολικά την απόδοση ολόκληρης της multicast υπηρεσίας. Σε αυτή την περίπτωση ο UE που πάσχει από τη μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού θα πρέπει να αποτελέσει υποψήφιο για το ρόλο του τρέχοντος αντιπροσώπου. Η Εικόνα 60(c) δίνει μία αναπαράσταση της περίπτωσης αυτής.

8.3 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Προκειμένου οι μηχανισμοί TFMCC και PGMCC να προσαρμοστούν στις καταστάσεις που περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι αναγκαίο να εισαχθούν κάποιες τροποποιήσεις και βελτιώσεις στις υπάρχουσες τεχνικές. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η προσαρμογή των υαρχόντων μηχανισμών στις ιδιαιτερότητες των κινητών δικτύων επικοινωνιών. Ο σχεδιασμός των προτεινόμενων μηχανισμών ακολουθεί μία προσέγγιση πολύ σχετική με αυτή των αντίστοιχων

υπαρχόντων μηχανισμών. Νέα λειτουργικότητα έχει εισαχθεί σε κάποιους από τους κόμβους του δικτύου ασύρματης πρόσβασης UTRAN με στόχο την επιτυχή αντιμετώπιση των καταστάσεων που δημιουργούνται από την προσωρινή και τη μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού.

8.3.1 Εισαγωγή Νέου Πεδίου

Στους προτεινόμενους μηχανισμούς, οι κόμβοι που βρίσκονται στο όριο μεταξύ του ασύρματου και του ενσύρματου δικτύου, δηλαδή οι Node B, αποκτούν μία επιπλέον λειτουργία. Αυτή η λειτουργία είναι να παρέχουν στους αποδέκτες, δηλαδή τους κινητούς εξοπλισμούς UE, πληροφορία σχετικά με το ρυθμό απώλειας πακέτων που οι ίδιοι καταμετρούν. Κάθε UE ενημερώνεται από το Node B που τον εξυπηρετεί για το ρυθμό απώλειας πακέτων που ο Node B έχει καταμετρήσει. Αυτή η πληροφορία ενσωματώνεται στα πακέτα δεδομένων της multicast συνόδου. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος, ένα νέο πεδίο έχει εισαχθεί στα πακέτα δεδομένων των προτεινόμενων μηχανισμών. Αυτό το πεδίο μπορεί να είναι μία ποσότητα πληροφορίας μεγέθους 1-bit. Επομένως, ελάχιστες τροποποιήσεις χρειάζεται να εισαχθούν στις επικεφαλίδες των πακέτων δεδομένων. Από εδώ και στο εξής το νέο πεδίο θα αναφέρεται ως ένδειξη απώλειας πακέτου.

Από την άλλη πλευρά, οι δομές των αναφορών των αποδεκτών που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τον αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης διατηρούνται στην υπάρχουσα μορφή τους. Όμως ο τρόπος υπολογισμού του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης στους αποδέκτες έχει αλλάξει. Είναι γεγονός ότι ο τρόπος που ο αποδεκτός ρυθμός μετάδοσης υπολογίζεται μπορεί να εξαρτάται και από μία δυνητική υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου. Η υποβάθμιση αυτή μπορεί να είναι προσωρινή ή μόνιμη. Παρόλο που τα αποτελέσματα μίας προσωρινής υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού θα πρέπει να φιλτραριστούν από τους προτεινόμενους μηχανισμούς, οι επιπτώσεις της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου συνδέσμου δε θα πρέπει να αγνοηθούν.

8.3.2 Προσωρινή Υποβάθμιση Ασύρματου Καναλιού

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που εισήχθησαν στους υπάρχοντες μηχανισμούς TFMCC και PGMCC προκειμένου να χειριστούν με επιτυχία την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού. Με τον όρο προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού περιγράφεται κάθε κατάσταση η οποία προκαλεί αύξηση των απωλειών πακέτων στο ασύρματο κανάλι για μία σύντομη χρονική περίοδο. Ο βασικός στόχος των τροποποιημένων μηχανισμών είναι το φιλτράρισμα των απωλειών πακέτων που οφείλονται σε αυτή την κατάσταση. Όπως έχει ήδη επεξηγηθεί, ο λόγος είναι ότι αυτό το είδος απωλειών πακέτων δε σημαίνει συμφόρηση δικτύου και, κατά συνέπεια, δε χρειάζεται μείωση του ρυθμού μετάδοσης στον αποστολέα.

Στους υπάρχοντες μηχανισμούς, ο ρυθμός απώλειας πακέτων υπολογίζεται σε κάθε ένα από τους αποδέκτες. Αυτός ο ρυθμός απώλειας χρησιμοποιείται περαιτέρω για τον υπολογισμό ενός αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Η πληροφορία στέλνεται πίσω στον αποστολέα των multicast δεδομένων μέσω των αναφορών αποδέκτη και έπειτα ο αποστολέας επιλέγει τον τρέχοντα αντιπρόσωπο και τον κατάλληλο ρυθμό για τη multicast μετάδοση δεδομένων. Η πρόθεση των τροποποιημένων μηχανισμών είναι να αγνοούν τις απώλειες πακέτων που προκαλούνται από την προσωρινή υποβάθμιση

του ασύρματου καναλιού. Συνεπώς, οι απώλειες πακέτων που προκαλούνται από την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού εξαιρούνται από τα δεδομένα εισόδου στον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης.

Το νέο πεδίο που εισήχθη στα multicast πακέτα δεδομένων επιτρέπει σε κάθε UE να αναγνωρίσει την αιτία που προκάλεσε μία απώλεια πακέτου. Ο UE συγκρίνει τις απώλειες πακέτων που λαμβάνει από τον κόμβο Node B με τις απώλειες πακέτων που έχει καταγράψει ο ίδιος. Στη συνέχεια, διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Όταν ο Node B αλλά και ο UE έχουν αντιμετωπίσει μία απώλεια πακέτου, αυτή η απώλεια θεωρείται ως απώλεια που έχει προκληθεί εξαιτίας συνθηκών συμφόρησης του δικτύου (Εικόνα 60(a)). Κατά συνέπεια, αυτό το είδος απώλειας πακέτου λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό ενός αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης.
- Από την άλλη πλευρά, όταν ο έλεγχος του νέου πεδίου στο πακέτο δείξει ότι ο κόμβος Node B έλαβε προηγουμένως με επιτυχία το πακέτο, τότε ο UE συμπεραίνει ότι η προηγούμενη απώλεια προκλήθηκε εξαιτίας της ασύρματης διαπαφής και πιο συγκεκριμένα εξαιτίας προσωρινής υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού (Εικόνα 60(b)). Αυτό το είδος απώλειας πακέτου δε σχετίζεται με τη συμφόρηση του δικτύου και συνεπώς η μείωση του ρυθμού μετάδοσης δε θα επηρέαζε αυτή την απώλεια πακέτου. Σε αυτή την περίπτωση η απώλεια πακέτου δεν προσμετρείται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ένδειξη απώλειας πακέτου που έχει εισαχθεί στα πακέτα δεδομένων, τίθεται από τον κόμβο Node B και, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορεί να είναι μία πληροφορία μεγέθους 1-bit. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή 0 αντιστοιχεί σε ένα πακέτο που έχει ληφθεί επιτυχώς, ενώ η τιμή 1 υποδεικνύει ένα πακέτο που έχει προηγουμένως χαθεί. Κάθε UE διαβάζει αυτή την πληροφορία όταν λάβει ένα multicast πακέτο δεδομένων. Η συνολική ακολουθία των τιμών της ένδειξης απώλειας πακέτου καταγράφεται σε κάθε UE και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ρυθμού απώλειας πακέτων και στη συνέχεια για τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης.

8.3.3 Μόνιμη Υποβάθμιση Ασύρματου Καναλιού

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί η προσαρμογή των υπαρχόντων μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης σε συνθήκες όπου μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου έχει λάβει χώρα. Αν μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου επηρεάσει ένα συγκεκριμένο κινητό εξοπλισμό UE, τότε μετά από ένα χρονικό διάστημα το οποίο εξαρτάται από το βαθμό της υποβάθμισης, ο buffer του αντίστοιχου Node B θα υπερχειλίσει και κάποια πακέτα θα απορριφθούν (Εικόνα 60(c)). Προφανώς, αυτή η μόνιμη αδυναμία του UE να λάβει multicast πακέτα επηρεάζει την απόδοση της multicast υπηρεσίας συνολικά. Για το λόγο αυτό το UE το οποίο υποφέρει από τη σταθερή υποβάθμιση ασύρματου καναλιού θα πρέπει να επιλεγεί ως ο τρέχων αντιπρόσωπος.

Στους τροποποιημένους μηχανισμούς που προτείνονται, σε περίπτωση που μία απόρριψη πακέτου έχει συμβεί στον κόμβο Node B εξαιτίας υπερχειλίσης του buffer, τότε όταν ο Node B θέτει την ένδειξη απώλειας πακέτου, τότε θεωρεί αυτό το πακέτο ως χαμένο πακέτο. Επομένως, ο Node B θέτει την ένδειξη απώλειας πακέτου στην τιμή 1 μέσα στην επικεφαλίδα των πακέτων δεδομένων που προηγουμένως

απορρίφθηκαν εξαιτίας υπερχειρίσης του δικού του buffer. Κατά συνέπεια, οι κινητοί εξοπλισμοί UE που λαμβάνουν αυτά τα πακέτα, θεωρούν αυτές τις απώλειες πακέτων ως τυπικές απώλειες που συνέβηκαν εξαιτίας συμφόρησης του δικτύου. Τελικά, ο χειρισμός αυτός έχει σαν αποτέλεσμα να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι απώλειες πακέτων άμεσα κατά τον υπολογισμό του ρυθμού απώλειας και, εν συνεχεία, έμμεσα κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού multicast μετάδοσης.

Συνολικά δηλαδή στους τροποποιημένους μηχανισμούς που προτείνονται, ο Node B θέτει την ένδειξη απώλειας πακέτου στην τιμή 1 στις εξής περιπτώσεις:

- Όταν το πακέτο είχε προηγουμένως χαθεί.
- Όταν το πακέτο είχε προηγουμένως απορριφθεί από τον buffer του κόμβου Node B εξαιτίας μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου συνδέσμου.

Είναι προφανές ότι η βελτίωση που περιγράφηκε παραπάνω καθιστά τους προτεινόμενους μηχανισμούς κατάλληλους για τη μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού. Αυτό που εξασφαλίζεται είναι ότι αυτό το φαινόμενο δεν παραμένει κρυφό από τους κινητούς εξοπλισμούς UE. Πράγματι, οι UEs παραμένουν πάντα ενήμεροι για τις απορρίψεις πακέτων που προκλήθηκαν από την υπερχειρίση των buffers στους κόμβους Node B που τους εξυπηρετεί.

8.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι τροποποιημένοι μηχανισμοί TFMCC και PGMCC αξιολογούνται μέσω πειραμάτων εξομοίωσης που στοχεύουν προς δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση είναι η διερεύνηση του κατά πόσο οι προτεινόμενοι μηχανισμοί διατηρούν τα πλεονεκτήματα των αντίστοιχων υπάρχοντων μηχανισμών έτσι όπως αυτοί παρουσιάζονται στην αυθεντική τους μορφή στις αναφορές [101] και [84], αντίστοιχα. Η δεύτερη κατεύθυνση είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των νέων μηχανισμών κάτω από συνθήκες όπου προσωρινή ή μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού λαμβάνει χώρα. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με ένα συγκριτικό τρόπο.

Προκειμένου να εξομοιωθεί η multicast μετάδοση δεδομένων πάνω κινητά δίκτυα UMTS χρησιμοποιήθηκε η επέκταση Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions (EURANE) του εξομοιωτή δικτύων ns-2 [49], [50] σε συνδυασμό με την υλοποίηση του μηχανισμού multicast μετάδοσης για την υπηρεσία MBMS που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και περιγράφηκε ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο όπως επίσης και στην αναφορά [32]. Επιπλέον ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση και αξιολόγηση των μηχανισμών TFMCC και PGMCC, [101] και [84] αντίστοιχα, ενσωματώθηκε στον εξομοιωτή. Τέλος, οι υπάρχοντες μηχανισμοί TFMCC και PGMCC τροποποιήθηκαν και επεκτάθηκαν προκειμένου να υποστηρίξουν τις ιδιαιτερότητες των κινητών δικτύων υπολογιστών. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα εξομοίωσης.

Πίνακας 6. Παράμετροι των πειραμάτων εξομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός κόμβων SGSNs	3

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός κόμβων RNCs	20
Αριθμός κόμβων Node Bs και κελιά	80
Αριθμός multicast εξυπηρετητών κίνησης TFMCC	5
Αριθμός multicast εξυπηρετητών κίνησης PGMCC	5
Αριθμός multicast εξυπηρετητών κίνησης TCP	50
Αριθμός κινητών εξοπλισμών UE	500
Αριθμός UEs σε κάθε multicast ομάδα	Από 10 έως 100
Αριθμός multicast ομάδων για κάθε ένα UE	Από 0 έως 2

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται λεπτομερειακά η αξιολόγηση των προτεινόμενων τροποποιημένων μηχανισμών καθώς και η σύγκρισή τους με τους αντίστοιχους υπάρχοντες μηχανισμούς.

8.4.1 Δικαιοσύνη

Το πρώτο ζήτημα το οποίο εξετάζεται είναι η δικαιοσύνη των προτεινόμενων μηχανισμών ως προς ροές του ίδιου πρωτοκόλλου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζουμε τη δικαιοσύνη των προτεινόμενων μηχανισμών προς άλλες ανταγωνιστικές ροές του ίδιου πρωτοκόλλου όταν αυτές μοιράζονται κοινούς ενσύρματους ή ασύρματους συνδέσμους. Με αυτό το σκοπό, θεωρούμε ένα δίκτυο UMTS με μία τοπολογία που περιέχει ένα bottleneck. Το bottleneck εφαρμόζεται σε ένα σύνδεσμο που ενώνει ένα κόμβο SGSN με ένα κόμβο RNC. Αυτό που παρακολουθείται είναι το throughput σε ένα ασύρματο σύνδεσμο που συνδέει τον εξοπλισμό χρήστη UEx με τον κόμβο Node B. Το UEx ανήκει σε δύο multicast ομάδες και λαμβάνει δύο ροές multicast κίνησης από δύο διαφορετικούς εξωτερικούς multicast εξυπηρετητές.

Η Εικόνα 61 απεικονίζει το throughput από κάθε ανταγωνιστική multicast ροή όταν ο τροποποιημένος μηχανισμός TFMCC χρησιμοποιείται σε μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης. Το μέσο throughput της ροής TFMCC1 είναι περίπου 98,6% του μέσου throughput της ροής TFMCC2. Στην περίπτωση του τροποποιημένου μηχανισμού PGMCC οι μέσες ροές σχεδόν ταυτίζονται. Παρόμοια αποτελέσματα αποκτούνται και σε διάφορα άλλα σενάρια εξομοίωσης που εκτελέστηκαν. Για παράδειγμα, όταν δεν υπάρχει συμφόρηση ή όταν υπάρχει συμφόρηση μεταξύ της διεπαφής που συνδέει του κόμβους GGSN και SGSN. Επομένως η δικαιοσύνη μεταξύ των ροών του ίδιου πρωτοκόλλου επιβεβαιώνεται για όλους τους βαθμούς συμφόρησης του δικτύου.

Εικόνα 61. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για δύο ανταγωνιστικές TFMCC ροές.

Επιπλέον, εξετάζεται η δικαιοσύνη προς ροές διαφορετικών πρωτοκόλλων για όλες τους πιθανούς συνδυασμούς ροών. Η δικαιοσύνη προς ροές διαφορετικών πρωτοκόλλων είναι η δικαιοσύνη προς ανταγωνιστικές ροές του πρωτοκόλλου TCP καθώς και η δικαιοσύνη που εμφανίζουν οι προτεινόμενοι μηχανισμοί μεταξύ τους, όταν διαμοιράζονται κοινούς συνδέσμους.

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης, αξίζει να παρουσιαστεί και η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου UDP. Όπως έχει αναφερθεί, οι ροές του πρωτοκόλλου αυτού εκδηλώνουν άδικη συμπεριφορά έναντι των ροών του πρωτοκόλλου TCP όταν διαμοιράζονται κοινούς συνδέσμους [100]. Η Εικόνα 62 δίνει μία άποψη του φαινομένου αυτού. Για την ακρίβεια, στο εξεταζόμενο σενάριο, ένας κινητός εξοπλισμός λαμβάνει multicast κίνηση δεδομένων μέσω πρωτοκόλλου UDP στο οποίο δεν έχει εφαρμοστεί έλεγχος ροής. Ταυτόχρονα ο ίδιος κινητός εξοπλισμός λαμβάνει και κίνηση TCP. Η Εικόνα 62 δείχνει τις διαστάσεις που παίρνει η αδικία στη δέσμευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του συνδέσμου. Μία δίκαιη συμπεριφορά από πλευράς πρωτοκόλλου UDP θα επέβαλλε ισομερή χρήση του συνδέσμου και από τα δύο πρωτόκολλα.

Στην εξεταζόμενη τοπολογία εξομοίωσης ο κινητός εξοπλισμός UEx λαμβάνει multicast κίνηση από δύο multicast εξυπηρετητές. Ο πρώτος multicast εξυπηρετητής χρησιμοποιεί τον τροποποιημένο μηχανισμό TFMCC για τον έλεγχο συμφόρησης ενώ ο δεύτερος εξυπηρετητής χρησιμοποιεί τον τροποποιημένο μηχανισμό PGMCC. Την ίδια στιγμή ο ίδιος κινητός εξοπλισμός UEx λαμβάνει κίνηση TCP από ένα εξωτερικό κόμβο. Η Εικόνα 63 δείχνει το throughput της ροής TFMCC σε αντιπαραβολή με τις ροές PGMCC και TCP. Είναι εμφανές ότι τα μέσα throughput όλων των ροών σχεδόν ταυτίζονται. Για την ακρίβεια, το μέσο throughput του TFMCC έχει τιμή σε ένα ποσοστό 89% επί του μέσου throughput του TCP. Από την άλλη πλευρά το μέσο throughput του μηχανισμού PGMCC είναι σε ποσοστό 94% επί του μέσου throughput του TCP. Επιπλέον, ο μηχανισμός TFMCC φαίνεται να επιτυγχάνει ένα πιο ομαλό ρυθμό μετάδοσης σε σύγκριση με αυτούς των TCP και PGMCC.

Εικόνα 62. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για δύο ανταγωνιστικές UDP και TCP ροές.

Εικόνα 63. Τα throughputs σε μία τοπολογία με ένα bottleneck για ανταγωνιστικές ροές TFMCC, PGMCC και TCP.

Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και για πολλά διαφορετικά σενάρια. Σε όλες τις τοπολογίες δικτύου και για διάφορα επίπεδα συμφόρησης το διαθέσιμο throughput του συνδέσμου με συμφόρηση μοιράζεται εξίσου μεταξύ των ανταγωνιστικών ροών του πρωτοκόλλου TCP και των τροποποιημένων μηχανισμών TFMCC ή/και PGMCC. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις ο μηχανισμός TFMCC επιτυγχάνει πιο ομαλό ρυθμό μετάδοσης. Κατά συνέπεια η TCP-friendliness και η δικαιοσύνη προς ροές διαφορετικού πρωτοκόλλου καθενός από τους προτεινόμενους μηχανισμούς προς τις υπόλοιπες επιβεβαιώνονται.

8.4.2 Απόκριση σε Αλλαγές

Ένα σημαντικό ζήτημα στο σχεδιασμό μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης είναι η απόκρισή τους σε αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου. Αυτή η συμπεριφορά μελετάται με τη χρήση τοπολογίας που περιέχει ένα bottleneck. Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, αλλάζουμε τον εφαρμοζόμενο ρυθμό απώλειας πακέτων του συνδέσμου στον οποίο εφαρμόζεται το bottleneck. Η εξομοίωση διαρκεί 150 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος τρεις διαφορετικοί ρυθμοί απώλειας εφαρμόζονται επί της διεπαφής Iu. Μία ροή TFMCC, μία ροή PGMCC καθώς και μία ροή TCP καταγράφονται καθώς διαμοιράζονται το σύνδεσμο στον οποίο εφαρμόζεται το bottleneck. Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για τις τρεις ανταγωνιστικές ροές παρουσιάζονται στην Εικόνα 64.

Εικόνα 64. Απόκριση σε αλλαγές στο ρυθμό απώλειας πακέτων.

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 64, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί παρουσιάζουν throughputs που σχεδόν ταυτίζονται με το throughput του πρωτοκόλλου TCP. Αυτό ισχύει και για τα τρία επίπεδα απωλειών πακέτων. Επιπλέον, η προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης είναι αρκετά γρήγορη και για τους δύο προτεινόμενους μηχανισμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μηχανισμός PGMCC έχει άμεση αντίδραση στις αλλαγές του ρυθμού απώλειας πακέτων. Στην πραγματικότητα τα παραγόμενα αρχεία από τον εξομοιωτή δείχνουν ότι οι κινητοί εξοπλισμοί χρειάζονται 1200 έως 2000 milliseconds μετά την αλλαγή στο ρυθμό μετάδοσης προκειμένου να προσαρμοστούν στο νέο ρυθμό απώλειας πακέτων. Αυτές οι τιμές χρόνου απόκρισης είναι αρκετά κοντά στις αντίστοιχες τιμές της ροή πρωτοκόλλου TCP (περίπου 1000 με 1500 milliseconds). Από την άλλη πλευρά, ο μηχανισμός TFMCC έχει πιο αργή απόκριση δεδομένου ότι ο χρόνος προσαρμογής για αυτόν είναι περίπου 1500 με 2500 milliseconds. Παρόλα αυτά, όπως και στα πειράματα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ο μηχανισμός TFMCC είναι αυτός που διατηρεί τον πιο ομαλό ρυθμό σε σύγκριση με το μηχανισμό PGMCC και το πρωτόκολλο TCP.

Μία παρόμοια διάταξη εξομοίωσης χρησιμοποιείται προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση στις αλλαγές στο χρόνο RTT. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά παραπάνω και, κατά συνέπεια, η πολύ ικανοποιητική ανταπόκριση του τροποποιημένου μηχανισμού TFMCC και κυρίως του τροποποιημένου μηχανισμού PGMCC στις αλλαγές του επιπέδου συμφόρησης σε ένα κινητό δίκτυο UMTS επιβεβαιώνεται. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιπλέον αποδεικνύουν ότι κατά τη χρήση των τροποποιημένων μηχανισμών ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των υπαρχόντων μηχανισμών που είναι η γρήγορη απόκριση στις αλλαγές [101] και [84], δεν επηρεάζεται.

8.4.3 Προσωρινή Υποβάθμιση Ασύρματου Καναλιού

Στη συνέχεια, το θέμα που εξετάστηκε από τα πειράματα είναι η αξιολόγηση των προτεινόμενων μηχανισμών όταν απώλειες πακέτων λαμβάνουν χώρα εξαιτίας του φαινομένου της προσωρινής υποβάθμισης ασύρματου συνδέσμου. Για τους σκοπούς του σχετικού πειράματος θεωρείται ένα δίκτυο UMTS με ένα μοντέλο απωλειών πακέτων όπως αυτό που παρουσιάζεται στην αναφορά [47]. Στο δίκτυο αυτό εξομοιώνεται υποβάθμιση ασύρματου συνδέσμου με την εφαρμογή ενός ρυθμού λαθών επί των πακέτων που μεταδίδονται μέσω των ασύρματων συνδέσμων. Ο ρυθμός απώλειας πακέτων επιλέγεται να είναι σχετικά μικρός και θεωρείται ότι είναι σταθερός για μία περίοδο διάρκειας 20 δευτερολέπτων. Κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου 5 δευτερολέπτων, ο εφαρμοζόμενος ρυθμός απώλειας πακέτων επιλέγεται τυχαία από ένα εύρος τιμών μεταξύ 0% και 5%. Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί είναι το πρωτόκολλο TCP, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί TFMCC και PGMCC, καθώς και οι αντίστοιχοι υπάρχοντες μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης χωρίς τις τροποποιήσεις. Το πείραμα εκτελείται πέντε φορές, μία για κάθε ένα από τους εξεταζόμενους μηχανισμούς και με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους. Κατά τη διάρκεια της κάθε εκτέλεσης του πειράματος καταγράφεται το throughput καθενός από τους εξεταζόμενους μηχανισμούς.

Η Εικόνα 65 απεικονίζει το λόγο των throughputs των τροποποιημένων μηχανισμών (αναφέρονται ως «MOD_TFMCC» και «MOD_PGMCC» σε αντιπαράβολή με τους αντίστοιχους υπάρχοντες μηχανισμούς (αναφέρονται ως «LEG_TFMCC» και «LEG_PGMCC»). Το throughput για κάθε μηχανισμό κανονικοποιείται με το throughput του πρωτοκόλλου TCP. Επομένως, το throughput του TCP παραλείπεται, αφού ο λόγος του πάντοτε ταυτίζεται με τη μονάδα. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει τον αριθμό των κινητών εξοπλισμών που ανήκουν στην εξεταζόμενη multicast ομάδα. Ο κατακόρυφος άξονας δείχνει το μέσο throughput το οποίο κανονικοποιείται με το αντίστοιχο του πρωτοκόλλου TCP.

Οι απώλειες πακέτων μπορούν και ανιχνεύονται σωστά στους κινητούς εξοπλισμούς UE και στη συνέχεια αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Η Εικόνα 65 δείχνει ξεκάθαρα ότι ο τροποποιημένος μηχανισμός PGMCC έχει throughput που προσεγγίζει κατά πολύ το μέσο throughput του πρωτοκόλλου TCP. Αντίθετα ο τροποποιημένος μηχανισμός TFMCC έχει ένα ελαφρώς μεγαλύτερο μέσο throughput (περίπου κατά ποσοστό 8%) σε σχέση με αυτό του πρωτοκόλλου TCP. Από την άλλη πλευρά, όταν οι υπάρχοντες μηχανισμοί TFMCC και PGMCC χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο συμφόρησης, λαμβάνει χώρα σημαντική υποβάθμιση της multicast υπηρεσίας. Η υποβάθμιση της υπηρεσίας γίνεται ακόμα μεγαλύτερη όταν ο αριθμός των κινητών εξοπλισμών που συμμετέχει στη multicast ομάδα αυξάνεται. Ο Πίνακας 7 και η Εικόνα 65 επιβεβαιώνουν την

αποδοτική λειτουργία των προτεινόμενων μηχανισμών όταν συμβαίνει υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού.

Εικόνα 65. Το throughput των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι αυτού των υπαρχόντων κατά την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού.

Πίνακας 7. Ποσοτική βελτίωση που παρουσιάζουν οι προτεινόμενοι μηχανισμοί έναντι των υπαρχόντων μηχανισμών κατά την προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου.

Number of UEs \ Scheme	1	3	6	10	15	20	30	50	70	100
MOD_TFMCC	1.14	1.08	1.1	1.07	1.12	1.08	1.05	1.06	1.07	1.05
MOD_PGMCC	1.02	1.05	1.03	1	1.04	1.01	1.04	1.03	1.01	1
LEG_TFMCC	0.96	0.7	0.585	0.587	0.562	0.502	0.484	0.462	0.456	0.452
LEG_PGMCC	0.94	0.76	0.705	0.637	0.63	0.602	0.557	0.538	0.528	0.522

8.4.4 Μόνιμη Υποβάθμιση Ασύρματου Καναλιού

Το τελευταίο θέμα που μελετήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων αξιολόγησης είναι η συμπεριφορά των προτεινόμενων μηχανισμών όταν απώλειες πακέτων λαμβάνουν χώρα εξαιτίας της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού. Στο εξεταζόμενο κινητό δίκτυο UMTS, ο ασύρματος σύνδεσμος που συνδέει τον κινητό εξοπλισμό UEx με τον κόμβο Node B υποβαθμίζεται μόνιμα.

Η εξομοίωση της υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού γίνεται με την εφαρμογή ενός ρυθμού απώλειας 20% επί των πακέτων που μεταδίδονται μέσω του προβληματικού ασύρματου συνδέσμου. Στην πρώτη φάση της εξομοίωσης δεν λαμβάνει χώρα υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού. Έπειτα από 50 δευτερόλεπτα εξομοίωσης, εφαρμόζεται η μόνιμη υποβάθμιση επί του ασύρματου καναλιού που

συνδέει τον κινητό εξοπλισμό UEx με τον κόμβο Node By. Έπειτα, καταγράφονται οι αλλαγές στο throughput του υποβαθμισμένου ασύρματου συνδέσμου για 100 δευτερόλεπτα. Το πείραμα εκτελείται τρεις φορές, μία για κάθε ένα από τους τροποποιημένους μηχανισμούς καθώς και μία φορά για κίνηση πρωτοκόλλου TCP. Οι παράμετροι εξομοίωσης είναι ακριβώς οι ίδιες για όλες τις εκτελέσεις του πειράματος. Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 66.

Εικόνα 66. Το throughput των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι αυτού του TCP κατά τη διάρκεια της μόνιμης υποβάθμισης ασύρματου καναλιού.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης αποδεικνύουν ότι οι προτεινόμενοι μηχανισμοί αντιδρούν ικανοποιητικά στην μόνιμη υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου. Όταν η εξομοίωση ξεκινά, οπότε δεν υφίσταται συμφόρηση, throughput πλησιάζει και σχεδόν ταυτίζεται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του ασύρματου συνδέσμου. Μετά από 50 δευτερόλεπτα εξομοίωσης, ο ρυθμός απώλειας πακέτων 20% εφαρμόζεται στο κανάλι. Οι τροποποιημένοι μηχανισμοί, αντίθετα με το πρωτόκολλο TCP, δεν αντιδρούν άμεσα σε αυτή την υποβάθμιση. Προφανώς αυτό συμβαίνει διότι τη θεωρούν σαν προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου. Σύντομα όμως, ο buffer του κόμβου Node By υπερχειλίζει και πλέον οι τροποποιημένοι μηχανισμοί έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουν τη φύση της υποβάθμισης. Ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη προσαρμογή στις νέες συνθήκες του δικτύου είναι περίπου 5 δευτερόλεπτα για τον τροποποιημένο μηχανισμό PGMCC και 6 δευτερόλεπτα για τον τροποποιημένο TFMCC. Αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης της πηγής καθώς και το μέγεθος του buffer στον κόμβο Node B. Σε αυτό το σημείο αξ σημειωθεί ότι το αντίστοιχο χρονικό διάστημα προσαρμογής για το πρωτόκολλο TCP είναι λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα.

Είναι λοιπόν προφανές η ικανοποιητική συμπεριφορά των προτεινόμενων μηχανισμών όταν λαμβάνει χώρα μόνιμη υποβάθμιση των ασύρματων καναλιών. Οι απώλειες πακέτων στον κόμβο Node B θεωρούνται και αντιμετωπίζονται ως εκδήλωση της συμφόρησης του δικτύου. Κατά συνέπεια δεν αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης προς τον κινητό εξοπλισμό UE. Τελικά, αυτό το είδος απωλειών προκαλεί μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Στην

περίπτωση που πολλαπλά ασύρματα κανάλια έχουν υποβαθμιστεί, τα αποτελέσματα εξομοίωσης είναι αντίστοιχα. Ο αντιπρόσωπος σε αυτή την περίπτωση είναι ένας από τους κινητούς εξοπλισμούς οι οποίοι έχουν πρόσβαση στο κινητό δίκτυο μέσω ενός μόνιμης υποβαθμισμένου ασύρματου συνδέσμου.

8.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν δύο μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για multicast μεταδόσεις δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι βασισμένοι στους γνωστούς μηχανισμούς TFMCC και PGMCC. Οι δύο αυτοί υπάρχοντες μηχανισμοί ανήκουν στην κατηγορία των TCP-friendly μηχανισμών multicast μετάδοσης δεδομένων και είναι μηχανισμοί μοναδικού ρυθμού. Επίσης έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή σε σταθερά δίκτυα επικοινωνιών. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε κινητά δίκτυα, ένα σύνολο από τροποποιήσεις χρησιμοποιείται και για τους δύο μηχανισμούς.

Πιο συγκεκριμένα, ένα νέο πεδίο μεγέθους 1-bit εισάγεται στα πακέτα δεδομένων και για τους δύο μηχανισμούς. Αυτό γίνεται προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα φαινόμενα της προσωρινής καθώς και της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου συνδέσμου. Οι μεταβολές που απαιτούνται στη λειτουργία του δικτύου είναι πολύ απλές και ουσιαστικά περιορίζονται μόνο σε δύο τύπους κόμβων του κινητού δικτύου. Για την ακρίβεια, τροποποιήσεις απαιτούνται στους κόμβους Node B καθώς και στους κινητούς εξοπλισμούς UE. Η πρόσθετες αυτές λειτουργίες αποσκοπούν κυρίως στο να ελέγχεται η αιτία μίας δυνητικής απώλειας πακέτου. Επίσης, κάτι που είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι προτεινόμενοι μηχανισμοί σέβονται την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ των κινητών εξοπλισμών UE και, κατά συνέπεια, καμία απαιτητική λειτουργία δεν έχει εισαχθεί σε αυτό τον τύπο κόμβου του δικτύου.

Με σκοπό την αξιολόγηση των προτεινόμενων μηχανισμών, εκτελέστηκε ένα σύνολο από πειράματα εξομοίωσης. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι και οι δύο μηχανισμοί διατηρούν τα πλεονεκτήματα των αντίστοιχων υπάρχοντων μηχανισμών κατά την εφαρμογή τους στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Αυτό συνεπάγεται ότι οι μηχανισμοί είναι δίκαιοι προς τις άλλες ροές δεδομένων του ίδιου μηχανισμού για διάφορες τοπολογίες δικτύων και επίπεδα συμφόρησης. Επιπλέον εμφανίζουν την ιδιότητα της TCP-friendliness προς ανταγωνιστικές ροές δεδομένων του πρωτοκόλλου TCP. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η δικαιοσύνη εξετάστηκε και όσον αφορά σε ροές δεδομένων των δύο προτεινόμενων μηχανισμών που ανταγωνίζονται μεταξύ τους και επιβεβαιώθηκε και σε αυτή την περίπτωση. Ο τροποποιημένος μηχανισμός TFMCC διατηρεί ένα πολύ ομαλό ρυθμό μετάδοσης σε σύγκριση με το πρωτόκολλο TCP καθώς και με τον τροποποιημένο μηχανισμό PGMCC. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των πειραμάτων αποδεικνύουν την αποδοτική απόκριση των μηχανισμών στις αλλαγές του επιπέδου συμφόρησης όσον αφορά στο ρυθμό απώλειας πακέτων αλλά και στο χρόνο RTT. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένα άλλο πλεονέκτημα των υπάρχοντων μηχανισμών το οποίο επιβεβαιώθηκε ότι διατηρείται είναι η επεκτασιμότητα.

Το άλλο βασικό ζήτημα που εξετάστηκε από τα πειράματα εξομοίωσης είναι η καταγραφή της απόδοσης των μηχανισμών όταν λαμβάνει χώρα η υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου. Αυτό που επιβεβαιώθηκε είναι ότι όταν λαμβάνει χώρα προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου, οι απώλειες πακέτων που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό, μπορούν να ανιχνεύονται με ορθότητα στους

κινητούς εξοπλισμούς και να αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, όπως ήταν αναμενόμενο, οι υπάρχοντες μηχανισμοί αντιδρούν στο φαινόμενο αυτό με μείωση του ρυθμού μετάδοσης, κάτι που προκαλεί σταθερή υποβάθμιση της multicast υπηρεσίας.

Τέλος, εξετάστηκε η συμπεριφορά των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι στο φαινόμενο της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες πακέτων που οφείλονται σε υπερχειλίσσεις των buffers στους κόμβους Node B θεωρούνται ως εκδηλώσεις συμφόρησης του δικτύου και δεν αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Τελικά, τέτοιου είδους απώλειες προκαλούν μείωση στο ρυθμό της multicast μετάδοσης δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: FORWARD ERROR CORRECTION

FORWARD ERROR CORRECTION

Γενικότερα στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την εξασφάλιση αξιοπιστίας κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων. Η πιο γνωστή μέθοδος είναι η Automatic Repeat re-Quest (ARQ) η οποία δουλεύει αποτελεσματικά κυρίως κατά την unicast μετάδοση. Όταν η μέθοδος ARQ εφαρμόζεται σε μία multicast σύνοδο, οι αποδέκτες στέλνουν αιτήσεις για αναμετάδοση χαμένων πακέτων μέσω καναλιών επικοινωνίας προς τον αποστολέα. Η μέθοδος ARQ γενικά είναι σχετικά αποτελεσματική κατά τη multicast μετάδοση και αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο. Παρόλα αυτά, όταν ο αριθμός των αποδεκτών αυξάνει, οι περιορισμοί στις δυνατότητες της μεθόδου αυτής αποκαλύπτονται. Ένας σημαντικός περιορισμός είναι το πρόβλημα του καταγισμού ανατροφοδοτήσεων. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει όταν πολλοί αποδέκτες στέλνουν ταυτόχρονα αιτήσεις για αναμετάδοση στον αποστολέα. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι ότι, για ένα δεδομένο ρυθμό απώλειας πακέτων, όσο ο αριθμός των αποδεκτών αυξάνει, τόσο η πιθανότητα να αναμεταδοθεί ένα πακέτο τείνει προς τη μονάδα. Με άλλα λόγια, ένας μεγάλος μέσος αριθμός από μεταδόσεις χρειάζονται για κάθε πακέτο. Σε ένα ασύρματο περιβάλλον, η μέθοδος ARQ έχει ένα ακόμα μεγάλο μειονέκτημα το οποίο οφείλεται στην προϋπόθεση ύπαρξης αμφίδρομου συνδέσμου επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, στα περισσότερα ενσύρματα δίκτυα είναι αυτονόητο ότι το κανάλι ανατροφοδότησης παρέχεται από το δίκτυο. Αντίθετα, στα ασύρματα δίκτυα η μετάδοση της ανατροφοδότησης από τον αποδέκτη μπορεί να κοστίζει ακριβά είτε με όρους κατανάλωσης ισχύος είτε λόγω περιορισμών στην τηλεπικοινωνιακή υποδομή.

Το FEC είναι μία μέθοδος ελέγχου λαθών η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συμπληρώσει ή να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους για αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Το βασικό χαρακτηριστικό των μηχανισμών FEC είναι ότι ο αποστολέας προσθέτει επιπλέον πληροφορία στα μηνύματα προς τον αποδέκτη. Αυτά τα επιπλέον δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα στον αποδέκτη να ανακατασκευάσει την αρχική πληροφορία. Αναπόφευκτα, αυτού του είδους οι μηχανισμοί προκαλούν μία σταθερή επιβάρυνση στον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων και είναι υπολογιστικά ακριβοί. Στα multicast πρωτόκολλα όμως, η χρήση των τεχνικών FEC έχει πολύ δυνατά πλεονεκτήματα. Η κωδικοποίηση περιορίζει το φαινόμενο των ανεξάρτητων απωλειών πακέτων σε διαφορετικούς αποδέκτες. Αυτό κάνει τους μηχανισμούς αυτούς να μπορούν να κλιμακωθούν σε πολλούς αποδέκτες ανεξάρτητα από το ρυθμό απώλειας πακέτων. Επιπλέον, η δραματική μείωση στο ρυθμό απώλειας πακέτων περιορίζει σημαντικά την ανάγκη για την αποστολή ανατροφοδότησης στον αποδέκτη. Επομένως, ένα κανάλι ανατροφοδότησης μπορεί να μην είναι απαραίτητο ή αν χρησιμοποιείται τέτοιου είδους κανάλι, η πιθανότητα εμφάνισης καταγισμού από ανατροφοδοτήσεις εκμηδενίζεται. Είναι προφανές ότι οι μηχανισμοί FEC είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν ένα από τους βασικούς στόχους των multicast κινητών υπηρεσιών και ο οποίος είναι η επεκτασιμότητα σε εφαρμογές με χιλιάδες χρηστών. Αυτός είναι και ο λόγος που το 3GPP συστήνει τη χρήση του FEC επιπέδου εφαρμογής για την υπηρεσία MBMS και πιο συγκεκριμένα υιοθετεί τη χρήση του κώδικα Raptor FEC [27], [28].

Στο τμήμα αυτής της διατριβής που σχετίζεται με το FEC διερευνάται η εφαρμογή του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η έρευνα διεξάγεται με τη βοήθεια ενός νέου μηχανισμού ο οποίος ενσωματώνει ένα

πιθανοτικό μοντέλο για την κατανομή των multicast χρηστών στο δίκτυο και καθορίζει το κόστος της multicast μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετάται η επίδραση της χρήσης του FEC στην υπηρεσία MBMS. Γίνεται μία προσπάθεια για τον καθορισμό ενός αποδοτικού σημείου λειτουργίας στη διελκυστίνδα μεταξύ της επιβάρυνσης εξαιτίας του κώδικα και του κόστους αναμετάδοσης. Εξετάζεται εάν η χρήση του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση για τον κώδικα FEC μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, ποιες παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου κώδικα FEC καθώς και ο τρόπος που το κάνουν. Επιπλέον, εξετάζεται ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα στη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα και το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης [5]. Ο προτεινόμενος μηχανισμός ενσωματώνει τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSPA για την μετάδοση δεδομένων προς τις κινητές τερματικές συσκευές με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Η αξιολόγηση δε γίνεται μόνο μέσα από το πρίσμα της κατανάλωσης ισχύος αλλά επίσης και μέσα από τα πρίσματα της ταχύτητας μετάδοσης και της κατανάλωσης ενέργειας. Κάτι που είναι επίσης σημαντικό είναι ότι η ανάλυση που γίνεται είναι πλήρως συμβατή με τις προδιαγραφές που έχουν θεσπιστεί από το 3GPP και λαμβάνει υπόψη όλους τους δυνατούς τρόπους επικοινωνίας στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (σημείο-προς-σημείο, σημείο-προς-πολλαπλά σημεία, καθώς και την υβριδική επικοινωνία που συνδυάζει και τους δύο φορείς του δικτύου ασύρματης πρόσβασης). Η δημιουργία αυτού του πλήρους και συμπαγούς πλαισίου είναι ένα από τα κίνητρα που κρύβονται πίσω από αυτό το ερευνητικό έργο. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία πλήρης και συμπαγής θεώρηση όλων των ζητημάτων που αφορούν την εφαρμογή του FEC κατά τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα, κάποια από τα οποία δεν είχαν εξεταστεί καθόλου έως σήμερα, [37] και [44].

Η δομή του παρόντος κεφαλαίου έχει ως εξής: στο Υποκεφάλαιο 9.1 περιγράφεται ένα πολύ σημαντικό θέμα το οποίο εξετάζεται στη συνέχεια και το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης Radio Access Network (RAN). Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζονται τα προφίλ ισχύος των καναλιών μεταφοράς του δικτύου RAN που πρόκειται να εξεταστούν στη συνέχεια. Το Υποκεφάλαιο 9.2 δίνει μια περιγραφή της διαδικασίας εφαρμογής του FEC στην υπηρεσία MBMS. Το Υποκεφάλαιο 9.3 είναι αφιερωμένο στην πιθανοτική μέθοδο με την οποία μοντελοποιείται η κατανομή των multicast χρηστών μέσα στο κινητό δίκτυο επικοινωνιών. Στη συνέχεια, το Υποκεφάλαιο 9.4 παρέχει μία αναλυτική περιγραφή του μηχανισμού εξομοίωσης που έχει χρησιμοποιηθεί για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στο Υποκεφάλαιο 9.5 παρουσιάζονται διεξοδικά τα πειράματα εξομοίωσης που έχουν διεξαχθεί καθώς και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από αυτά. Τέλος, στο Υποκεφάλαιο 9.6 αναφέρονται κάποια συμπεράσματα και κάποιες σχετικές παρατηρήσεις.

9.1 ΠΡΟΦΙΛ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΚΑΝΑΛΙΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο υποκεφάλαιο αυτό δίνεται μία αναλυτική περιγραφή των προφίλ ισχύος για τα κανάλια μεταφοράς του δικτύου ασύρματης πρόσβασης RAN. Δύο είναι τα κανάλια μεταφοράς τα οποία εξετάζονται: το κανάλι FACH για p-t-m (broadcast) μετάδοση δεδομένων στην ασύρματη διεπαφή και το κανάλι HS-DSCH για p-t-p (unicast) μετάδοση δεδομένων στην ασύρματη διεπαφή.

9.1.1 Κανάλι HS-DSCH

Το κανάλι μεταφοράς HS-DSCH είναι ένα κανάλι ελεγχόμενο από το ρυθμό και όχι ελεγχόμενο από την ισχύ. Αυτό διότι στην τεχνολογία HSDPA, η λειτουργία γρήγορου ελέγχου ισχύος που χαρακτηρίζει την έκδοση Release '99 έχει αντικατασταθεί από τη λειτουργία Link Adaptation. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Υποκεφάλαιο 4.2, η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει τεχνικές όπως η AMC, multi-code operation, fast scheduling, HARQ καθώς και σύντομα διαστήματα TTI διάρκειας 2ms, [19] και [58].

Πράγματι, η ποσότητα Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio ($SINR$) για το κανάλι μεταφοράς HS-DSCH πράγματι αποτελεί μία νέα μετρική αξιολόγησης η οποία εισάγει μια ελαφρά διαφοροποίηση στον τρόπο αξιολόγησης της τεχνολογίας HSDPA από τους φορείς που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά στην έκδοση Release '99. Για την ακρίβεια, η έκδοση Release '99 τυπικά χρησιμοποιεί το λόγο ενέργειας ανά bit προς θόρυβο, που εκφράζεται από την ποσότητα E_b/N_0 . Η ποσότητα αυτή έχει μία ένα-προς-ένα αντιστοιχία για ένα ρυθμό λαθών Block Error Rate (BLER) και δεδομένου ενός ρυθμού μετάδοσης. Η ποσότητα E_b/N_0 δεν αποτελεί μία ελκυστική μετρική για την τεχνολογία HSDPA γιατί ο ρυθμός μετάδοσης στο κανάλι HS-DSCH διαφοροποιείται για κάθε χρονικό διάστημα TTI με τη χρήση διαφορετικών μηχανισμών διαμόρφωσης και κωδίκων του καναλιού High Speed-Physical Downlink Shared Channel (HS-PDSCH).

Ο τύπος που δίνει την τιμή της ποσότητας $SINR$ για ένα αποδέκτη Rake μονής κεραίας παρέχεται παρακάτω από την Εξίσωση (1), [58]:

$$SINR = SF_{16} \frac{P_{HS-DSCH}}{(1-\alpha) \cdot P_{own} + P_{other} + P_{noise}} \quad (1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση $P_{HS-DSCH}$ είναι η ισχύς μετάδοσης στο κανάλι HS-DSCH, P_{own} είναι η παρεμβολή από το ίδιο κελί προς τον κινητό χρήστη, P_{other} είναι η παρεμβολή από τα γειτονικά κελιά και P_{noise} είναι ο Προσθετικός Λευκός Gaussian Θόρυβος. Η παράμετρος α ο παράγοντας ορθογωνιότητας στον κατερχόμενο σύνδεσμο ($\alpha = 1$ δηλώνει απόλυτη ορθογωνιότητα), ενώ η ποσότητα SF_{16} είναι ο παράγοντας spreading του 16.

Επιπρόσθετα, υπάρχει μία ισχυρή εξάρτηση μεταξύ της ισχύος που δαπανάται στο κανάλι HS-DSCH με το throughput του κελιού όσον αφορά στην υπηρεσία MBMS. Αυτή η σχέση μπορεί να περιγραφεί σε τρία βήματα ως εξής: Αρχικά, θα πρέπει να οριστεί το επιθυμητό throughput στο κελί για την υπηρεσία MBMS. Για παράδειγμα, αν μία υπηρεσία MBMS ρυθμού μετάδοσης 64 Kbps πρέπει να προσφερθεί σε μία multicast ομάδα που αποτελείται από 10 χρήστες, τότε το επιθυμητό throughput θα είναι ίσο με 640 Kbps. Από τη στιγμή που το επιθυμητό throughput για το κελί έχει τεθεί, το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του τρόπου που αυτό το throughput σχετίζεται με την ποσότητα $SINR$. Τέλος, ο τρόπος που η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης για το κανάλι HS-DSCH εκφράζεται ως συνάρτηση της ποσότητας $SINR$ καθώς και της θέσης του χρήστη μέσα στο κελί, μπορεί να εκφραστεί όπως στην Εξίσωση (2), [58]:

$$P_{HS-DSCH} \geq SINR[1 - \alpha + G^{-1}] \frac{P_{own}}{SF_{16}} \quad (2)$$

Η ποσότητα Geometry Factor (G) εκφράζει ποσοτικά τη θέση του χρήστη. Η τιμή της ποσότητας αυτής δίνεται ως συνάρτηση των ποσοτήτων P_{own} , P_{other} και P_{noise} , και προσδιορίζεται από την Εξίσωση (3), [58]:

$$G = \frac{P_{own}}{P_{other} + P_{noise}} \quad (3)$$

Ουσιαστικά η ποσότητα G προσδιορίζει την θέση του χρήστη σε ένα κελί ως την απόστασή του από το σταθμό βάσης. Μία χαμηλή τιμή της ποσότητας G αναμένεται για ένα χρήστη που βρίσκεται στην άκρη ενός κελιού. Στην περίπτωση αυτή, αναμένεται ότι η παρεμβολή που λαμβάνει ο χρήστης από τα γειτονικά κελιά είναι υψηλότερη από την παρεμβολή που υφίσταται από το ίδιο το κελί όπου βρίσκεται. Επιπλέον, σε κελιά micro-cell οι χρήστες της υπηρεσίας MBMS λαμβάνουν μία καλύτερη (υψηλότερη) ποσότητα G εξαιτίας της καλύτερης απομόνωσης του περιβάλλοντος η οποία, με τη σειρά της, οδηγεί σε χαμηλότερη παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών κελιών (P_{other}).

9.1.2 Κανάλι FACH

Το κανάλι μεταφοράς FACH είναι ένα κανάλι p-t-m που λαμβάνεται από όλους τους χρήστες σε ολόκληρη την περιοχή εξυπηρέτησης του κελιού. Για την ακρίβεια, είναι ένα κανάλι που εκτελεί broadcast μετάδοση δεδομένων. Γρήγορος έλεγχος ισχύος δεν υποστηρίζεται για αυτό το κανάλι και, κατά συνέπεια, το κανάλι FACH μεταδίδει πάντοτε σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος. Το κανάλι μεταφοράς FACH πολυπλέκεται σε ένα κανάλι Secondary-Common Control Physical Channel (S-CCPCH) και συγκεκριμένα επίπεδα ρυθμών μετάδοσης επιτυγχάνονται ανάλογα με τη μορφή της σχισμής του καναλιού S-CCPCH που χρησιμοποιείται. Η ισχύς που δαπανάται για το κανάλι FACH θα πρέπει να είναι αρκετή έτσι ώστε να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας QoS σε μια επιθυμητή επιφάνεια κάλυψης του κελιού και να εξυπηρετεί το χρήστη με το χειρότερο path loss, δηλαδή το χρήστη με τη μεγαλύτερη απόσταση από το σταθμό βάσης. Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει κάποια ενδεικτικά επίπεδα ισχύος που έχουν προσδιοριστεί για διάφορες περιοχές κάλυψης κελιών και για διαφορετικές απαιτήσεις για ρυθμό λαθών BLER. Αυτά τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης για το κανάλι FACH αντιστοιχούν σε ένα περιβάλλον macro-cell (η απόσταση των σταθμών βάσης είναι 1 Km) και για ρυθμό μετάδοσης της υπηρεσίας MBMS με τιμή 64 Kbps. Η τιμή για το χρονικό διάστημα TTI έχει τεθεί στα 80 ms και θεωρείται ότι δεν χρησιμοποιείται Space Time Transmit Diversity (STTD) [26], [58].

Πίνακας 8. Απαιτούμενα επίπεδα ισχύος μετάδοσης για το κανάλι FACH έναντι της κάλυψης του κελιού. Ο ρυθμός μετάδοσης έχει τεθεί στα 64 Kbps και οι απαιτήσεις ισχύος λαμβάνονται για διάφορες τιμές του ρυθμού BLER.

Κάλυψη	1% BLER	5% BLER	10% BLER	20% BLER
70%	3.6 W	2.8 W	2.3 W	1.8 W
90%	6.4 W	5 W	3.9 W	3.2 W
100%	10.2 W	7.8 W	5.4 W	4.1 W

9.2 ΚΩΔΙΚΕΣ RAPTOR

Προκειμένου να βελτιώσει την αξιοπιστία των μεταδόσεων της υπηρεσίας MBMS ο οργανισμός 3GPP έθεσε στο πρότυπο τη χρήση των κωδίκων Raptor ως την κωδικοποίηση FEC για το επίπεδο της εφαρμογής [13]. Κατά συνέπεια, οι δύο μέθοδοι μετάδοσης της υπηρεσίας MBMS, η μέθοδος streaming και η μέθοδος download, θέτουν ως απαραίτητη υποχρέωση την υποστήριξη των κωδίκων Raptor από τους κινητούς εξοπλισμούς UE [27]. Κατά τη μέθοδο streaming, ο κώδικας Raptor εφαρμόζεται στο επίπεδο εφαρμογής πάνω από το επίπεδο του πρωτοκόλλου UDP. Αυτό μπορεί να γίνει είτε μεμονωμένα, είτε σε δέσμες από ροές UDP. Από την άλλη πλευρά, κατά την μέθοδο download, το πρωτόκολλο FLUTE χρησιμοποιεί τους κώδικες Raptor προκειμένου να παρέχει αξιοπιστία [70], [71].

Η Εικόνα 67 απεικονίζει τον τρόπο που η κωδικοποίηση FEC με κώδικες Raptor ενσωματώνεται στην στοίβα των πρωτοκόλλων για την παροχή της υπηρεσίας MBMS για τις υπηρεσίες streaming και download.

Εικόνα 67. Η στοίβα πρωτοκόλλων για την υπηρεσία MBMS.

Οι κώδικες Raptor, εκτός από το ότι προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία στο σύστημα, χαρίζουν επίσης μεγάλο βαθμό ελευθερίας στην επιλογή των παραμέτρων. Οι κώδικες Raptor είναι κώδικες fountain (κρήνης). Αυτό σημαίνει όσα επιπρόσθετα σύμβολα κωδικοποίησης χρειάζονται μπορούν να δημιουργηθούν άμεσα από τον κωδικοποιητή από τα αρχικά σύμβολα ενός αρχικού συνόλου δεδομένων. Ο αποκωδικοποιητής είναι ικανός να ανακτήσει το αρχικό σύνολο από δεδομένα λαμβάνοντας ένα πλήθος από κωδικοποιημένα σύμβολα τα οποία είναι ελάχιστα περισσότερα σε σχέση με τον αρχικό αριθμό συμβόλων. Επομένως, οι κώδικες Raptor έχουν μία λειτουργία που πλησιάζει την ιδανική λειτουργία ενός κώδικα αυτού του είδους και η οποία θα μπορούσε να ανακτήσει τα αρχικά δεδομένα από οποιοδήποτε σύνολο από κωδικοποιημένα σύμβολα που έχουν πλήθος ακριβώς όσο και τα αρχικά σύμβολα πριν την κωδικοποίηση.

Ο κώδικας Raptor που, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, χρησιμοποιείται στην υπηρεσία MBMS είναι ένας συστηματοποιημένος κώδικας fountain. Ο κώδικας αυτός παράγει n κωδικοποιημένα σύμβολα τα οποία δημιουργούν το σύνολο E . Τα σύμβολα του συνόλου E προκύπτουν από $k < n$ αρχικά σύμβολα που ανήκουν στο σύνολο C . Αυτός ο κώδικας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας συγκερασμός από διάφορους κώδικες.

Ο πιο εσωτερικός κώδικας είναι ένας μη-συστηματικός κώδικας LT με L σύμβολα εισόδου F . Ο κώδικας αυτός παρέχει την ιδιότητα fountain στους κώδικες Raptor. Αυτός ο μη-συστηματικός κώδικας δεν κατασκευάζεται με την κωδικοποίηση των αρχικών συμβόλων με τον κώδικα LT, αλλά με την κωδικοποίηση των ενδιάμεσων συμβόλων που δημιουργούνται από ένα εξωτερικό κώδικα. Αυτό σημαίνει ότι το σύνολο F απαρτίζεται από σύμβολα που είναι σύμβολα κωδικοποίησης και τα οποία δημιουργήθηκαν από ένα κώδικα που έλαβε το σύνολο D που περιέχει k σύμβολα εισόδου. Τελικά, μία συστηματική υλοποίηση του κώδικα λαμβάνεται με την εφαρμογή ενός είδους προ-επεξεργασίας στα k αρχικά σύμβολα του συνόλου C . Έτσι λαμβάνεται το σύνολο D των συμβόλων εισόδου στο μη-συστηματικό κώδικα Raptor. Για τα παραπάνω βήματα αναλυτικές περιγραφές μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [68]. Όσον αφορά σε εξειδικευμένες παραμέτρους, λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στην αναφορά [27].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην αναφορά [68], δείχνουν ότι οι κώδικες Raptor έχουν μία απόδοση πολύ κοντά στην ιδανική. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα λάθους του κώδικα είναι τέτοια που, στην περίπτωση που ληφθούν μόνο ελάχιστα σύμβολα παραπάνω από τα k , ο κώδικας μπορεί να ανακτήσει τα αρχικά δεδομένα. Για την ακρίβεια, για τιμές $k > 200$, η αναποτελεσματικότητα του κώδικα Raptor μπορεί να μοντελοποιηθεί πολύ ικανοποιητικά από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$p_f(m, k) = \begin{cases} 1 & \text{if } m < k, \\ 0.85 \times 0.567^{m-k} & \text{if } m \geq k. \end{cases} \quad (4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η ποσότητα $p_f(m, k)$ εκφράζει την πιθανότητα αποτυχίας του κώδικα όταν k είναι τα αρχικά σύμβολα και m είναι τα σύμβολα που έχουν ληφθεί από τον αποδέκτη. Έχει παρατηρηθεί ότι για διαφορετικές τιμές του k , η Εξίσωση (4) προσομοιώνει σχεδόν τέλεια την απόδοση του κώδικα. Έτσι, ενώ ένας ιδανικός κώδικας fountain, αν ίσχυε $m = k$, θα αποκωδικοποιούσε και θα ανακτούσε τα αρχικά σύμβολα με μηδενική πιθανότητα, η πιθανότητα σε αντίστοιχη περίπτωση για τον κώδικα Raptor είναι γύρω στο 85%. Παρόλα αυτά, η πιθανότητα αποτυχίας μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνεται το πλήθος των συμβόλων που λαμβάνονται στον αποκωδικοποιητή.

9.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

9.3.1 Κατανομή Multicast Χρηστών

Για τους σκοπούς της ανάλυσης κόστους που διεξάγεται, θεωρείται ένα τυπικό κινητό δίκτυο επικοινωνιών το οποίο περιλαμβάνει ένα κόμβο GGSN. Για λόγους απλότητας, στην ανάλυση που παρουσιάζεται, θεωρείται ότι η λειτουργικότητα του κέντρου εξυπηρέτησης BM-SC είναι ενσωματωμένη στον κόμβο GGSN. Αυτή η ανάλυση κόστους είναι βασισμένη σε μία πιθανοτική μέθοδο που μοντελοποιεί την κατανομή των multicast χρηστών μέσα στο δίκτυο. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τον αριθμό των multicast χρηστών μέσα στο δίκτυο, τον αριθμό των κόμβων SGSN που εξυπηρετούν multicast χρήστες, τον αριθμό των κόμβων RNC που εξυπηρετούν multicast χρήστες και τον αριθμό των κόμβων Node B που εξυπηρετούν multicast χρήστες.

Κατά την ανάλυση κόστους για τη μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιούνται διάφορες παράμετροι. Πίνακας 9 παρουσιάζει συγκεντρωμένους όλους τους όρους που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση, καθώς και την περιγραφή τους.

Πίνακας 9. Οι όροι που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση κόστους.

Όρος	Περιγραφή
D_{gs}	Κόστος μετάδοσης από GGSN σε SGSN
D_{sr}	Κόστος μετάδοσης από SGSN σε RNC
D_{rb}	Κόστος μετάδοσης από RNC σε Node B
D_{FACH}	Κόστος ασύρματης μετάδοσης πάνω από FACH
$D_{HS-DSCH}$	Κόστος ασύρματης μετάδοσης πάνω από HS-DSCH
P_g	Κόστος επεξεργασίας για unicast μετάδοση στον GGSN
P_{gM}	Κόστος επεξεργασίας για multicast μετάδοση στον GGSN
P_s	Κόστος επεξεργασίας για unicast μετάδοση στον SGSN
P_{sM}	Κόστος επεξεργασίας για multicast μετάδοση στον SGSN
P_r	Κόστος επεξεργασίας για unicast μετάδοση στον RNC
P_{rM}	Κόστος επεξεργασίας για multicast μετάδοση στον RNC
P_b	Κόστος επεξεργασίας για μετάδοση στον Node B
n_{UE}	Πλήθος από multicast χρήστες στο PLMN
n_{SGSN}	Πλήθος από SGSNs που εξυπηρετούν multicast χρήστες
n_{RA}	Πλήθος από RAs που περιέχουν multicast χρήστες
n_{RNC}	Πλήθος από RNCs που εξυπηρετούν multicast χρήστες
n_{NODEB}	Πλήθος από Node Bs που εξυπηρετούν multicast χρήστες
N_{RA}	Συνολικός αριθμός από RAs στο PLMN
N_{ra}	Πλήθος από RAs που εξυπηρετούνται από τον ίδιο SGSN
N_{rnc}	Πλήθος από RNCs που ανήκουν στην ίδια RA
N_{rra}	Πλήθος από RRAs που διαχειρίζονται από τον ίδιο RNC
N_{nodeb}	Πλήθος από Node Bs που ανήκουν στην ίδια RRA

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι όλες οι παράμετροι που αναφέρονται και αναπαριστούν κόστος, αντιστοιχούν στο κόστος για την μεταφορά ενός μόνο πακέτου.

Η πιθανοτική μέθοδος που χρησιμοποιείται, θεωρεί την κατάταξη των περιοχών RA του δικτύου σε L_{RA} κατηγορίες. Αν θεωρηθεί ότι για $1 \leq i \leq L_{RA}$, υπάρχουν $N_{(RA)i}$ περιοχές RA της κατηγορίας i , τότε ο συνολικός αριθμός από RAs μέσα στο κινητό δίκτυο δίνεται από τη σχέση:

$$N_{RA} = \sum_{i=1}^{L_{RA}} N_{(RA)i}$$

Έστω ότι η κατανομή των multicast χρηστών μέσα στις κατηγορίες των RAs ακολουθεί μία κατανομή Poisson με παραμέτρους $\lambda = \theta_{(RA)i}$ όπου $1 \leq i \leq L_{RA}$. Τότε η πιθανότητα k multicast να βρίσκονται σε μία από τις RAs της κατηγορίας i , είναι η εξής:

$$p(k, \theta_{(RA)i}) = \frac{e^{-\theta_{(RA)i}} \cdot (\theta_{(RA)i})^k}{k!}$$

Επομένως, η πιθανότητα ένας τουλάχιστο multicast χρήστης να εξυπηρετείται από τις RAs της τάξης i είναι:

$$p = 1 - p(0, \theta_{(RA)i}) = 1 - e^{-\theta_{(RA)i}}$$

Εφόσον κάθε κατηγορία i αποτελείται από $N_{(RA)i}$ RAs τότε, αν η ποσότητα $\theta_{(RA)i}$ αναπαριστά το πλήθος των multicast χρηστών για τις $N_{(RA)i}$ RAs της κατηγορίας i , τότε το συνολικό πλήθος από περιοχές RAs που περιέχουν multicast χρήστες είναι το εξής:

$$n_{RA} = \sum_{i=1}^{L_{RA}} N_{(RA)i} (1 - e^{-\theta_{(RA)i}}) \quad (5)$$

Αν η ποσότητα θ_i αναπαριστά το πλήθος των multicast χρηστών στις RAs της κατηγορίας i , ο συνολικός αριθμός των multicast χρηστών στο δίκτυο αναπαρίσταται από την εξής εξίσωση:

$$n_{UE} = \sum_{i=1}^{L_{RA}} N_{(RA)i} \cdot \theta_i \quad (6)$$

Αν N_{RA} είναι ο συνολικός αριθμός των RAs μέσα στο δίκτυο PLMN και αν υποθέσουμε ότι ένας κόμβος SGSN εξυπηρετεί ένα πλήθος από N_{ra} RAs, τότε η πιθανότητα ένας κόμβος SGSN να μην ελέγχει καμία RA που εξυπηρετεί multicast χρήστες, δίνεται από τον εξής τύπο:

$$p_{SGSN} = \begin{cases} \frac{\binom{N_{RA} - N_{ra}}{n_{RA}}}{\binom{N_{RA}}{n_{RA}}} & \text{if } n_{RA} \leq N_{RA} - N_{ra}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

Εφόσον το συνολικό πλήθος από κόμβους SGSN που εξυπηρετούν multicast χρήστες είναι $n_{SGSN} = N_{SGSN}(1 - p_{SGSN})$, τότε η ποσότητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της Εξίσωσης (7).

Αν υποθεθεί ότι όλοι οι κόμβοι RNC μέσα σε μία περιοχή RA της κατηγορίας i έχουν την ίδια πυκνότητα κατανομής του multicast πληθυσμού με την ίδια την RA, τότε ο πληθυσμός των multicast χρηστών για ένα RNC μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης μίας RA κατηγορίας i είναι $\theta_{(RNC)i} = \theta_{(RA)i} / N_{rnc}$. Επιπλέον, ο συνολικός αριθμός των κόμβων RNCs της κατηγορίας i είναι $N_{(RNC)i} = N_{(RA)i} \cdot N_{rnc}$, όπου N_{rnc} είναι ο αριθμός των κόμβων RNC που ανήκουν στην ίδια RA.

Χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αριθμός των κατηγοριών των RA είναι ίσος με τον αριθμό των κατηγοριών των RNC ($L_{RNC} = L_{RA}$). Τότε το συνολικό πλήθος των κόμβων RNC που εξυπηρετούν multicast χρήστες είναι:

$$n_{RNC} = \sum_{i=1}^{L_{RNC}} N_{(RNC)i} \cdot (1 - e^{-\theta_{(RNC)i}}) \quad (8)$$

Μία παρόμοια ανάλυση οδηγεί στη αναπαράσταση του συνολικού πλήθους των κόμβων Node B που εξυπηρετούν multicast χρήστες, ως εξής:

$$n_{NODEB} = \sum_{i=1}^{L_{NODEB}} N_{(NODEB)i} \cdot (1 - e^{-\theta_{(NODEB)i}}) \quad (9)$$

Για την Εξίσωση (9) ο πληθυσμός των multicast χρηστών για ένα κόμβο Node B σε ένα κελί που ανήκει σε RA κατηγορίας i είναι $\theta_{(NODEB)i} = \theta_{(RNC)i} / (N_{rra} \cdot N_{nodeb})$ και ο συνολικός αριθμός των κόμβων Node B της κατηγορίας i είναι $N_{(NODEB)i} = N_{(RNC)i} \cdot N_{rra} \cdot N_{nodeb}$, όπου N_{rra} είναι το πλήθος των περιοχών RRAs που τις διαχειρίζεται ο ίδιος κόμβος RNC, και N_{nodeb} είναι το πλήθος των κελιών που ανήκουν στην ίδια περιοχή RRA.

9.3.2 Θέματα Κόστους

Η εκτίμηση του κόστους γίνεται με όρους τηλεπικοινωνιακού κόστους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, παρόλο που άλλες μελέτες όπως αυτή που περιγράφεται στην αναφορά [85] θεωρούν ότι το κόστος της διαχείρισης της multicast ομάδας αποτελεί μέρος του τηλεπικοινωνιακού κόστους, η παρούσα διατριβή ακολουθεί άλλη προσέγγιση και αυτό το κόστος δε συνυπολογίζεται. Ο λόγος για αυτό είναι ότι αυτή παρούσα διατριβή εστιάζει αποκλειστικά και μόνο στην μετάδοση των δεδομένων και στο κόστος αυτής. Κατά συνέπεια, η διαχείριση της multicast ομάδας δε θα πρέπει να προστεθεί καθώς προηγείται της μετάδοσης δεδομένων. Με βάση αυτή την παραδοχή, το κόστος της διαδικασίας paging δε συνυπολογίζεται στην ανάλυση που θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Κατά τη unicast μετάδοση δεδομένων, κάθε πακέτο προωθείται ξεχωριστά από το κέντρο εξυπηρέτησης BM-SC και τους ενδιάμεσους κόμβους GGSN, SGSN και RNC. Τελικά, μεταδίδεται προς τον κινητό εξοπλισμό μέσω του επιλεγμένου καναλιού μεταφοράς του δικτύου ασύρματης πρόσβασης RAN. Φυσικά, για τη unicast μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιείται p-t-p μεταφορά μέσω του καναλιού μεταφοράς HS-DSCH. Επομένως, το κόστος για τη μετάδοση ενός και μόνο πακέτου στους n_{UE} αποδέκτες του δικτύου δίνεται από το συνολικό πλήθος των αποδεκτών πολλαπλασιασμένο επί τον κόστος για τη μετάδοση ενός μοναδικού πακέτου πάνω από το μονοπάτι μεταφοράς δεδομένων. Κατά συνέπεια το συνολικό κόστος για τη unicast μετάδοση προς πολλαπλούς αποδέκτες δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$U = n_{UE} \cdot (P_g + D_{gs} + P_s + D_{sr} + P_r + D_{rb} + P_b + D_{HS-DSCH}) \quad (10)$$

Κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων, οι κόμβοι SGSN και RNC προωθούν ένα μόνο αντίγραφο του κάθε πακέτου προς τους κόμβους RNC και Node B, αντίστοιχα. Βεβαίως η παραπάνω διαδικασία αφορά στους κόμβους που εξυπηρετούν multicast χρήστες. Από τη στιγμή που τα πακέτα λαμβάνονται στους κόμβους Node Bs που εξυπηρετούν multicast χρήστες, μεταδίδονται προς τους κατάλληλους κινητούς εξοπλισμούς UE μέσω κοινών ή διαμοιραζόμενων καναλιών. Το συνολικό κόστος για τη multicast μετάδοση δεδομένων δίνεται από την Εξίσωση (11) ως εξής:

$$M = P_{gM} + n_{SGSN} \cdot (D_{gs} + P_{sM}) + n_{RNC} \cdot (D_{sr} + P_{rM}) + C_{RAN} \quad (11)$$

Η ποσότητα C_{RAN} αναπαριστά το κόστος για τη μετάδοση δεδομένων στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης RAN. Ως κανάλι μεταφοράς στο RAN μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το FACH, είτε το HS-DSCH. Επομένως, ο υπολογισμός της ποσότητας C_{RAN} μεταβάλλεται ανάλογα με το κανάλι μεταφοράς που χρησιμοποιείται. Η εξίσωση που ακολουθεί δίνει αυτό το κόστος:

$$C_{RAN} = \begin{cases} n_{NODEB} \cdot (D_{FACH} + D_{rb} + P_b) & \text{if channel is FACH,} \\ n_{UE} \cdot (D_{HS-DSCH} + D_{rb} + P_b) & \text{if channel is HS-DSCH.} \end{cases} \quad (12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η ποσότητες $D_{HS-DSCH}$ και D_{FACH} αναπαριστούν το κόστος πάνω από τη διεπαφή Uu. Για την ακρίβεια, η ποσότητα D_{FACH} αναπαριστά το κόστος της χρήσης ενός καναλιού FACH προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι χρήστες που βρίσκονται εντός ενός κελιού. Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα $D_{HS-DSCH}$ αναπαριστά το κόστος της χρήσης ενός μοναδικού καναλιού HS-DSCH για τη μετάδοση των δεδομένων σε ένα μόνο multicast χρήστη μέσα στο κελί.

Όσον αφορά στο κόστος πάνω από τη διεπαφή Iub, αν ένα κανάλι FACH χρησιμοποιηθεί ως κανάλι μεταφοράς, τότε κάθε multicast πακέτο στέλνεται μόνο μία φορά πάνω από τη διεπαφή Iub και έπειτα μεταδίδεται προς τους multicast αποδέκτες μέσω του αντίστοιχου κόμβου Node B. Η χρήση του καναλιού HS-DSCH για τη μετάδοση των multicast πακέτων σημαίνει ότι μια ξεχωριστή χρονοσχιμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά των multicast δεδομένων σε κάθε multicast αποδέκτη, όσον αφορά σε κάθε Node B.

9.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ

Ο μηχανισμός εξομοίωσης που αναπτύχθηκε είναι πλήρως εναρμονισμένος με τις προδιαγραφές του οργανισμού 3GPP. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να υπάρξει αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων, ο οργανισμός 3GPP καθορίζει ότι το κέντρο εξυπηρέτησης BM-SC συνδυάζει την τεχνική του FEC με χρήση κωδίκων Raptor μαζί με την διαδικασία αποκατάστασης του αρχείου [27]. Επιπλέον, ο οργανισμός 3GPP συστήνει ότι η αναμεταδόσεις για κατά τη διαδικασία αποκατάστασης του αρχείου θα πρέπει να εκτελεστεί στα πλαίσια της unicast μετάδοσης. Αυτό γιατί η δημιουργία ενός νέου multicast φορέα για την αναμετάδοση πακέτων είναι ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία. Κατά συνέπεια, ο μηχανισμός που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε συνδυάζει τις εξής βασικές διαδικασίες για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων και ενσωματώνει τα εξής πλαίσια λειτουργίας:

- Multicast φορείς και χρήση FEC στο επίπεδο εφαρμογής με χρήση Raptor codes.
- Unicast φορείς για επιλεκτική αναμετάδοση των χαμένων πακέτων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μηχανισμός εξομοίωσης που δημιουργήθηκε στοχεύει προς δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά στην ανάλυση του κόστους της χρήσης FEC στο επίπεδο εφαρμογής για την υπηρεσία MBMS. Το σχετικό τμήμα του μηχανισμού εξομοίωσης περιγράφεται στην παράγραφο 9.4.1. Η άλλη κατεύθυνση αφορά στην επίδραση του FEC στον έλεγχο ισχύος στην υπηρεσία MBMS. Αυτή η οπτική του μηχανισμού εξομοίωσης περιγράφεται στις παραγράφους 9.4.2 και 9.4.3.

9.4.1 Περιβάλλον Εξομοίωσης

Το τμήμα του μηχανισμού που αφορά την ανάλυση κόστους ενσωματώνει όλες τις ιδιότητες ενός τυπικού κώδικα Raptor ο οποίος έχει οριστεί και περιγραφεί από τον οργανισμό 3GPP στην προδιαγραφή [27] για τη μετάδοση δεδομένων στην υπηρεσία MBMS. Αξίζει να αναφερθεί ότι δεδομένου ότι συνολικά n σύμβολα κωδικοποίησης παράγονται από $k < n$ αρχικά σύμβολα, τότε η επιβάρυνση που προστίθεται εξαιτίας της κωδικοποίησης Raptor, δηλαδή ο αριθμός των συμβόλων αποκατάστασης προς τον αριθμό των αρχικών συμβόλων, ισούται με το λόγο $(n - k) / k$. Δεδομένου ότι το μέγεθος των πακέτων είναι σταθερό, η επιβάρυνση που προσδίδει το FEC προκειμένου να μεταδοθεί ένα δεδομένο ποσό πληροφορίας είναι επίσης ίσο με τον παραπάνω λόγο. Επομένως η επιβάρυνση με όρους πλήθους πακέτων που χρειάζεται για την μεταφορά ενός δεδομένου ποσού πληροφορίας είναι $(n - k) / k$.

Κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης που λαμβάνει χώρα σε κάθε κινητό εξοπλισμό UE, υπάρχει μία πιθανότητα αποτυχίας για την ανάκτηση των αρχικών συμβόλων που δίνεται από την Εξίσωση (4). Όταν ένας ρυθμός απώλειας πακέτων $p_{loss} > 0$ εφαρμόζεται πάνω στο φορέα της υπηρεσίας MBMS, ο αριθμός m των συμβόλων που λαμβάνονται μπορεί να γίνει μικρότερος από τα n σύμβολα που μεταδόθηκαν αρχικά. Σαν αποτέλεσμα των απωλειών πακέτων, η πιθανότητα αποτυχίας $p_f(m, k)$ αυξάνεται. Αν σε ένα κινητό εξοπλισμό UE, η ανάκτηση των k αρχικών συμβόλων μέσω της διαδικασίας αποκωδικοποίησης αποτύχει, τότε επιλεκτική αναμετάδοση των χαμένων πακέτων γίνεται από το BM-SC μέσω ενός unicast πλαισίου μετάδοσης [27].

Για τον ορισμό του περιβάλλοντος εξομοίωσης, θεωρείται μία τυπική τοπολογία ενός δικτύου PLMN με παραμέτρους $N_{SGSN} = 10$, $N_{ra} = 10$, $N_{rnc} = 10$, $N_{rra} = 5$ και $N_{nodeb} = 5$. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι έχουμε δύο κατηγορίες από RAs: οι RAs της κατηγορίας $i = 1$ έχουν πληθυσμό multicast χρηστών που δίνεται από τη μεταβλητή $\theta_1 = 1/\delta$ ενώ οι RAs της κατηγορίας $i = 2$ έχουν πληθυσμό multicast χρηστών που δίνεται από τη μεταβλητή $\theta_2 = \delta$. Αν θεωρήσουμε ότι η μεταβλητή α δηλώνει το ποσοστό της κατηγορίας $i = 1$ επί του συνολικού αριθμού των RAs, τότε η τιμή $(1 - \alpha)$ είναι το ποσοστό της κατηγορίας $i = 2$. Επομένως, το πλήθος των RAs της κατηγορίας $i = 1$ δίνεται από τον τύπο $N_{(RA)1} = \alpha \cdot N_{RA}$ και το πλήθος των RAs της κατηγορίας $i = 2$ δίνεται από τον τύπο $N_{(RA)2} = (1 - \alpha) \cdot N_{RA}$. Ομοίως, κάθε RA των κατηγοριών $i \in \{1, 2\}$ διαιρείται σε N_{rnc} RNCs της ίδιας κατηγορίας i , και κάθε κόμβος RNC των κατηγοριών $i \in \{1, 2\}$ υποδιαιρείται σε $N_{rra} \cdot N_{nodeb}$ κόμβους Node Bs της ίδιας τάξης.

Η εκτίμηση του κόστους της μετάδοσης ενός πακέτου (D_{xx}) σε κάθε τμήμα του δικτύου, εξαρτάται από τις εξής δύο παραμέτρους:

- Το πλήθος των βημάτων για την μετάδοση μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται στα άκρα αυτού του τμήματος του δικτύου.

- Τη χωρητικότητα των συνδέσμων του συγκεκριμένου τμήματος του δικτύου.

Πίνακας 10 παρουσιάζει τις τυπικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς της πειραματικής αξιολόγησης που διεξάγεται.

Πίνακας 10. Υπολογισμός του κόστους μετάδοσης.

Σύνδεσμος	Χωρητικότητα συνδέσμου (k)	Πλήθος βημάτων (l)	Κόστος μετάδοσης (D)
GGSN-SGSN	$k_{gs} = 0.5$	$l_{gs} = 6$	$D_{gs} = 12$
SGSN-RNC	$k_{sr} = 0.5$	$l_{sr} = 3$	$D_{sr} = 6$
RNC-Node B	$k_{rb} = 0.2$	$l_{rb} = 1$	$D_{rb} = 5$

Είναι προφανές από τις Εξισώσεις (10) και (11) ότι τα διάφορα κόστη που χρησιμοποιούνται από το μηχανισμό εξαρτώνται επίσης από διάφορες άλλες παραμέτρους. Η εργασία που παρουσιάζεται στην αναφορά [33] έχει χρησιμοποιηθεί σα βάση για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων αυτών και ο Πίνακας 11 τις παρουσιάζει.

Πίνακας 11. Οι τιμές των παραμέτρων εξομοίωσης.

D_{rb}	P_g	P_s	P_r	P_{gM}	P_{sM}	P_{rM}	P_b	D_{FACH}	$D_{HS-DSCH}$
5	1	1	1	2	2	2	1	16	12

9.4.2 Ελεγχος Ισχύος στη Μέθοδο Streaming

Η βασική δυσκολία στην αξιολόγηση του ελέγχου ισχύος στην υπηρεσία MBMS είναι η ύπαρξη ενός πολύ μεγάλου αριθμού από παραμέτρους στο σύστημα, καθώς επίσης και η τεράστια πολυπλοκότητα των εμπλεκόμενων τμημάτων του δικτύου. Η πρόθεση είναι να γίνει επιλογή παραμέτρων με ένα τρόπο όσο το δυνατό πιο γενικό προκειμένου να προκύψει ένα περιβάλλον προσομοίωσης που είναι αντιπροσωπευτικό του συστήματος και της συμπεριφοράς του στα πλαίσια του εφικτού. Επομένως, για τους σκοπούς των πειραμάτων εξομοίωσης, θεωρείται ένα τυπικό περιβάλλον macro-cell. Ο μηχανισμός εξομοίωσης λαμβάνει υπόψη της ιδιότητες των καναλιών μεταφοράς του ασύρματου δικτύου πρόσβασης RAN καθώς και τα χαρακτηριστικά τους όσον αφορά στην κατανάλωση ισχύος. Για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών έχουν ληφθεί υπόψη οι προδιαγραφές που περιγράφονται από τον οργανισμό 3GPP στην αναφορά [23]. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η εξέταση των διαφόρων φαινομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων κινητά δίκτυα και μάλιστα με ένα ρεαλιστικό τρόπο, για διάφορες ρυθμίσεις του δικτύου και συνθήκες καναλιών. Ο στόχος είναι η διεξαγωγή πειραμάτων εξομοίωσης που καλύπτουν και τις δύο μεθόδους παροχής της υπηρεσίας MBMS προς του χρήστες. Επομένως, ο μηχανισμός έχει τη δυνατότητα της εξομοίωσης τη μέθοδο streaming όπως επίσης και τη μέθοδο download. Οι λεπτομέρειες σχετικά με κάθε μέθοδο περιγράφονται στην παρούσα και την επόμενη παράγραφο.

Πίνακας 12 παρουσιάζει τις παραμέτρους του περιβάλλοντος εξομοίωσης. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης, δεν χρησιμοποιείται STTD.

Ο μηχανισμός εξομοίωσης λαμβάνει υπόψη της ιδιότητες των καναλιών μεταφοράς του ασύρματου δικτύου πρόσβασης RAN καθώς και τα χαρακτηριστικά τους όσον αφορά στην κατανάλωση ισχύος. Για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών έχουν ληφθεί υπόψη οι προδιαγραφές που περιγράφονται από τον οργανισμό 3GPP στην αναφορά [23]. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η εξέταση των διαφόρων φαινομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων κινητά δίκτυα και μάλιστα με ένα ρεαλιστικό τρόπο, για διάφορες ρυθμίσεις του δικτύου και συνθήκες καναλιών. Ο στόχος είναι η διεξαγωγή πειραμάτων εξομοίωσης που καλύπτουν και τις δύο μεθόδους παροχής της υπηρεσίας MBMS προς του χρήστες. Επομένως, ο μηχανισμός έχει τη δυνατότητα της εξομοίωσης τη μέθοδο streaming όπως επίσης και τη μέθοδο download. Οι λεπτομέρειες σχετικά με κάθε μέθοδο περιγράφονται στην παρούσα και την επόμενη παράγραφο.

Πίνακας 12. Παράμετροι του περιβάλλοντος εξομοίωσης.

Παράμετρος	Τιμή
Cellular layout	Hexagonal grid
Number of cells	18
Site-to-site distance	1 km
Maximum BS Tx power	20 W
Other BS Tx power	5 W
Common pilot channel power	2 W
Common channel power	1 W
Propagation model	Okumura Hata
Multipath channel	Vehicular A (3 km/h)
Orthogonality factor	0.5

Για τη μελέτη της μεθόδου για τη μετάδοση δεδομένων streaming, εξομοιώθηκαν μεταδόσεις μέσω καναλιών και των δύο ειδών: HS-DSCH και FACH. Για την περίπτωση του καναλιού HS-DSCH, ο μηχανισμός εξομοίωσης υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ για τη μετάδοση της πληροφορίας streaming μέσω της υπηρεσίας MBMS. Η ισχύς εξαρτάται από το πλήθος των χρηστών και, επομένως, εξετάζεται ένα πλήθος χρηστών έως ένα μέσο όρο 20 χρηστών ανά κελί. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του καναλιού HS-DSCH για τη μετάδοση δεδομένων της υπηρεσίας MBMS προς περισσότερους από 20 χρήστες ανά κελί δεν έχει νόημα αφού προκαλεί εκτεταμένη σπατάλη ισχύος σε σύγκριση με τη χρήση καναλιού FACH [36]. Κατά τη διάρκεια της εξομοίωσης της μετάδοσης δεδομένων streaming πάνω από το κανάλι HS-DSCH και με βάση το επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης, ο μηχανισμός θέτει σε ένα ορισμένο επίπεδο το ρυθμό BLER που προκαλείται από το κανάλι. Θέτοντας έναν απαιτούμενο στόχο στο BLER για τον αποδέκτη, ο αποστολέας προσθέτει ένα κατάλληλο ποσό από επιπλέον σύμβολα για το FEC

προκειμένου ο αποδέκτης να ανακτήσει τη πληροφορία streaming με τον επιδιωκόμενο BLER μετά την αποκωδικοποίηση του FEC.

Το κανάλι μεταφοράς FACH πολυπλέκεται σε ένα κανάλι S-CCPCH και επομένως υπάρχουν συγκεκριμένοι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν με βάση τη μορφή της σχισμής του καναλιού S-CCPCH. Στα πειράματα εξομοίωσης που διεξάγονται χρησιμοποιείται κανάλι S-CCPCH με μορφή σχισμής 10 προκειμένου να επιτευχθεί ένας ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 64 Kbps [3]. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων, επιλέγεται η εξομοίωση μίας ροής πολυμεσικών δεδομένων ρυθμού 64 Kbps, και, εφόσον η κωδικοποίηση FEC προσθέτει επιπλέον σύμβολα στα αρχικά δεδομένα, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κωδικοποίηση FEC χωρίς να μεταδοθούν τα δεδομένα χωρίς να χρησιμοποιηθεί υψηλότερο επίπεδο ρυθμού μετάδοσης στο κανάλι S-CCPCH. Αυτό σημαίνει ότι ένας ρυθμός μετάδοσης των 128 Kbps, ο οποίος αντιστοιχεί στη μορφή σχισμής 12, θα είναι απαραίτητος για την παράδοση των πολυμεσικών ροών των 64 Kbps μαζί με την επιπλέον πληροφορία για το μηχανισμό FEC. Φυσικά, η χρήση της μορφής σχισμής 12 για τη μετάδοση μίας πολυμεσικής ροής δεδομένων ρυθμού 64 Kbps προκαλεί τεράστια σπατάλη ισχύος στο δίκτυο πρόσβασης. Κατά συνέπεια, έχει επιλεγεί να μη χρησιμοποιηθεί κωδικοποίηση FEC για τη μετάδοση δεδομένων streaming πάνω από κανάλι FACH. Ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER για τη μετάδοση δεδομένων μέσω του καναλιού FAC τίθεται στο 1% και επομένως ο Πίνακας 8 δίνει την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης για τα διάφορα επίπεδα κάλυψης των κελιών.

9.4.3 Ελεγχος Ισχύος στη Μέθοδο Download

Για τους σκοπούς της μελέτης της μεθόδου download, εξομοιώνεται η μετάδοση δεδομένων πάνω από τα κανάλια μεταφοράς HS-DSCH και FACH. Αντίθετα με τη μέθοδο streaming για τη μέθοδο download εφαρμόζεται FEC με κώδικες Raptor στο επίπεδο εφαρμογής και για τους δύο τύπους καναλιών μεταφοράς. Ο προτεινόμενος μηχανισμός για τη μέθοδο download ακολουθεί τις προδιαγραφές που περιγράφονται από τον οργανισμό στις αναφορές [13] και [27]. Για την ακρίβεια, η τεχνική του FEC με κώδικες Raptor και η τεχνική της επιλεκτικής αναμετάδοσης συνδυάζονται για την παροχή μίας αξιόπιστης μετάδοσης με τη μέθοδο download. Κατά συνέπεια, ο μηχανισμός μας έχει μία υβριδική λειτουργικότητα όσον αφορά στον έλεγχο λαθών. Επιπλέον, στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο οργανισμός 3GPP συστήνει ότι η αναμετάδοση των χαμένων πακέτων θα πρέπει να γίνει πάνω από ένα επιλεγμένο πλαίσιο για unicast. Αυτό γιατί στις περισσότερες περιπτώσεις η εγκατάσταση ενός καινούριου φορέα multicast με σκοπό την αναμετάδοση πακέτων είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Ο μηχανισμός που σχεδιάσαμε και υλοποιήσαμε συνδυάζει και τις δύο βασικές διαδικασίες αποκατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι συνδυάζει multicast φορείς για την υπηρεσία MBMS καθώς και unicast φορείς. Αξίζει να διευκρινιστεί ότι όταν ένας ορισμένος ρυθμός BLER εφαρμόζεται πάνω σε έναν φορέα MBMS, το πλήθος των ληφθέντων συμβόλων m μπορεί να γίνει μικρότερο από το πλήθος n των συμβόλων που μεταδόθηκαν αρχικά. Σαν αποτέλεσμα αυτών των απωλειών, η πιθανότητα αποτυχίας $p_f(m,k)$ αυξάνει. Αν η ανάκτηση των k αρχικών συμβόλων μέσω της διαδικασίας αποκωδικοποίησης αποτύχει σε ένα κινητό εξοπλισμό UE, τότε η αναμετάδοση των χαμένων πακέτων χρησιμοποιείται από τον κινητό εξοπλισμό για την ανάκτησή τους από το BM-SC μέσω ενός πλαισίου unicast μετάδοσης.

9.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

9.5.1 Κόστος έναντι Πυκνότητας Χρηστών

Η Εικόνα 68 απεικονίζει το συνολικό κόστος σε συνάρτηση με την παράμετρο α όταν η πιθανότητα p_{loss} είναι 5% και η παράμετρος δ ισούται με 500 για διάφορα ποσά από επιπλέον σύμβολα.

Εικόνα 68. Συνολικό κόστος συναρτήσει του α όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\delta = 500$.

Πριν την εξήγηση και την ανάλυση για την Εικόνα 68 θα πρέπει να διευκρινιστεί τι αναπαριστά η παράμετρος α ποιοτικά. Πιο αναλυτικά η τιμή της παραμέτρου α δηλώνει το ποσοστό των περιοχών RA που ανήκουν στην κατηγορία $i = 1$. Επομένως, οι ιδιότητες των RAs που ανήκουν είτε στην κατηγορία $i = 1$ είτε στην $i = 2$ επικρατούν καθώς η τιμή της παραμέτρου α πλησιάζει το μηδέν ή τη μονάδα αντίστοιχα. Όσον αφορά στις ιδιότητες της κάθε κατηγορίας RAs, αυτές καθορίζονται από την τιμή της παραμέτρου δ . Αν $\delta \gg 1$, οι RAs της κατηγορίας $i = 1$ έχουν ένα μικρό πληθυσμό από multicast χρήστες ενώ οι RAs της κατηγορίας $i = 2$ έχουν ένα μεγάλο πληθυσμό από multicast χρήστες. Κατά συνέπεια, η παράμετρος α αναπαριστά ποιοτικά την πυκνότητα των multicast χρηστών με την έννοια ότι όσο η τιμή της παραμέτρου α αυξάνεται, ο αριθμός των περιοχών RA με μικρό πληθυσμό multicast χρηστών αυξάνεται καθώς και το αντίστροφο.

Αυτό που είναι προφανές είναι ότι το συνολικό κόστος μειώνεται όσο η παράμετρος α αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι, καθώς η παράμετρος α αυξάνεται, ο αριθμός από RAs χωρίς καθόλου multicast χρήστες αυξάνεται επίσης. Επομένως, ο συνολικός πληθυσμός των multicast χρηστών βρίσκεται σε ένα περιορισμένο αριθμό από RAs. Για μικρές επιβαρύνσεις λόγω της κωδικοποίησης FEC το κόστος μειώνεται εκθετικά σε σχέση με την τιμή του α ενώ για μεγάλα FEC overheads το κόστος μειώνεται γραμμικά.

Για μια δεδομένη τιμή της παραμέτρου α , το συνολικό κόστος μειώνεται καθώς το overhead εξαιτίας της κωδικοποίησης FEC αυξάνεται, αλλά μέχρι ενός ορισμένου κάτω ορίου. Όταν το overhead που χρησιμοποιείται ξεπεράσει την τιμή που αντιστοιχεί σε αυτό το κάτω όριο, το συνολικό κόστος αρχίζει να αυξάνεται. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι η προσθήκη νέων συμβόλων ανάκτησης αυξάνεται γραμμικά το συνολικό κόστος ενώ έχει ελάχιστη συνεισφορά στην ανάκτηση των αρχικών συμβόλων. Το βέλτιστο overhead λόγω της κωδικοποίησης FEC εξαρτάται

από τις παραμέτρους του συστήματος. Για το σενάριο που αντιστοιχεί στην Εικόνα 68 το βέλτιστο overhead του FEC είναι γύρω στο 13.5%. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται όταν εφαρμόζονται διαφορετικοί ρυθμοί απώλειας πακέτων.

9.5.2 Κόστος έναντι Πλήθους Χρηστών

Ένα άλλο θέμα που εξετάζεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εξομοίωσης είναι το συνολικό κόστος έναντι του πληθυσμού των multicast χρηστών. Το μέγεθος του πληθυσμού των multicast χρηστών στις κατηγορίες από RAs που έχουν οριστεί, προσδιορίζεται από την τιμή της παραμέτρου δ . Όσο η τιμή της παραμέτρου δ αυξάνεται, η πιθανότητα να μην υπάρχουν multicast μέλη σε μία περιοχή της κατηγορίας $i = 1$ αυξάνεται ενώ αντίθετα ο πληθυσμός των multicast χρηστών στις RAs της κατηγορίας $i = 2$ αυξάνεται. Στις παρακάτω εικόνες σχεδιάζεται το συνολικό κόστος έναντι της παραμέτρου δ για ρυθμό απώλειας πακέτων 5% και για δύο διαφορετικές τιμές της παραμέτρου α .

Όταν η τιμή της παραμέτρου $\alpha = 0.1$, το συνολικό κόστος σταθερά αυξάνεται καθώς η τιμή της παραμέτρου δ αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά είναι λογική δεδομένου ότι η τιμή της παραμέτρου α είναι χαμηλή και, κατά συνέπεια, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από RAs με πολλούς multicast χρήστες να βρίσκονται μέσα σε αυτές. Όταν η τιμή της παραμέτρου δ αυξάνεται, ο αριθμός των multicast χρηστών σε αυτές τις RAs αυξάνεται, όπως επίσης και το συνολικό κόστος. Επιπλέον, παρατηρείται ότι υπάρχει ένα βέλτιστο overhead για το FEC που δημιουργεί ένα ελάχιστο συνολικό κόστος για μία δεδομένη τιμή της παραμέτρου δ . Για το σενάριο που απεικονίζεται στην Εικόνα 69 αυτό το βέλτιστο overhead για το FEC είναι 14%. Για ένα δεδομένο ρυθμό απώλειας πακέτων, αυτό το βέλτιστο overhead όσον αφορά στο FEC αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου δ . Μία ποιοτική εξήγηση αυτού του γεγονότος είναι ότι, καθώς ο πληθυσμός των multicast χρηστών αυξάνεται, ο αριθμός των αποδεκτών που δεν μπορούν να ανακτήσουν ένα πακέτο που αποστέλλεται αυξάνεται, και το ίδιο ισχύει και για το κόστος λόγω των αναμεταδόσεων πακέτων.

Εικόνα 69. Συνολικό κόστος έναντι του δ όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\alpha = 0.1$.

Όταν η τιμή της παραμέτρου $\alpha = 0.9$, τότε υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από RAs με λίγους ή καθόλου αποδέκτες μέσα σε αυτές. Για μικρές τιμές της παραμέτρου δ το κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση FEC ή όχι. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος της multicast μετάδοσης δεν εξαρτάται από τον αριθμό των ουσιαστικών αποδεκτών αλλά από τον αριθμό των κελιών όπου

αυτοί βρίσκονται. Όσο η τιμή της παραμέτρου δ αυξάνεται, ο πληθυσμός των multicast χρηστών αυξάνεται και το ίδιο κάνει και το συνολικό κόστος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το βέλτιστο overhead για την κωδικοποίηση FEC αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου δ .

Εικόνα 70. Συνολικό κόστος έναντι του δ όταν $p_{loss} = 5\%$ και $\alpha = 0.9$.

9.5.3 Διάσταση Κώδικα έναντι Ρυθμού Απώλειας

Το τελευταίο πείραμα που διεξάγεται και σχετίζεται με την ανάλυση κόστους είναι η αξιολόγηση του πώς μεταβάλλεται το βέλτιστο overhead έναντι του ρυθμού απώλειας πακέτων. Στην Εικόνα 71 παρατηρούμε ότι το βέλτιστο overhead εξαιτίας της κωδικοποίησης FEC αυξάνεται καθώς η πιθανότητα απώλειας πακέτων αυξάνεται. Για ρυθμό απώλειας πακέτων $p_{loss} > 1\%$ η αύξηση είναι γραμμική με συντελεστή με τιμή γύρω στο 1.3. Για μικρές τιμές του ρυθμού p_{loss} το βέλτιστο overhead αυξάνεται ταχύτατα καθώς ο ρυθμός απώλειας πακέτων αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη απόδοση των κωδίκων Raptor όταν χρησιμοποιούνται μικροί αριθμοί από πρόσθετα σύμβολα για την κωδικοποίηση FEC.

Εικόνα 71. Βέλτιστο overhead έναντι ρυθμού απώλειας πακέτων όταν $\alpha = 0.1$.

9.5.4 Ελεγχος Ισχύος στη Μέθοδο Streaming

Για την αξιολόγηση της μεθόδου streaming, εξομοιώθηκε η μετάδοση μιας πολυμεσικής ροής δεδομένων ρυθμού 64 Kbps πάνω από κανάλια HS-DSCH και FACH. Ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER τέθηκε στο 1%. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER είναι ο ρυθμός BLER ο οποίος προκύπτει μετά την αποκωδικοποίηση FEC στον αποδέκτη και ο οποίος προσδιορίζεται από την πιθανότητα $p_f(m,k)$. Αυτό σημαίνει ότι ο πραγματικός ρυθμός BLER στο ασύρματο κανάλι μπορεί να είναι πάνω από 1%.

Για την περίπτωση της μετάδοσης πάνω από το κανάλι HS-DSCH, εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

1. Μετάδοση streaming πάνω από το κανάλι HS-DSCH χωρίς FEC και με ρυθμό BLER στο κανάλι ίσο με 1%.
2. Μετάδοση streaming πάνω από το κανάλι HS-DSCH με FEC και με ρυθμό BLER στο κανάλι ίσο με 5%.
3. Μετάδοση streaming πάνω από το κανάλι HS-DSCH με FEC και με ρυθμό BLER στο κανάλι ίσο με 10%.
4. Μετάδοση streaming πάνω από το κανάλι HS-DSCH με FEC και με ρυθμό BLER στο κανάλι ίσο με 20%.

Στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER μετά την αποκωδικοποίηση FEC στον αποδέκτη τίθεται σε αυτόν που απαιτείται, δηλαδή στην τιμή 1%.

Εικόνα 72. Μέση ισχύς μετάδοσης για μία πολυμεσική ροή ρυθμού 64 Kbps. Ο επιδιωκόμενος ρυθμός BLER έχει τεθεί στο 1%.

Οι μεταδόσεις p-t-p πάνω από κανάλια HS-DSCH είναι πιο αποδοτικές για ένα περιορισμένο αριθμό από χρήστες. Σε περίπτωση που ο αριθμός των αποδεκτών ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι, τότε συνίσταται η εφαρμογή μετάδοσης p-t-m [36]. Κατά συνέπεια στην ανάλυσή μας τα επίπεδα ισχύος της μετάδοσης p-t-m πάνω από κανάλι FACH χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς για μια αποδοτική επιλογή του καναλιού μεταφοράς. Για την ακρίβεια, έχει επίσης εξομοιωθεί η μετάδοση της ίδιας ροής πολυμεσικών δεδομένων πάνω από κανάλι FACH χωρίς την εφαρμογή

FEC στο επίπεδο της εφαρμογής. Ο ρυθμός BLER που εφαρμόζεται σε αυτό τον τύπο μετάδοσης έχει επίσης τεθεί στο επιδιωκόμενο 1%.

Τα αποτελέσματα εξομοίωσης για τη μέθοδο μετάδοσης streaming παρατίθενται στην Εικόνα 72. Η Εικόνα 72 δείχνει τη μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος μετάδοσης για την παράδοση της πολυμεσικής ροής των 64 Kbps πάνω από τα εξεταζόμενα κανάλια μεταφοράς ως συνάρτηση του αριθμού των αποδεκτών. Τα τρία διαφορετικά επίπεδα στην ισχύ μετάδοσης για το κανάλι FACH που απεικονίζονται στην Εικόνα 72 αντιστοιχούν στην απαιτούμενη ισχύ για την κάλυψη του κάθε κελιού σε ποσοστά 70%, 90%, και 100% τα οποία επιλέχθηκαν ενδεικτικά και τα οποία παρουσιάζει ο Πίνακας 8.

Αυτό που μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την Εικόνα 72 είναι ότι για σχετικά μεγάλο αριθμό multicast αποδεκτών, η προσθήκη της κωδικοποίησης FEC αυξάνει την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης. Για παράδειγμα, η μετάδοση της ροής πολυμέσων σε οκτώ χρήστες της υπηρεσίας MBMS, πάνω από ένα κανάλι HS-DSCH και με ρυθμό BLER ίσο με 20%, απαιτεί 47% περισσότερη ισχύ από τη μετάδοση πάνω από ένα κανάλι HS-DSCH με ρυθμό BLER ίσο με 1%. Κατά συνέπεια, η αύξηση στην κατανάλωση ισχύος που προκαλείται εξαιτίας από τα επιπλέον σύμβολα της κωδικοποίησης FEC είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την αύξηση που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί ένας χαμηλότερος ρυθμός BLER. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση ενός σχετικά μικρού αριθμού από αποδέκτες, η απαιτούμενη ισχύς για τη μετάδοση της κωδικοποίησης FEC σχεδόν ταυτίζεται με την απαιτούμενη ισχύ για την περίπτωση όπου δεν υποστηρίζεται FEC.

Τέλος, κάτι πολύ σημαντικό είναι ότι τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν ο αριθμός των αποδεκτών ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι, η κατανάλωση ισχύος για το κανάλι HS-DSCH αυξάνεται ραγδαία. Στις περιπτώσεις αυτές η εφαρμογή μετάδοσης p-t-m είναι πιο αποδοτική. Στο δίκτυο που εξετάζεται αυτό το κατώφλι προσδιορίζεται σε ένα πλήθος 10 με 11 multicast αποδέκτες ανάλογα με τον BLER που εφαρμόζεται στο κανάλι.

9.5.5 Ελεγχος Ισχύος στη Μέθοδο Download

Το βασικό σενάριο που εξομοιώθηκε για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας της κωδικοποίησης FEC όσον αφορά στην ισχύ κατά τη μετάδοση με τη μέθοδο download, είναι η multicast μεταφορά ενός αρχείου συγκεκριμένου μεγέθους και με στατικά δεδομένα. Το αρχείο μεταδίδεται προς μία ομάδα από χρήστες που έχουν τοποθετηθεί τυχαία σε κάθε κελί. Επιλέγεται η μετάδοση ενός αρχείου μεγέθους 512 KB το οποίο μπορεί να αναπαριστά ένα μικρό clip πολυμέσων, μία φωτογραφία ή ένα ring tone λογικού μεγέθους. Για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, επιλέγονται φορείς που υποστηρίζουν 64 Kbps. Οι εξομοιώσεις που διεξάγονται αφορούν σε διάφορους αριθμούς από αποδέκτες MBMS ανά κελί. Οι αρχικές θέσεις των αποδεκτών επιλέγονται τυχαία και κατανέμονται ομοιόμορφα στην περιοχή κάλυψης του κάθε κελιού.

Ο μηχανισμός για τη μέθοδο μετάδοσης download χρησιμοποιεί και τους δύο τύπους καναλιών μεταφοράς, HS-DSCH και FACH, για τη μετάδοση των αρχείων δεδομένων. Αντίθετα με την εξομοίωση της μετάδοσης δεδομένων streaming, η κωδικοποίηση FEC με χρήση κωδίκων Raptor εφαρμόζεται και στους δύο τύπους καναλιών μεταφοράς. Κατά την αξιολόγηση των διαφόρων ρυθμίσεων του καναλιού κατά τη μέθοδο download, το ενδιαφέρον εστιάζεται σε τρία ζητήματα: την

απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης, την καταναλισκόμενη ενέργεια μετάδοσης και τον απαραίτητο χρόνο για το κατέβασμα του αρχείου.

Όσον αφορά στην απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης, αυτή είναι σχεδόν η ίδια με την περίπτωση της μεθόδου streaming η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 72. Μερικές ελάχιστες διαφοροποιήσεις υπάρχουν και οφείλονται στα μεγέθη των επικεφαλίδων των πακέτων για τα πρωτόκολλα στο επίπεδο των MBMS User Services (πρωτόκολλο RTP έναντι FLUTE), όπως φαίνεται στην Εικόνα 67, [88]. Πράγματι, οι επικεφαλίδες των πρωτοκόλλων για τη μετάδοση streaming είναι απλούστερες και, κατά συνέπεια, μία ελαφρώς μικρότερη ισχύς μετάδοσης απαιτείται σε σχέση με την περίπτωση των υπηρεσιών για μετάδοση δεδομένων download. Τα αποτελέσματα για τη μέση συνολική ισχύ μετάδοσης κατά τη μετάδοση δεδομένων download δεν απεικονίζεται καθώς ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην Εικόνα 72.

Το άλλο ζήτημα το οποίο εξετάζεται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εξομοίωσης είναι η καταναλισκόμενη ενέργεια μετάδοσης. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας για τη μετάδοση μίας ορισμένης ποσότητας δεδομένων είναι ένας σημαντικός στόχος για τις εταιρίες κινητών επικοινωνιών, συνεπώς η απαιτούμενη ενέργεια μετάδοσης είναι μία σημαντική μετρική. Κατά την αξιολόγηση που διεξάγεται εφαρμόζονται διαφορετικοί ρυθμοί BLER πάνω στα κανάλια. Στη συνέχεια, οι απαιτήσεις ισχύος για κάθε ρύθμιση καναλιού υπολογίζονται για διάφορες κατανομές των multicast χρηστών. Οι ρυθμοί BLER που εφαρμόζονται είναι της τάξης του 5%, 10% και 20% και η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάδοση του εξεταζόμενου αρχείου εκτιμάται με μονάδες Joules (J), όπου $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ sec}$. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης προκύπτει άμεσα ότι, από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας, το σημείο εναλλαγής από όπου η μετάδοση p-t-m μέσω του καναλιού FACH γίνεται πιο αποδοτική σε σχέση με αυτή μέσω HS-DSCH, είναι ένας αριθμός μεταξύ 10 και 11 κινητών χρηστών ανά κελί. Για την ακρίβεια, όλα τα αποτελέσματα εξομοίωσης δείχνουν ότι η χρήση της μεθόδου μετάδοσης download με κανάλι HS-DSCH κοστίζει περισσότερο όταν οι κινητοί εξοπλισμοί UEs ανά κελί είναι πάνω από 10. Αντίθετα, στην αντίστοιχη περίπτωση όπου το κανάλι μεταφοράς είναι το κοινό κανάλι FACH, η κατανάλωση ενέργειας είναι χαμηλότερη όταν οι χρήστες ξεπερνούν τους 10, ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί το υψηλότερο επίπεδο ισχύος που εξασφαλίζει 100% κάλυψη του κελιού.

Μία άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η χρήση της κωδικοποίησης FEC στο επίπεδο εφαρμογής δεν προσθέτει παρά ένα ελάχιστο overhead στη συνολική ενέργεια μετάδοσης μέσω του καναλιού p-t-m FACH. Παρόλο που αυτό το overhead δε φαίνεται ξεκάθαρα από την Εικόνα 73 όπου οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται, τα αρχεία που εξάγονται από τα πειράματα εξομοίωσης δείχνουν ότι αυτό το overhead μεταβάλλεται από 1.1% έως 1.5%. Όμως στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπενθυμισθεί ότι κατά την p-t-m μετάδοση χρησιμοποιείται αυστηρά το επίπεδο ρυθμού μετάδοσης 64 Kbps και, εφόσον η κωδικοποίηση FEC προσθέτει επιπλέον σύμβολα στα αρχικά δεδομένα, ένας μεγαλύτερος χρόνος μετάδοσης χρειάζεται για την παράδοση του αρχείου.

Από την άλλη πλευρά, όταν η μετάδοση γίνεται μέσω ενός καναλιού p-t-p (HS-DSCH) υπάρχει η ευελιξία για την επίτευξη ενός χρόνου μετάδοσης που αντιστοιχεί σε ένα ρυθμό 64 Kbps. Επομένως, η μετάδοση του συνολικού ποσού των συμβόλων κωδικοποίησης, δηλαδή των αρχικών συμβόλων καθώς και αυτών που προκύπτουν

από την κωδικοποίηση FEC, εκτελείται με ένα ρυθμό υψηλότερο των 64 Kbps. Το γεγονός αυτό προκαλεί μία αύξηση της τάξης του 10% έως 25% επί της συνολικής ενέργειας για την p-t-p μετάδοση (Εικόνα 73). Από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι προφανές ότι για μεταδόσεις όπου δεν υπάρχει σημαντικός χρονικός περιορισμός είναι πολύ πιο οικονομικό να κρατηθεί χαμηλά ο ρυθμός μετάδοσης και, κατά συνέπεια, η καταναλισκόμενη ενέργεια.

Με όρους του πώς οι χρήστες αντιλαμβάνονται το κατέβασμα αρχείου, μία οπτική είναι ότι το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι απλά δυτικό, δηλαδή εξαρτάται απλώς από το αν το αρχείο έχει ληφθεί επιτυχώς ή όχι. Όμως, μία άλλη οπτική η οποία είναι και αυτή στενά συνδεδεμένη με την αίσθηση των χρηστών για την υπηρεσία, είναι ο χρόνος μετάδοσης που επιτυγχάνεται. Για το λόγο αυτό εξετάζεται πόσο διαρκεί η λήψη του αρχείου μετά τη συμμετοχή ενός χρήστη στη multicast ομάδα. Η Εικόνα 74 παρουσιάζει το μέσο χρόνο που απαιτείται για το κατέβασμα του αρχείου για όλες τις διαφορετικές ρυθμίσεις και τα διάφορα κανάλια μεταφοράς.

(a)

(b)

(c)

Εικόνα 73. Μέση συνολική ενέργεια μετάδοσης για μετάδοση αρχείου μεγέθους 512 KB. Ο ρυθμός BLER έχει τεθεί στις τιμές: (a) 5%, (b) 10%, και (c) 20%.

Κατά τη σύγκριση των μέσων χρόνων κατεβάσματος για τις διάφορες ρυθμίσεις των καναλιών, συμπεραίνεται εύκολα ότι η χρήση ενός καναλιού p-t-m μπορεί να αποβεί αρκετά δαπανηρή. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι θα πρέπει να διατηρηθεί ένα επίπεδο ισχύος που αντιστοιχεί σε σταθερό ρυθμό μετάδοσης 64 Kbps. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε πλεονάζοντα σύμβολα τα οποία προστίθενται από την κωδικοποίηση FEC ή οποιοσδήποτε αναμεταδόσεις πακέτων που απαιτούνται, προκαλούν μία αύξηση του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο χρήστης ως χρόνο κατεβάσματος του αρχείου.

Εικόνα 74. Μέσος χρόνος μετάδοσης για την επιτυχή παράδοση του αρχείου μεγέθους 512 KB.

Από την άλλη πλευρά, το κανάλι p-t-p προσφέρει την ευελιξία για ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο. Επομένως, με την αύξηση της

ισχύος μετάδοσης κάθε πλεονάζον σύμβολο ή κάθε αναμεταδιδόμενο πακέτο μπορεί να μεταδοθεί χωρίς να επηρεάζει άμεσα το ρυθμό μετάδοσης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης και για το συγκεκριμένο πείραμα έχει τεθεί στο επίπεδο των 64 Kbps.

9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία πλήρης μελέτη της επίδρασης της χρήσης FEC στο επίπεδο εφαρμογής κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Καταρχάς, η χρήση της κωδικοποίησης FEC αξιολογείται κάτω από διάφορες κατανομές των multicast χρηστών με όρους τηλεπικοινωνιακού κόστους. Η αξιολόγηση εκτελείται με τη βοήθεια ενός καινοτόμου μηχανισμού που μοντελοποιεί πιθανοτικά την κατανομή των multicast χρηστών σε ένα κινητό δίκτυο. Η συμπεριφορά του προτυποποιημένου μηχανισμού FEC εξετάζεται έναντι παραμέτρων όπως η πυκνότητα των multicast χρηστών και ο πληθυσμός των multicast χρηστών. Η βέλτιστη διάσταση των κωδίκων FEC, δηλαδή το ιδανικό σημείο λειτουργίας στη διελκυστίνδα του overhead στον κώδικα FEC έναντι του κόστους αναμετάδοσης, εκτιμάται για διάφορες συνθήκες μέσα στο κινητό δίκτυο. Η ανάλυση κόστους που διεξάγεται βασίζεται στις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSDPA για υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων προς τα κινητά τερματικά. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης παρουσιάζονται και αναλύονται διεξοδικά. Τέλος, γίνεται μία ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και δίνονται εξηγήσεις που ερμηνεύουν τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου μοντέλου.

Επιπλέον, ο έλεγχος ισχύος είναι μία άλλη οπτική υψίστης σημασίας κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων και η οποία εξετάζεται ξεχωριστά. Ο προτεινόμενος μηχανισμός επιτρέπει την εξομοίωση της μεθόδου μετάδοσης streaming για την υπηρεσία MBMS όπως επίσης και της μεθόδου download για την ίδια υπηρεσία. Κάτι που είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός ενσωματώνει τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSDPA για υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων προς τα κινητά τερματικά, όπως αυτές καθορίζονται από τις προδιαγραφές του οργανισμού 3GPP. Τα προφίλ ισχύος για την μετάδοση δεδομένων με κανάλια p-t-p καθώς και p-t-m λαμβάνονται υπόψη από το μηχανισμό.

Από την οπτική του ελέγχου ισχύος, γενικά συμπεραίνεται ότι η χρήση της κωδικοποίησης FEC στο επίπεδο εφαρμογής προκαλεί μία αύξηση στην κατανάλωση ισχύος σε σχέση με μία απλή διαδικασία αναμετάδοσης των χαμένων τμημάτων των αρχείων. Με άλλα λόγια, η αύξηση της ισχύος για την επίτευξη ενός καλύτερου BLER είναι φθηνότερη από πλευράς ισχύος σε σχέση με την αύξηση προκειμένου να αποσταλούν τα επιπλέον σύμβολα που προκύπτουν από τον κωδικοποιητή FEC. Αυτό έχει εφαρμογή σε μεταδόσεις που είναι περιορισμένες χρονικά, δηλαδή για μεταδόσεις που θα πρέπει να ολοκληρωθούν με ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης (για τη μέθοδο μετάδοσης streaming) ή σε ένα συγκεκριμένο χρόνο κατεβάσματος (για τη μέθοδο μετάδοσης download). Από την άλλη πλευρά, συμπεραίνεται ότι η χρήση του κώδικα FEC στο επίπεδο εφαρμογής προκαλεί επίσης μία σχετικά μικρή αύξηση στην κατανάλωση ισχύος και σε σχέση με την παραδοσιακή διαδικασία αναμετάδοσης πακέτων. Ένα άλλο γενικό συμπέρασμα είναι ότι η χρήση του καναλιού μεταφοράς HS-DSCH προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης καθώς και στο ποσό των επιπλέον συμβόλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αντίθετα, το κανάλι FACH προσφέρει μόνο συγκεκριμένα επίπεδα

ρυθμού μετάδοσης. Κατά συνέπεια η χρήση των κωδίκων Raptor για την κωδικοποίηση FEC δεν προσφέρει εξοικονόμηση ισχύος στον κατερχόμενο σύνδεσμο. Αντίθετα, τα πλεονεκτήματα της χρήσης FEC είναι ισχυρά συνδεδεμένα με την ανερχόμενη κατεύθυνση, και κυρίως, αφενός, με τις δυνατότητες που προσφέρει για λειτουργία με περιορισμένους ή και καθόλου πόρους όσον αφορά στον ανερχόμενο σύνδεσμο, και αφετέρου με την αποφυγή του καταιγισμού ανατροφοδοτήσεων που εξασφαλίζει.

Για την περίπτωση της μεθόδου μετάδοσης streaming, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν ο αριθμός των αποδεκτών ξεπερνά το όριο των 10 με 11 χρηστών, η κατανάλωση ισχύος για το κανάλι HS-DSCH αυξάνει ραγδαία, και κατά συνέπεια η εφαρμογή της μετάδοσης p-t-m μέσω του καναλιού FACH γίνεται πιο αποδοτική. Η αξιολόγηση της κωδικοποίησης FEC για τη μέθοδο μετάδοσης download δείχνει ότι από την οπτική της κατανάλωσης ισχύος οι μετρήσεις για τη μέθοδο μετάδοσης download σχεδόν συμπίπτουν με τις αντίστοιχες για την μετάδοση streaming. Από την οπτική της κατανάλωσης ενέργειας, το σημείο εναλλαγής από όπου η μετάδοση p-t-m μέσω του καναλιού FACH γίνεται πιο αποδοτική είναι ένα πλήθος από 10 με 11 κινητούς χρήστες. Επομένως είναι ξεκάθαρο ότι και από την πλευρά της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και από την πλευρά της κατανάλωσης ισχύος το σημείο εναλλαγής για την μέθοδο μετάδοσης download είναι το ίδιο. Το τελευταίο θέμα το οποίο εξετάζεται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων εξομοίωσης είναι ο συνολικός χρόνος μετάδοσης. Η σημαντικότητα αυτής της μετρικής προκύπτει από την άμεση σχέση της με την αίσθηση του τελικού χρήστη αφού ταυτίζεται με το χρόνο κατεβάσματος που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Η αξιολόγηση του συνολικού χρόνου μετάδοσης δείχνει ότι η χρήση του καναλιού p-t-m μπορεί να αποβεί πολύ χρονοβόρα καθώς ένας σταθερός ρυθμός μετάδοσης επιπέδου 64 Kbps θα πρέπει να ακολουθηθεί. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε πλεονάζοντα σύμβολα τα οποία προστίθενται από την κωδικοποίηση FEC ή οποιεσδήποτε αναμεταδόσεις πακέτων που απαιτούνται, προκαλούν μία αύξηση του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο χρήστης ως χρόνο κατεβάσματος του αρχείου. Από την άλλη πλευρά, το κανάλι p-t-p προσφέρει ευελιξία για ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε η εφαρμογή διάφορων μηχανισμών βελτιστοποίησης της εφαρμογής της multicast μεθόδου στη μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η διεξαχθείσα έρευνα εστίασε στην υπηρεσία MBMS και εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο θα βελτιστοποιηθεί η εφαρμογή της στα κινητά δίκτυα. Επίσης, μελετά μηχανισμούς που εξασφαλίζουν τον έλεγχο συμφόρησης στις MBMS συνόδους καθώς και στην εφαρμογή του FEC για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων.

Αρχικά, αναλύθηκε και παρουσιάστηκε ένας νέος μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Ο προτεινόμενος αυτός μηχανισμός έχει σχεδιαστεί με βάση τις τρέχουσες προδιαγραφές της υπηρεσίας MBMS, έτσι όπως αυτές έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Ο σχεδιασμός του μηχανισμού αυτού έχει γίνει με τρόπο που ελαχιστοποιεί τα μεταδιδόμενα πακέτα και κάνει αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου. Εκτός από την τυπική multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα, εξετάστηκε και ο χειρισμός ειδικών περιπτώσεων που προκαλούνται από σενάρια κινητικότητας χρηστών. Η κινητικότητα των χρηστών είναι το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που διαχωρίζει τα κινητά δίκτυα από τα σταθερά δίκτυα επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό οι καταστάσεις κινητικότητας χρηστών θεωρήθηκαν υψίστης σημασίας για τα κινητά δίκτυα και εξετάστηκαν με μεγάλη λεπτομέρεια μέσω εξομοιώσεων. Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η ανάπτυξη ενός μηχανισμού που μπορεί εύκολα να εγκατασταθεί και ο οποίος εισάγει περιορισμένες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική των κινητών δικτύων καθώς και στους υπάρχοντες μηχανισμούς διαχείρισης της κινητικότητας έτσι όπως έχουν καθοριστεί για τη unicast μετάδοση δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

Στο συγκεκριμένο τμήμα αυτής της διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε ο προτεινόμενος αυτός μηχανισμός για την εισαγωγή της multicast μετάδοσης δεδομένων σε κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς και, πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα UMTS. Για την ακρίβεια, προτάθηκε η χρήση των Routing Lists (RLs) σε κάθε κόμβο του δικτύου εκτός των UEs, όπως επίσης η χρήση επιπλέον λιστών, των Drift Routing Lists (DRLs), στους κόμβους RNC. Όσον αφορά στις RLs, αυτές καταγράφουν τους κόμβους του αμέσως κατώτερου επιπέδου του δικτύου στους οποίους πρέπει να προωθηθούν τα πακέτα πληροφορίας που απευθύνονται σε μία multicast ομάδα. Επιπρόσθετα, οι DRLs περιέχουν πληροφορία σχετικά με τα inter-RNS handovers που έχουν εκτελεστεί και η επεξεργασία τους διευκολύνει στη multicast μετάδοση δεδομένων μεταξύ των RNCs μέσω της διεπαφής Iur.

Ο συνολικός προτεινόμενος μηχανισμός, υλοποιήθηκε στον εξομοιωτή δικτύων ns-2 και αξιολογήθηκε μέσω πειραμάτων. Τα πειράματα εξομοίωσης εστιάστηκαν στην φάση Data Transfer της παροχής υπηρεσίας MBMS και έγιναν προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα και η αποδοτικότητα του μηχανισμού. Για την ακρίβεια, διερευνήθηκαν με πληρότητα οι λειτουργίες του μηχανισμού, καθώς αυτός υποβλήθηκε σε πειράματα που αντιστοιχούν στις διάφορες πιθανές συνθήκες στις οποίες μπορεί να περιέλθει το δίκτυο. Τέλος, τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά.

Όσον αφορά στο σκέλος του μηχανισμού για τη multicast μετάδοση πακέτων, ελέγχθηκε η αποτελεσματικότητά του πάνω από διάφορους συνδέσμους. Όπως

φάνηκε από τα αποτελέσματα, η χρήση των RLs οδηγεί στη εφαρμογή ενός μηχανισμού δρομολόγησης με τον οποίο παρουσιάστηκε μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων και αποδοτικότερη χρήση των πόρων του δικτύου UMTS. Μάλιστα, η βελτίωση της απόδοσης διευρύνθηκε με την αύξηση του πλήθους των τελικών παραληπτών της multicast κίνησης.

Επιπλέον, εξομοιώθηκαν τα πιθανά σενάρια κινητικότητας χρηστών που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς. Στην περίπτωση αυτή, εξετάστηκε το κατά πόσο ο προτεινόμενος μηχανισμός μπορεί να υποστηρίξει τα διάφορα σενάρια κινητικότητας, καθώς και αν ευσταθεί υπό αυτές τις συνθήκες. Εξετάστηκαν τα δύο σενάρια handover που έχουν επίδραση στις RLs και στις DRLs (πρόκειται για inter-RNS / intra-SGSN και inter-RNS / inter-SGSN) καθώς και οι αντίστοιχες διαδικασίες SRNS relocation. Η εξομοίωση απέδειξε την ορθότητα του μηχανισμού καθώς από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι, σε κάθε περίπτωση, η αδιάλειπτη παροχή της υπηρεσίας είναι εξασφαλισμένη.

Επιπλέον, τα πειράματα εξομοίωσης διερεύνησαν τη μετάδοση δεδομένων μέσω της διεπαφής Iur. Ο προτεινόμενος μηχανισμός εισάγει τη multicast τεχνική και σε αυτόν τον τύπο διεπαφής, μέσω της χρήσης των DRLs. Τα αποτελέσματα για αυτή την περίπτωση είναι ανάλογα με του συνολικού μηχανισμού. Για την περίπτωση αυτή η βελτίωση της απόδοσης εντείνεται με την αύξηση του πλήθους των inter-RNS handovers. Η σημασία αυτής της βελτίωσης είναι μεγάλη διότι η Iur διεπαφή είναι ένα δυνητικό σημείο συμφόρησης όταν πολλαπλά inter-RNS handovers έχουν λάβει χώρα. Με τον περιορισμό του φόρτου πάνω σε αυτού του είδους των συνδέσμων το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει περισσότερα handovers χωρίς να υπάρχει ανάγκη για εκτέλεση της SRNS relocation διαδικασίας.

Ένα άλλο σημείο που διερευνήθηκε μέσω της διαδικασίας εξομοίωσης ήταν η συμπεριφορά των διαφόρων τύπων καναλιών μεταφοράς του UTRAN. Προκειμένου να γίνει η μετάδοση των multicast δεδομένων στις διεπαφές Iub και Uu του UTRAN, εξομοιώθηκαν τρεις τύποι καναλιών μεταφοράς. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα κανάλια FACH, HS-DSCH καθώς και το DCH. Για κάθε ένα από τα κανάλια αυτά, μετρήθηκε το throughput του συνδέσμου που συνδέει τον κόμβο RNC και τον Node B και επιβεβαιώθηκε ότι το κοινό κανάλι FACH προσφέρει σημαντική βελτίωση στην κατανάλωση throughput σε σχέση με τα κανάλια DCH και HS-DSCH. Παρόλα αυτά τα κανάλια FACH δεν αποτελούν πάντα την ενδεικνυόμενη λύση στο ζήτημα της επιλογής καναλιού μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, τον έλεγχο ισχύος, την κατανομή των χρηστών στα κελιά καθώς και την κινητικότητα των χρηστών.

Επίσης, ένα άλλο σημείο που επιβεβαιώθηκε πειραματικά είναι ότι ο υπάρχων μηχανισμός προσθέτει μία μικρή επιβάρυνση στην τυπική πολυπλοκότητα των μηνυμάτων χωρίς να επηρεάζεται η επεκτασιμότητα. Αυτό διότι η επιβάρυνση δεν εξαρτάται από τον αριθμό των κινητών εξοπλισμών.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί η απλότητα στην ενσωμάτωση του μηχανισμού στους υπάρχοντες μηχανισμούς λειτουργίας και διαχείρισης της κινητικότητας που υπάρχουν στα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Όπως φάνηκε από την περιγραφή του μηχανισμού, ο μηχανισμός βασίζεται στην υποδομή του UMTS. Οι πρόσθετες λειτουργίες που απαιτούνται είναι πολύ μικρές και εύκολα υλοποιήσιμες. Αυτό άλλωστε φάνηκε και από την εύκολη ενσωμάτωση του μηχανισμού στο σύστημα εξομοίωσης του ns-2.

Στο τμήμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής το οποίο σχετίζεται με τον έλεγχο συμφόρησης, μελετήθηκε η εφαρμογή δύο ήδη γνωστών μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης πάνω σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Οι εξεταζόμενοι μηχανισμοί είναι ο TFMCC και ο PGMCC. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί ανήκουν στην ομάδα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού οι οποίοι αναπόφευκτα δεν προσφέρουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως κάνουν οι πολύ-επίπεδοι μηχανισμοί. Παρόλα αυτά είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν μία θεμελιώδη απαίτηση για τη multicast μετάδοση σε UMTS δίκτυα που είναι η επεκτασιμότητα για τις εφαρμογές που απευθύνονται σε χιλιάδες χρήστες.

Στο ίδιο τμήμα της διδακτορικής διατριβής παρουσιάστηκαν οι δύο μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για multicast μεταδόσεις δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι βασισμένοι στους γνωστούς μηχανισμούς TFMCC και PGMCC. Οι δύο αυτοί υπάρχοντες μηχανισμοί ανήκουν στην κατηγορία των TCP-friendly μηχανισμών multicast μετάδοσης δεδομένων και είναι μηχανισμοί μοναδικού ρυθμού. Επίσης έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογή σε σταθερά δίκτυα επικοινωνιών. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε κινητά δίκτυα, ένα σύνολο από τροποποιήσεις χρησιμοποιείται και για τους δύο μηχανισμούς.

Πιο συγκεκριμένα, ένα νέο πεδίο μεγέθους 1-bit εισάγεται στα πακέτα δεδομένων και για τους δύο μηχανισμούς. Αυτό γίνεται προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα φαινόμενα της προσωρινής καθώς και της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου συνδέσμου. Οι μεταβολές που απαιτούνται στη λειτουργία του δικτύου είναι πολύ απλές και ουσιαστικά περιορίζονται μόνο σε δύο τύπους κόμβων του κινητού δικτύου. Για την ακρίβεια, τροποποιήσεις απαιτούνται στους κόμβους Node B καθώς και στους κινητούς εξοπλισμούς UE. Η πρόσθετες αυτές λειτουργίες αποσκοπούν κυρίως στο να ελέγχεται η αιτία μίας δυνητικής απώλειας πακέτου. Επίσης, κάτι που είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι προτεινόμενοι μηχανισμοί σέβονται την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ των κινητών εξοπλισμών UE και, κατά συνέπεια, καμία απαιτητική λειτουργία δεν έχει εισαχθεί σε αυτό τον τύπο κόμβου του δικτύου.

Με σκοπό την αξιολόγηση των προτεινόμενων μηχανισμών, εκτελέστηκε ένα σύνολο από πειράματα εξομοίωσης. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι και οι δύο μηχανισμοί διατηρούν τα πλεονεκτήματα των αντίστοιχων υπάρχοντων μηχανισμών κατά την εφαρμογή τους στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Αυτό συνεπάγεται ότι οι μηχανισμοί είναι δίκαιοι προς τις άλλες ροές δεδομένων του ίδιου μηχανισμού για διάφορες τοπολογίες δικτύων και επίπεδα συμφόρησης. Επιπλέον εμφανίζουν την ιδιότητα της TCP-friendliness προς ανταγωνιστικές ροές δεδομένων του πρωτοκόλλου TCP. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η δικαιοσύνη εξετάστηκε και όσον αφορά σε ροές δεδομένων των δύο προτεινόμενων μηχανισμών που ανταγωνίζονται μεταξύ τους και επιβεβαιώθηκε και σε αυτή την περίπτωση. Ο τροποποιημένος μηχανισμός TFMCC διατηρεί ένα πολύ ομαλό ρυθμό μετάδοσης σε σύγκριση με το πρωτόκολλο TCP καθώς και με τον τροποποιημένο μηχανισμό PGMCC. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των πειραμάτων απέδειξαν την αποδοτική απόκριση των μηχανισμών στις αλλαγές του επιπέδου συμφόρησης όσον αφορά στο ρυθμό απώλειας πακέτων αλλά και στο χρόνο RTT. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένα άλλο πλεονέκτημα των υπάρχοντων μηχανισμών το οποίο επιβεβαιώθηκε ότι διατηρείται είναι η επεκτασιμότητα.

Το άλλο βασικό ζήτημα που εξετάστηκε από τα πειράματα εξομοίωσης είναι η καταγραφή της απόδοσης των μηχανισμών όταν λαμβάνει χώρα η υποβάθμιση του

ασύρματου συνδέσμου. Αυτό που επιβεβαιώθηκε είναι ότι όταν λαμβάνει χώρα προσωρινή υποβάθμιση του ασύρματου συνδέσμου, οι απώλειες πακέτων που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό, μπορούν να ανιχνεύονται με ορθότητα στους κινητούς εξοπλισμούς και να αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, όπως ήταν αναμενόμενο, οι υπάρχοντες μηχανισμοί αντιδρούν στο φαινόμενο αυτό με μείωση του ρυθμού μετάδοσης, κάτι που προκαλεί σταθερή υποβάθμιση της multicast υπηρεσίας.

Τέλος, εξετάστηκε η συμπεριφορά των προτεινόμενων μηχανισμών έναντι στο φαινόμενο της μόνιμης υποβάθμισης του ασύρματου καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες πακέτων που οφείλονται σε υπερχειλίσεις των buffers στους κόμβους Node B θεωρούνται ως εκδηλώσεις συμφόρησης του δικτύου και δεν αγνοούνται κατά τον υπολογισμό του αποδεκτού ρυθμού μετάδοσης. Τελικά, τέτοιου είδους απώλειες προκαλούν μείωση στο ρυθμό της multicast μετάδοσης δεδομένων.

Στο τελευταίο τμήμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, διερευνήθηκε η εφαρμογή του FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Η έρευνα διεξάχθηκε με τη βοήθεια ενός νέου μηχανισμού ο οποίος ενσωματώνει ένα πιθανοτικό μοντέλο για την κατανομή των multicast χρηστών στο δίκτυο και καθορίζει το κόστος της multicast μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης του FEC στην υπηρεσία MBMS. Έγινε μία προσπάθεια για τον καθορισμό ενός αποδοτικού σημείου λειτουργίας στη διελκυστίνδα μεταξύ της επιβάρυνσης εξαιτίας του κώδικα και του κόστους αναμετάδοσης. Εξετάστηκε εάν η χρήση του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση για τον κώδικα FEC μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, ποιες παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου κώδικα FEC καθώς και ο τρόπος που το κάνουν. Επιπλέον, εξετάστηκε ένα από τα πιο κρίσιμα θέματα στη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα και το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.

Πιο αναλυτικά, στο συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάστηκε μία πλήρης μελέτη της επίδρασης της χρήσης FEC στο επίπεδο εφαρμογής κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Καταρχάς, η χρήση της κωδικοποίησης FEC αξιολογήθηκε κάτω από διάφορες κατανομές των multicast χρηστών με όρους τηλεπικοινωνιακού κόστους. Η αξιολόγηση εκτελέστηκε με τη βοήθεια ενός καινοτόμου μηχανισμού που μοντελοποιεί πιθανοτικά την κατανομή των multicast χρηστών σε ένα κινητό δίκτυο. Η συμπεριφορά του προτυποποιημένου μηχανισμού FEC εξετάστηκε έναντι παραμέτρων όπως η πυκνότητα των multicast χρηστών και ο πληθυσμός των multicast χρηστών. Η βέλτιστη διάσταση των κωδίκων FEC, δηλαδή το ιδανικό σημείο λειτουργίας στη διελκυστίνδα του overhead στον κώδικα FEC έναντι του κόστους αναμετάδοσης, εκτιμήθηκε για διάφορες συνθήκες μέσα στο κινητό δίκτυο. Η ανάλυση κόστους που διεξάχθηκε βασίστηκε στις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSDPA για υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων προς τα κινητά τερματικά. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν διεξοδικά. Τέλος, έγινε μία ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και δόθηκαν εξηγήσεις που ερμηνεύουν τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου μοντέλου.

Επιπλέον, ο έλεγχος ισχύος είναι μία άλλη οπτική υψίστης σημασίας κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων και η οποία εξετάστηκε ξεχωριστά. Ο προτεινόμενος μηχανισμός επιτρέπει την εξομοίωση της μεθόδου μετάδοσης streaming για την υπηρεσία MBMS όπως επίσης και της μεθόδου download για την ίδια υπηρεσία. Κάτι

που είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός ενσωμάτωσε τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία HSDPA για υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων προς τα κινητά τερματικά, όπως αυτές καθορίζονται από τις προδιαγραφές του οργανισμού 3GPP. Τα προφίλ ισχύος για την μετάδοση δεδομένων με κανάλια p-t-p καθώς και p-t-m λήφθηκαν υπόψη από το μηχανισμό.

Από την οπτική του ελέγχου ισχύος, βγήκε το γενικό συμπέρασμα ότι η χρήση της κωδικοποίησης FEC στο επίπεδο εφαρμογής προκαλεί μία αύξηση στην κατανάλωση ισχύος σε σχέση με μία απλή διαδικασία αναμετάδοσης των χαμένων τμημάτων των αρχείων. Με άλλα λόγια, η αύξηση τη ισχύος για την επίτευξη ενός καλύτερου BLER είναι φθηνότερη από πλευράς ισχύος σε σχέση με την αύξηση προκειμένου να αποσταλούν τα επιπλέον σύμβολα που προκύπτουν από τον κωδικοποιητή FEC. Αυτό έχει εφαρμογή σε μεταδόσεις που είναι περιορισμένες χρονικά, δηλαδή για μεταδόσεις που θα πρέπει να ολοκληρωθούν με ένα δεδομένο ρυθμό μετάδοσης (για τη μέθοδο μετάδοσης streaming) ή σε ένα συγκεκριμένο χρόνο κατεβάσματος (για τη μέθοδο μετάδοσης download). Από την άλλη πλευρά, βγήκε το συμπέρασμα ότι η χρήση του κώδικα FEC στο επίπεδο εφαρμογής προκαλεί επίσης μία σχετικά μικρή αύξηση στην κατανάλωση ισχύος και σε σχέση με την παραδοσιακή διαδικασία αναμετάδοσης πακέτων. Ένα άλλο γενικό συμπέρασμα είναι ότι η χρήση του καναλιού μεταφοράς HS-DSCH προσφέρει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή του πραγματικού ρυθμού μετάδοσης καθώς και στο ποσό των επιπλέον συμβόλων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αντίθετα, το κανάλι FACH προσφέρει μόνο συγκεκριμένα επίπεδα ρυθμού μετάδοσης. Κατά συνέπεια η χρήση των κωδίκων Raptor για την κωδικοποίηση FEC δεν προσφέρει εξοικονόμηση ισχύος στον κατερχόμενο σύνδεσμο. Αντίθετα, τα πλεονεκτήματα της χρήσης FEC είναι ισχυρά συνδεδεμένα με την ανερχόμενη κατεύθυνση, και κυρίως, αφενός, με τις δυνατότητες που προσφέρει για λειτουργία με περιορισμένους ή και καθόλου πόρους όσον αφορά στον ανερχόμενο σύνδεσμο, και αφετέρου με την αποφυγή του καταγισμού ανατροφοδοτήσεων που εξασφαλίζει.

Για την περίπτωση της μεθόδου μετάδοσης streaming, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν ο αριθμός των αποδεκτών ξεπερνά το όριο των 10 με 11 χρηστών, η κατανάλωση ισχύος για το κανάλι HS-DSCH αυξάνει ραγδαία, και κατά συνέπεια η εφαρμογή της μετάδοσης p-t-m μέσω του καναλιού FACH γίνεται πιο αποδοτική. Η αξιολόγηση της κωδικοποίησης FEC για τη μέθοδο μετάδοσης download έδειξε ότι από την οπτική της κατανάλωσης ισχύος οι μετρήσεις για τη μέθοδο μετάδοσης download σχεδόν συμπίπτουν με τις αντίστοιχες για την μετάδοση streaming. Από την οπτική της κατανάλωσης ενέργειας, το σημείο εναλλαγής από όπου η μετάδοση p-t-m μέσω του καναλιού FACH γίνεται πιο αποδοτική είναι ένα πλήθος από 10 με 11 κινητούς χρήστες. Επομένως είναι ξεκάθαρο ότι και από την πλευρά της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και από την πλευρά της κατανάλωσης ισχύος, το σημείο εναλλαγής για την μέθοδο μετάδοσης download είναι το ίδιο. Το τελευταίο θέμα το οποίο εξετάζεται κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων εξομοίωσης είναι ο συνολικός χρόνος μετάδοσης. Η σημαντικότητα αυτής της μετρικής προκύπτει από την άμεση σχέση της με την αίσθηση του τελικού χρήστη αφού ταυτίζεται με το χρόνο κατεβάσματος που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Η αξιολόγηση του συνολικού χρόνου μετάδοσης έδειξε ότι η χρήση του καναλιού p-t-m μπορεί να αποβεί πολύ χρονοβόρα καθώς ένας σταθερός ρυθμός μετάδοσης επιπέδου 64 Kbps θα πρέπει να ακολουθηθεί. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε πλεονάζοντα σύμβολα τα οποία προστίθενται από την κωδικοποίηση FEC ή οποιεσδήποτε αναμεταδόσεις πακέτων

που απαιτούνται, προκαλούν μία αύξηση του χρόνου που αντιλαμβάνεται ο χρήστης ως χρόνο κατεβάσματος του αρχείου. Από την άλλη πλευρά, το κανάλι p-t-p προσφέρει ευελιξία για ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εν κατακλείδι, θα παρουσιαστούν ορισμένα πιθανά επόμενα βήματα της έρευνας οποία μπορεί να βασιστεί στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια των LTE συστημάτων, η υπηρεσία MBMS εξελίσσεται στην υπηρεσία Evolved MBMS (e-MBMS). Γενικά, οι υπηρεσίες MBMS παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία από άλλα συστήματα διανομής, όπως παραδείγματος χάριν το DVB - Handheld (DVB-H), επειδή για αυτές συμπεριλαμβάνεται ένα κανάλι επιστροφής. Επιπλέον το δίκτυο είναι σε θέση να αποστέλλει δεδομένα είτε προς μια ομάδα χρηστών (multicast) είτε προς όλους τους χρήστες μίας κυψέλης (broadcast). Το e-MBMS στοχεύει στην παροχή multicast και broadcast υπηρεσιών, συνδυάζοντας ευελιξία και υψηλή αποδοτικότητα από την άποψη της εκμετάλλευσης του φάσματος και εξασφαλίζοντας βελτιωμένη απόδοση συγκριτικά με το DVB-H από την άποψη της broadcast μετάδοσης. Τα παραπάνω θα επιτευχθούν μέσω της βελτιωμένης απόδοσης της ασύρματης διεπαφής, η οποία θα περιλάβει ένα νέο σχέδιο μετάδοσης, το αποκαλούμενο Multicast/Broadcast Single-Frequency Networking (MBSFN), με το οποίο το e-MBMS θα είναι σε θέση να μεταδώσει το ίδιο σήμα σε συγχρονισμένες γειτονικές κυψέλες.

Εικόνα 75. Εναλλακτικές μορφές της e-MBMS αρχιτεκτονικής

Εκτός από τις σημαντικές βελτιώσεις στην ασύρματη διεπαφή, το e-MBMS προβλέπει και μία σχετικά απλή αρχιτεκτονική. Οι εναλλακτικές προτεινόμενες μορφές της αρχιτεκτονικής του e-MBMS παρουσιάζονται στην Εικόνα 75. Ο κόμβος e-BM-SC (αντίστοιχος του κόμβου BM-SC στα UMTS δίκτυα) αποτελεί τον υπεύθυνο κόμβο για την εισαγωγή του πολυμεσικού περιεχομένου στο δίκτυο. Το e-MBMS GW αποτελεί τη «ρίζα» του δέντρου διανομής για το πολυμεσικό περιεχόμενο και χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των multicast/broadcast δεδομένων προς τους χρήστες μέσω του e-UTRAN. Στο e-UTRAN, οι e-Node Bs (με άλλα λόγια οι σταθμοί βάσης) συλλέγουν τις πληροφορίες που πρέπει να μεταδώσουν στους χρήστες μέσω της ασύρματης διεπαφής. Ο κόμβος Multi-cell/multicast Coordination Entity (MCE) είναι νέος κόμβος που απαιτείται για το συντονισμό της μετάδοσης των συγχρονισμένων σημάτων που εκπέμπονται από διαφορετικές κυψέλες. Παράλληλα, ο κόμβος MCE αποφασίζει για τις λεπτομέρειες της διαμόρφωσης, όπως π.χ. το

σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 75, το e-MBMS GW χωρίζεται σε δύο μέρη: το Control Plane (CP) και το User Plane (UP). Επιπρόσθετα, έχουν καθοριστεί δύο διακριτές διεπαφές μεταξύ του e-MBMS GW και του e-UTRAN. Η διεπαφή M1, η οποία θα εκμεταλλεύεται το IP multicast για τη διανομή του πολυμεσικού περιεχομένου και προορίζεται για το UP και η διεπαφή M3 η οποία προορίζεται για το CP. Αναφέρουμε στο σημείο αυτό πως για την αρχιτεκτονική του e-MBMS έχουν προταθεί δύο εναλλακτικές μορφές, όπως άλλωστε παρουσιάζεται στην Εικόνα 75. Στην πρώτη μορφή (Εικόνα 75a) ο κόμβος MCE εντοπίζεται εντός του e-Node B, ενώ μια άλλη λύση που εξετάζεται από το 3GPP είναι η τοποθέτηση του MCE εκτός του e-Node B (Εικόνα 75b). Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται μία πρόσθετη διεπαφή (η M2) μεταξύ των κόμβων MCE και e-Node B.

Ειδικότερα, για το e-MBMS, εισάγονται οι ακόλουθοι ορισμοί:

- **MBSFN Synchronization Area** (δηλ. περιοχή συγχρονισμού MBSFN): Μία περιοχή του δικτύου όπου όλα τα e-Node Bs μπορούν να είναι συγχρονισμένα και να εκτελούν MBSFN μεταδόσεις. Οι περιοχές συγχρονισμού MBSFN μπορούν να υποστηρίζουν μία ή περισσότερες περιοχές MBSFN. Κάθε e-Node B μπορεί να ανήκει σε μία μόνο περιοχή συγχρονισμού MBSFN.
- **MBSFN Transmission** (μετάδοση MBSFN): Μία τεχνική μετάδοσης που πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη μετάδοση παρόμοιων κυματομορφών σε πολλαπλές κυψέλες. Ο χρήστης αντιλαμβάνεται μία μετάδοση MBSFN από πολλαπλές κυψέλες της ίδιας περιοχής MBSFN ως μία μετάδοση.
- **MBSFN Area** (περιοχή MBSFN): Μία περιοχή MBSFN αποτελείται από μία ομάδα κυψελών μέσα σε μία περιοχή συγχρονισμού MBSFN, οι οποίες συντονίζονται για να επιτύχουν μια μετάδοση MBSFN. Όλες οι κυψέλες που ανήκουν σε μία περιοχή MBSFN, εκτός από τις εφεδρικές κυψέλες της περιοχής MBSFN, συμβάλλουν στη μετάδοση MBSFN και διαφημίζουν τη διαθεσιμότητά της. Μία κυψέλη σε μια περιοχή συγχρονισμού MBSFN ανήκει μόνο σε μια περιοχή MBSFN για όλες τις e-MBMS υπηρεσίες.

Εικόνα 76. Ορισμοί στο e-MBMS

- **MBSFN Area Reserved Cell** (εφεδρική κυψέλη περιοχής MBSFN): Μία κυψέλη μέσα σε μια περιοχή MBSFN που δεν συμβάλλει στη μετάδοση MBSFN. Η κυψέλη αυτή επιτρέπεται να μεταδώσει άλλες υπηρεσίες αλλά χωρίς να χρησιμοποιεί τους πόρους ισχύος που έχουν διατεθεί για τη μετάδοση MBSFN.

Στο e-UTRAN, οι e-MBMS υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται μέσω του MBSFN μόνο σε ένα επίπεδο συχνότητας που διαμοιράζεται με μη e-MBMS υπηρεσίες. Με άλλα λόγια μπορούν να παρέχονται σε ένα σύνολο κυψελών που υποστηρίζουν τόσο unicast όσο και e-MBMS μεταδόσεις. Οι κυψέλες αυτές, οι οποίες είναι σε θέση να εκτελέσουν e-MBMS μεταδόσεις ονομάζονται MBMS/Unicast-mixed κυψέλες.

Για τις MBMS/Unicast-mixed κυψέλες ισχύουν τα παρακάτω:

- Το Multicast Traffic Channel (MTCH) και το Multicast Control Channel (MCCH) αντιστοιχίζονται στο Multicast Channel (MCH) για τις p-t-m μεταδόσεις.
- Οι unicast και οι e-MBMS μεταδόσεις σε μία κυψέλη πραγματοποιούνται με ένα συντονισμένο τρόπο.

Παράλληλα, πολλαπλές e-MBMS υπηρεσίες μπορούν να αντιστοιχηθούν στο ίδιο MCH, ενώ ένα MCH περιέχει δεδομένα που ανήκουν μόνο σε μία MBSFN Περιοχή. Μια περιοχή MBSFN μπορεί να περιέχει ένα ή περισσότερα MCHs ενώ όλα τα MCHs έχουν την ίδια περιοχή κάλυψης.

Γενικότερα, όπως φαίνεται από την παραπάνω ανάλυση η μετάβαση από το MBMS στο e-MBMS είναι μία δύσκολη διαδικασία που απαιτεί εντατική μελέτη και προσεκτικό σχεδιασμό. Παρόλα αυτά, τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία e-MBMS στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς τονίζουν την ανάγκη για την περεταίρω μελέτη της δυνατότητας παροχής MBMS υπηρεσιών πάνω από δίκτυα LTE.

Συνοπτικά, αναφέρουμε στο σημείο αυτό πως η τεχνολογία LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση υποστήριξης και μετάδοσης packet-switched εφαρμογών, όπως είναι οι πολυμεσικές εφαρμογές. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE είναι:

- Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz.
- Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο σύνδεσμο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο.
- Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και 2-3 φορές μεγαλύτερης για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με το HSDPA και HSUPA αντίστοιχα.
- Σημαντική μείωση της καθυστέρησης από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5ms-10ms.
- Υποστήριξη χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- Υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας για απαιτητικές εφαρμογές.

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων η τεχνολογία LTE βασίζεται στο OFDM για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο. Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για την τεχνολογία LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών. Παράλληλα, για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, στην τεχνολογία LTE προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας SC-OFDM που μπορεί να επιφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης. Γίνεται επομένως κατανοητό πως η μελέτη των δύο αυτών τεχνικών είναι

μεγάλης σημασίας για την πλήρη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των LTE δικτύων.

Παράλληλα, μια ακόμη τεχνική που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα στα πλαίσια της τεχνολογίας LTE είναι η MIMO. Η τεχνική MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών τόσο στο σταθμό βάσης όσο και στη συσκευή του χρήστη. Για την περίπτωση της τεχνολογίας LTE, σε πρώτη φάση η ύπαρξη MIMO συστημάτων κεραιών 2x2 (δύο κεραίες στο σταθμό βάσης και δύο κεραίες στη συσκευή του χρήστη) θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Σε μεταγενέστερη φάση ανάπτυξης είναι δυνατόν να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4. Αν και η τεχνολογία αυτή εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η περεταίρω μελέτη της για τα δίκτυα LTE, δεδομένων των πλεονεκτημάτων που μπορεί να προσφέρει, είναι επιβεβλημένη. Η μελέτη αυτή θα επιτρέψει τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων, και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες. Παράλληλα, θα επιτρέψει την ταυτόχρονη παροχή υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου και υπηρεσιών δεδομένων.

Η μελλοντική εργασία η οποία μπορεί να επιτελεστεί έχοντας σαν βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να κινηθεί προς τις εξής κατευθύνσεις:

- Την υλοποίηση ενός μηχανισμού για τη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα LTE.
- Την εφαρμογή μηχανισμών ελέγχου ροής και συμφόρησης κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα LTE.
- Την εφαρμογή FEC κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα LTE.

Όσον αφορά στο σχεδιασμό του μηχανισμού για τη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα LTE, ένας μηχανισμός βασισμένος σε αυτόν που περιγράφηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα μπορούσε να αναπτυχθεί. Ο μηχανισμός αυτός θα πρέπει να ενσωματώνει τις ιδιότητες των κινητών δικτύων LTE. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υλοποιηθεί η νέα αρχιτεκτονική ενός κινητού δικτύου LTE όπως αυτή περιγράφεται στην Εικόνα 75. Επίσης, θα πρέπει να υλοποιηθούν και τα διάφορα χαρακτηριστικά και πρωτόκολλα που έχουν ενσωματωθεί στα κινητά δίκτυα LTE και τα οποία χρησιμοποιούνται για την παροχή της υπηρεσίας e-MBMS. Όπως είναι φυσικό το βασικότερο από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η τεχνική MBSFN.

Προκειμένου να μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη η πρόταση του μηχανισμού για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα LTE θα πρέπει να διερευνηθεί μέσω εξομοιώσεων. Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος και παγκοσμίως γνωστός εξομοιωτής δικτύων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Ο εξομοιωτής αυτός θα πρέπει να έχει δυνατότητες ανάλογες αυτών του εξομοιωτή δικτύων ns-2 που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ένα παράδειγμα εξομοιωτή δικτύων είναι αυτό του διαδόχου του ns-2, ο οποίος αναφέρεται ως ns-3 [95]. Ο εξομοιωτής δικτύων ns-3 είναι ένας εξομοιωτής διακριτών γεγονότων ο οποίος βρίσκει εφαρμογές σε εξομοιώσεις διαδικτυακών συστημάτων. Ο εξομοιωτής αυτός επιτρέπει στους ερευνητές να μελετούν διαδικτυακά πρωτόκολλα και συστήματα μεγάλης κλίμακας μέσα σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Πρόκειται για ένα νέο

εξομοιωτή ο οποίος δεν παρουσιάζει προς τα πίσω συμβατότητα προς τον προκάτοχό του, δηλαδή τον εξομοιωτή ns-2. Ο ns-3 παρέχεται δωρεάν και αποτελεί ένα έργο λογισμικού ανοιχτού κώδικα που αναπτύσσεται και συντηρείται από μία ευρεία επιστημονική κοινότητα και ο οποίος απευθύνεται σε ερευνητές και διδάσκοντες δικτυακών εφαρμογών. Στην παρούσα φάση ο εξομοιωτής ns-3 δεν προσφέρει δυνατότητα εξομοίωσης κινητών δικτύων και, κατά συνέπεια, η υποστήριξη της εξομοίωσης κινητών δικτύων στον ns-3 θα αποτελούσε μία πολύ σημαντική συμβολή στην προώθηση της έρευνας στο χώρο.

Σε αντιστοιχία με το σχεδιασμό μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης στα κινητά δίκτυα UMTS, ανάλογη έρευνα μπορεί να διεξαχθεί και για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Στα δίκτυα αυτά θα δίνεται η δυνατότητα για ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και για το λόγο αυτό ο έλεγχος συμφόρησης ενδέχεται να έχει πολύ μεγάλη σημασία. Οι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση δεδομένων, που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στα πλαίσια της μελλοντικής έρευνας. Επιπλέον, θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλοι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης για multicast μετάδοση. Για παράδειγμα, μηχανισμοί που ανήκουν στις άλλες κατηγορίες, όπως αυτές των μηχανισμών με πολλαπλούς ρυθμούς ή με πολλαπλά επίπεδα, μπορεί να εξεταστούν. Στα πλαίσια αυτής της έρευνας διερευνηθεί το κατά πόσο οι διάφοροι εξεταζόμενοι μηχανισμοί μπορούν να εφαρμοστούν στα κινητά δίκτυα νέας γενιάς. Επιπλέον θα μπορούσαν να προταθούν κάποιες τροποποιήσεις οι οποίες θα εισήγαγαν βελτιώσεις στη συμπεριφορά των μηχανισμών αυτών και θα έκαναν πιο αποδοτική την εφαρμογή των μηχανισμών αυτών στα κινητά δίκτυα τεχνολογίας LTE. Τέλος, η αποδοτικότητα και τα διάφορα χαρακτηριστικά για τους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης, θα μπορούσαν αξιολογηθούν και μέσω της μεταξύ τους σύγκρισης.

Ένα άλλο θέμα που σχετίζεται με τον έλεγχο συμφόρησης σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών και το οποίο θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω, είναι η προσαρμογή του μηχανισμού ελέγχου των multicast ομάδων με βάση τη συμφόρηση του δικτύου. Σε κάποιες περιπτώσεις, ένας μόνιμα υποβαθμισμένος ασύρματος σύνδεσμος που συνδέει ένα συγκεκριμένο κινητό εξοπλισμό μπορεί να προκαλεί μία μεγάλη μείωση του ρυθμού μετάδοσης που τελικά να οδηγεί σε μία γενικευμένη υποβάθμιση ολόκληρης της multicast υπηρεσίας. Με αφετηρία αυτό το γεγονός, θα μπορούσε να διερευνηθεί κάτω από ποιες συνθήκες η υποβάθμιση του ασύρματος συνδέσμου θα μπορούσε να προκαλέσει την αποβολή ενός κινητού εξοπλισμού από μία multicast ομάδα.

Όσον αφορά στην πιθανή κατεύθυνση της μελλοντικής έρευνας που σχετίζεται με τη διερεύνηση της επίδρασης της κωδικοποίησης FEC στη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από κινητά δίκτυα LTE, πρόκειται για ένα πεδίο πάνω στο οποίο δεν έχει υπάρξει καμία σχετική έρευνα. Δεδομένου ότι οι προδιαγραφές της τεχνολογίας LTE ως προς την υπηρεσία e-MBMS τείνουν να σταθεροποιηθούν, θα υπάρξει το υπόβαθρο προκειμένου να μπορεί να υπάρξει διερεύνηση της εφαρμογής της κωδικοποίησης FEC. Οι ιδιότητες των κωδίκων Raptor έτσι όπως αυτές περιγράφηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή μπορούν να εφαρμοστούν στα κινητά δίκτυα LTE και να συγκεραστούν με τις ιδιότητες της εξελεγχμένης multicast μετάδοσης. Σε αυτό το πλαίσιο θα μπορεί να διερευνηθεί η εφαρμογή της κωδικοποίησης FEC στο επίπεδο της εφαρμογής για τα δίκτυα αυτά.

Ένα άλλο πιθανό βήμα για μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να είναι η μοντελοποίηση και η υλοποίηση ενός μηχανισμού που ρυθμίζει δυναμικά το ποσό

των συμβόλων κωδικοποίησης για τον κώδικα FEC στο επίπεδο εφαρμογής. Ο μηχανισμός αυτός θα υλοποιεί ένα πρωτόκολλο το οποίο θα αποσκοπεί στην αποδοτική εφαρμογή του μηχανισμού FEC. Ο μηχανισμός θα παρακολουθεί τις τρέχουσες συνθήκες μέσα στο δίκτυο και θα τις χρησιμοποιεί σαν είσοδο προκειμένου να ρυθμίζει με ένα βέλτιστο τρόπο το χρησιμοποιούμενο FEC overhead καθώς και την ισχύ μετάδοσης. Οι παράμετροι που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, όπως η πυκνότητα των multicast χρηστών μέσα στο δίκτυο, ο μέσος πληθυσμός τους ανά κελί και ο μέσος ρυθμός λαθών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου για το νέο αυτό μηχανισμό.

Τέλος, μελλοντική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει η μελέτη και αξιολόγηση παροχής e-MBMS υπηρεσιών πάνω από δίκτυα LTE. Το συγκεκριμένο θέμα κατέχει ίσως το μεγαλύτερο μερίδιο της μελλοντικής εργασίας καθώς θα επιτρέψει τη μετάδοση πλούσιων πολυμεσικών δεδομένων σε δίκτυα LTE, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ομαλή και αποδοτική λειτουργία τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

- [1] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** A Study of Forward Error Correction for Mobile Multicast. *International Journal of Communication Systems*. Wiley InterScience. (accepted with revisions).

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μία μελέτη της εφαρμογής του FEC κατά τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Αρχικά εξετάζεται είναι αν η εφαρμογή του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση του κώδικα διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο. Επίσης, εντοπίζονται οι παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή της βέλτιστης διάστασης του κώδικα και τον τρόπο που την επηρεάζουν. Επιπλέον, διερευνάται ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα σχετικά με τη multicast μετάδοση σε κινητά δίκτυα, το οποίο είναι ο έλεγχος ισχύος. Η αξιολόγηση εκτελείται με τη βοήθεια ενός καινοτόμου μηχανισμού που ενσωματώνει τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου, έτσι όπως αυτές καθορίζονται από τον οργανισμό 3GPP.

- [2] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** An Efficient Mechanism for UMTS Multicast Routing. *Mobile Networks and Applications*. Springer Netherlands. 2009, online.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας νέος μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων στα δίκτυα UMTS. Καλύπτονται σενάρια πέραν από την τυπική multicast μετάδοση σε UMTS και τα οποία οφείλονται στην κινητικότητα των χρηστών. Ο προτεινόμενος μηχανισμός βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τις προδιαγραφές της υπηρεσίας MBMS, έτσι όπως έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Επίσης εισάγονται ελάχιστες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική του UMTS και στις διαδικασίες της διαχείρισης κινητικότητας χρηστών. Ο μηχανισμός υλοποιείται ως τμήμα του εξομοιωτή δικτύων ns-2 και μέσω πειραμάτων εξομοιώσεων στον ns-2 η απόδοσή του αξιολογείται και αναλύεται. Το νέο αυτό τμήμα του εξομοιωτή ns-2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων όσον αφορά στη multicast μετάδοση δεδομένων στο UMTS. Τέλος, προκειμένου να δοθεί μία ένδειξη της συνεισφοράς του μηχανισμού, έχουν υλοποιηθεί δύο τεχνικές για έλεγχο συμφόρησης κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων στο UMTS. Η απόδοση αυτών των τεχνικών για τη μετάδοση δεδομένων στην υπηρεσία MBMS μελετάται διεξοδικά.

- [3] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** A study of multicast congestion control for UMTS. *International Journal of Communication Systems*, 22. Wiley InterScience. 2009. 739-754.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία μελετάται η εφαρμογή του ελέγχου συμφόρησης στη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω σε κινητά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα UMTS. Αναλύονται δύο γνωστοί μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης και πιο συγκεκριμένα ο μηχανισμός TCP-friendly multicast congestion control και ο pragmatic general multicast congestion

control. Η συμπεριφορά των μηχανισμών αυτών μελετάται όταν χρησιμοποιούνται σε δίκτυα UMTS και επιπλέον αναλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν όταν οι μηχανισμοί αυτοί εφαρμόζονται πάνω στους ασύρματους συνδέσμους του δικτύου ασύρματης πρόσβασης του UMTS. Επιπρόσθετα, προτείνονται οι αναγκαίες βελτιώσεις που χρειάζονται οι υπάρχοντες μηχανισμοί και εξηγείται η σημασία τους. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί υλοποιούνται στον εξομοιωτή δικτύων ns-2 και μελετούνται υπό διάφορες συνθήκες και τοπολογίες δικτύων. Τέλος, αξιολογείται η απόδοση των προτεινόμενων μηχανισμών μετά τις τροποποιήσεις και συγκρίνεται με αυτή των αντίστοιχων υπάρχόντων μηχανισμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΣΕ ΒΙΒΛΙΑ

- [1] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** Chapter 10: Congestion Control for Multicast Transmission over UMTS. *Wireless Quality of Service: Techniques, Standards and Applications*, Auerbach Publications. Taylor & Francis Group. 2009.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας μηχανισμός για τον έλεγχο συμφόρησης κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε δίκτυα UMTS. Ο προτεινόμενος μηχανισμός είναι βασισμένος πάνω στο γνωστό μηχανισμό TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC). Ο TFMCC είναι ένας μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης για τη multicast μετάδοση που βασίζεται σε εξίσωση και ουσιαστικά επεκτείνει τη χρήση του πρωτοκόλλου TCP-friendly rate control από τη unicast μετάδοση στη multicast. Ανήκει στην ομάδα των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης μοναδικού ρυθμού οι οποίοι αναπόφευκτα δεν προσφέρουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης όπως κάνουν οι πολύ-επίπεδοι μηχανισμοί. Παρόλα αυτά είναι τόσο απλοί ώστε να εξυπηρετούν ένα θεμελιώδη στόχο για τη multicast μετάδοση σε UMTS δίκτυα που είναι η επεκτασιμότητα για τις εφαρμογές που απευθύνονται σε χιλιάδες χρήστες. Ο προτεινόμενος μηχανισμός προκύπτει από τη μερική τροποποίηση του TFMCC. Για την ακρίβεια, ο TFMCC επεκτείνεται για να υποστηρίξει τις ιδιαιτερότητες του δικτύου ασύρματης πρόσβασης του UMTS.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

- [1] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** The Impact of FEC on Mobile Multicast Power Control. In *Proceedings of Sixth Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2010)*. 2010.

Περίληψη: Στην εργασία αυτή διερευνάται η επίδραση της εφαρμογής του FEC κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Η διερεύνηση γίνεται με εστίαση στον έλεγχο ισχύος και η αξιολόγηση γίνεται με τη βοήθεια ενός νέου μηχανισμού που επιτρέπει την εξομοίωση της επίδρασης του FEC και κατά την streaming μεταφορά δεδομένων και κατά τη download μεταφορά δεδομένων μέσω multicast συνόδων. Κάτι που είναι πολύ σημαντικό είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός ενσωματώνει τις ιδιότητες ενός εξελιγμένου κινητού δικτύου επικοινωνιών όπως αυτές καθορίζονται από τις προδιαγραφές του 3GPP.

- [2] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** Adopting Forward Error Correction for Multicasting over Cellular Networks. In *Proceedings of 16th European Wireless Conference (EW 2010)*. 2010.

Περίληψη: Στην εργασία αυτή διερευνάται η εφαρμογή του FEC κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα πιθανοτικό μοντέλο για την εξομοίωση κατανομή των multicast χρηστών στο δίκτυο και ορίζεται ένας μηχανισμός ελέγχου λαθών κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων. Ο μηχανισμός αυτός είναι υβριδικός καθώς συνδυάζει το FEC με το παραδοσιακό ARQ. Είναι σημαντικό ότι διεξαχθείσα ανάλυση είναι πλήρως συμβατή με τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί από το 3GPP και λαμβάνει υπόψη τις πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο των κινητών δικτύων. Σε αυτό το πλαίσιο διερευνάται η επίδραση της χρήσης του FEC, εξετάζεται εάν η χρήση του FEC είναι αποδοτική ή όχι, πώς η βέλτιστη διάσταση για τον κώδικα FEC μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο, ποιες παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή του βέλτιστου κώδικα FEC καθώς και ο τρόπος που το κάνουν. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω πειραμάτων εξομοίωσης και τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η ανάλυσή τους παρουσιάζονται διεξοδικά.

- [3] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** Bridging UMTS and Multicast Routing in ns-2. In *Proceedings of 1st International Conference on Simulation tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops (SIMUTools 2008)*. 2008.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός νέου μηχανισμού για τη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από δίκτυα UMTS. Ο προτεινόμενος μηχανισμός υλοποιείται ως τμήμα του εξομοιωτή δικτύων ns-2 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστούν διάφορα θέματα πάνω στη multicast μετάδοση σε δίκτυα UMTS. Καλύπτονται σενάρια πέραν από την τυπική multicast μετάδοση σε UMTS και τα οποία οφείλονται στην κινητικότητα των χρηστών. Ο προτεινόμενος μηχανισμός βρίσκεται σε

απόλυτη συμφωνία με τις προδιαγραφές της υπηρεσίας MBMS, έτσι όπως έχουν καθοριστεί από το 3GPP. Επίσης εισάγονται ελάχιστες τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική του UMTS και στις διαδικασίες της διαχείρισης κινητικότητας χρηστών. Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού αξιολογείται και αναλύεται μέσω πειραμάτων εξομοίωσης και τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η ανάλυσή τους παρουσιάζονται διεξοδικά.

- [4] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** On the Applicability of “pgmcc” to UMTS Multicast. In *Proceedings of 2007 International Conference on Late Advances in Networks (ICLAN 2007)*. 2007. 67 - 72.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία διερευνάται η εφαρμογή του μηχανισμού Pragmatic General Multicast Congestion Control (pgmcc) στη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από δίκτυα UMTS. Καταρχάς εξηγείται ο λόγος που ο υπάρχων μηχανισμός pgmcc δεν μπορεί να υποστηρίξει την υποβάθμιση των ασύρματων καναλιών στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης του UMTS. Η πιο σημαντική συνεισφορά της παρούσας εργασίας είναι ότι ο υπάρχων μηχανισμός τροποποιείται προκειμένου να ανταπεξέλθει στο φαινόμενο της απώλειας πακέτων είτε λόγω της προσωρινής είτε της μόνιμης υποβάθμισης των ασύρματων καναλιών. Ο νέος μηχανισμός εισάγει ελάχιστες τροποποιήσεις στους κόμβους του UMTS και λαμβάνει υπόψη την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ του κινητού εξοπλισμού. Τέλος, η εξεταζόμενη προσέγγιση εξομοιώνεται και αξιολογείται κάτω από διάφορες συνθήκες. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εξομοίωσης καθώς και η ανάλυσή τους παρουσιάζονται διεξοδικά.

- [5] Alexiou, A., Bouras, C., **Papazois, A.** Multicast in UMTS: Adopting TCP-Friendliness In *Proceedings of 12th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications (PWC 2007)*. 2007. 433-444.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας νέος μηχανισμός για τον έλεγχο συμφόρησης στη multicast μετάδοση δεδομένων πάνω από δίκτυα UMTS. Ο προτεινόμενος μηχανισμός βασίζεται στον ήδη γνωστό μηχανισμό TCP-Friendly Multicast Congestion Control (TFMCC). Η κύρια πρόκληση στο σχεδιασμό του νέου μηχανισμού έγκειται στη βελτίωσή του υπάρχοντος μηχανισμού TFMCC προκειμένου να ανταπεξέλθει στις απώλειες πακέτων που προκαλούνται είτε λόγω της προσωρινής είτε της μόνιμης υποβάθμισης των ασύρματων καναλιών. Ο νέος μηχανισμός εισάγει ελάχιστες τροποποιήσεις στους κόμβους του UMTS και λαμβάνει υπόψη την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ του κινητού εξοπλισμού. Τέλος, η εξεταζόμενη προσέγγιση εξομοιώνεται και αξιολογείται κάτω από διάφορες συνθήκες.

- [6] Alexiou, A., Antonellis, D., Bouras, C., **Papazois, A.** An efficient multicast packet delivery scheme for UMTS. In *Proceedings of 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2006)*. 2006. 147-150.

Περίληψη: Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας αποδοτικός μηχανισμός για τη multicast μετάδοση δεδομένων σε δίκτυα UMTS. Ο νέος αυτός

μηχανισμός χρησιμοποιεί τη δεντρική τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου και εισάγει τη χρήση των λιστών δρομολόγησης στους κόμβους του UMTS. Η υιοθέτηση αυτών των λιστών οδηγεί στη μείωση των μεταδιδόμενων πακέτων και στην αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου κατά τη multicast μετάδοση δεδομένων. Επιπλέον, εξετάζεται ο χειρισμός ειδικών περιπτώσεων όπως τα διάφορα σενάρια κινητικότητας χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι διάφοροι τύποι handover καθώς και η διαδικασία serving radio network subsystem relocation.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] 3GPP TR 101.102. *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS*. Version 3.2.0. 1998.
- [2] 3GPP TR 23.846. *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Stage 2*. Version 6.1.0. 2003.
- [3] 3GPP, TR 25.803. *Technical Specification Group Radio Access Network; S-CCPCH performance for MBMS; (Release 6)*. Version 6.0.0. 2005.
- [4] 3GPP TR 25.858. *Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access*. Version 5.0.0. 2002.
- [5] 3GPP TR 25.922. *Radio resource management strategies*. Version 7.1.0. 2007.
- [6] 3GPP TS 21.101. *Technical Specifications and Technical Reports for a UTRAN-based 3GPP system*. Version 8.2.1. 2009.
- [7] 3GPP TS 22.146. *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Stage 1*. Version 9.0.0. 2008.
- [8] 3GPP TS 22.246. *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) user services; Stage 1*. Version 9.0.0. 2009.
- [9] 3GPP TS 23.002. *Network architecture*. Version 9.2.0. 2009.
- [10] 3GPP TS 23.009. *Handover procedures*. Version 9.0.0. 2009.
- [11] 3GPP TS 23.060. *General Packet Radio Service (GPRS); Service description; Stage 2*. Version 9.3.0. 2009.
- [12] 3GPP TS 23.101. *General UMTS Architecture*. Version 9.0.0. 2009.
- [13] 3GPP TS 23.246. *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description*. Version 9.3.0. 2009.
- [14] 3GPP TS 25.101. *User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)*. Version 9.2.0. 2009.
- [15] 3GPP TS 25.104. *Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)*. Version 9.2.0. 2009.
- [16] 3GPP TS 25.211. *Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)*. Version 9.1.0. 2009.
- [17] 3GPP TS 25.212. *Multiplexing and channel coding (FDD)*. Version 9.1.0. 2009.
- [18] 3GPP TS 25.301. *Radio interface protocol architecture*. Version 9.0.0. 2009.
- [19] 3GPP TS 25.308. *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2*. Version 9.1.0. 2009.
- [20] 3GPP TS 25.321. *Medium Access Control (MAC) protocol specification*. Version 9.1.0. 2009.
- [21] 3GPP TS 25.322. *Radio Link Control (RLC) protocol specification*. Version 9.0.0. 2009.

- [22] 3GPP TS 25.331. *Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. Version 9.1.0. 2009.
- [23] 3GPP TS 25.346. *Introduction of the Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) in the Radio Access Network (RAN); Stage 2*. Version 9.0.0. 2009.
- [24] 3GPP TS 25.413. *UTRAN Iu interface Radio Access Network Application Part (RANAP) signaling*. Version 9.1.0. 2009.
- [25] 3GPP TS 25.423. *UTRAN Iur interface Radio Network Subsystem Application Part (RNSAP) signaling*. Version 9.1.0. 2009.
- [26] 3GPP TS 25.803. *S-CCPCH performance for Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS)*. Version 6.0.0. 2005.
- [27] 3GPP TS 26.346. *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and codecs*. Version 9.1.0. 2009.
- [28] 3GPP TSG-RAN WG1#28, R1-021224. *Power allocation for MBMS*. 2002.
- [29] 3GPP TSG-RAN WG2#29, R2-021669. *Considerations on power allocation for MBMS*. 2002.
- [30] 3GPP TSG-RAN WG2#31, R2-022110. *MBMS Power Usage*. 2002
- [31] 3GPP TSG-RAN WGx#29 R1-021325. *Comparison of DSCH and FACH for MBMS*. 2002.
- [32] Alexiou, A., Antonellis, D., Bouras, C., Papazois, A. An efficient multicast packet delivery scheme for UMTS. In *Proceedings of 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2006. 147-150.
- [33] Alexiou A., Bouras, C. Multicast in UMTS: evaluation and recommendations. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(4). 2006. 463–481.
- [34] Alexiou, A., Bouras, C., Igglesis, V. Performance Evaluation of TCP over UMTS Transport Channels. In *Proceedings of 7th International Symposium on Communications Interworking*. 2004.
- [35] Alexiou, A., Bouras, C., Igglesis, V. Performance Evaluation of UMTS for Mobile Internet Access. In *Proceedings of 12th Annual Meeting of the IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. 2004. 615 – 618.
- [36] Alexiou, A., Bouras, C., Kokkinos, V., Rekkas, E. An improved mechanism for multiple MBMS sessions assignment in B3G cellular networks. *Wireless Netw.* 2009. (Published online).
- [37] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. Adopting Forward Error Correction for Multicasting over Cellular Networks. In *Proceedings of 16th European Wireless Conference*. 2010.
- [38] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. An Efficient Mechanism for UMTS Multicast Routing. *Mobile Networks and Applications*. 2009, online.
- [39] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. A study of multicast congestion control for UMTS. *International Journal of Communication Systems*, 22. 2009. 739-754.

- [40] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. Bridging UMTS and Multicast Routing in ns-2. In *Proceedings of 1st International Conference on Simulation tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*. 2008.
- [41] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. Chapter 10: Congestion Control for Multicast Transmission over UMTS. *Wireless Quality of Service: Techniques, Standards and Applications*. Auerbach Publications. 2009.
- [42] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. Multicast in UMTS: Adopting TCP-Friendliness. In *Proceedings of 12th IFIP International Conference on Personal Wireless Communications*. 2007. 433-444.
- [43] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. On the Applicability of “pgmcc” to UMTS Multicast. In *Proceedings of 2007 International Conference on Late Advances in Networks*. 2007. 67-72.
- [44] Alexiou, A., Bouras, C., Papazois, A. The Impact of FEC on Mobile Multicast Power Control. In *Proceedings of Sixth Advanced International Conference on Telecommunications*. 2010.
- [45] Boni, A., Launay, E., Mienville, T., Stuckmann P. Multimedia Broadcast Multicast Service - Technology Overview and Service Aspects. In *Proceedings of 5th IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*. 2004. 634-638.
- [46] Cai, J., Goodman, D. General Packet Radio Service in GSM. *IEEE Communications Magazine*. 1997. 122-131.
- [47] Chan, M. C., and Ramjee, R. TCP/IP Performance over 3G Wireless Links with Rate and Delay Variation. *Wireless Networks*, 11(1-2). 2005. 81-97.
- [48] Christophorou, C., Pitsillides, A. MBMS Handover Control for Efficient Multicasting in IP-Based 3G Mobile Networks. In *Proceedings of 2006 IEEE Int. Conference of Communications*. 2006. 2112-2117.
- [49] Ericsson Telecommunicatie B.V. *User Manual for EURANE*. The SEACORN Project. 2005.
- [50] E.U.R.A.N.E. *Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions for ns-2*. Available at: <http://eurane.ti-wmc.nl/eurane/>.
- [51] Eylert, B. *The Mobile Multimedia Business: Requirements and Solutions*. John Wiley & Sons. 2005.
- [52] Fitzek, F. Reisslein, M. MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation. *IEEE Network*. 2001. 40-54.
- [53] Floyd, S., Handley, M., Padhye, J., Widmer, J. *TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification*. IETF RFC 5348. 2008.
- [54] Fu, C. P., Liew, S. C. TCP Veno: TCP enhancement for transmission over wireless access networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 54(2). 2003. 216-228.
- [55] Greis, G., VINT Group. *Tutorial for the Network Simulator “ns”*.
- [56] Holland, O., Aghvami, H. Dynamic Switching between One-to-Many Download Methods in “All-IP” Cellular Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(3). 2006. 274-287.

- [57] Holma, H., Toskala, A. *HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*. John Wiley & Sons. 2006.
- [58] Holma, H., Toskala, A. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE. 4th edition*. John Wiley & Sons. 2007.
- [59] Hauge, M., Kure, O. Multicast in 3G networks: Employment of existing IP multicast protocols in UMTS, in *Proceedings of 5th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia*. 2002. 96–103.
- [60] E. Hepsaydir, E. Witvoet, N. Binucci and S. Jadhav, Enhanced MBMS in UMTS Networks and Raptor Codes. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2007. 1–5.
- [61] ITU-T Recommendation I.113. *Vocabulary for terms of broadband access of ISDN*. 1997.
- [62] Ivankovic, T. Support of multimedia broadcast/multicast service in UMTS networks. In *Proceedings of the 8th International Conference on Telecommunications*. 2005. 91-98.
- [63] Iskander, C. Mathiopoulos, P. Online Smoothing of VBR H.263 Video for the CDMA200 and IS-95B Uplinks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 6(4). 2004. 647-658.
- [64] Korhonen, J. *Introduction to 3G Mobile Communications*. 2nd edition, Artech House. 2003.
- [65] Lescuyer, P., Lucidarme, T. *Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. John Wiley & Sons. 2008.
- [66] Lin, Y. A multicast mechanism for mobile networks. *IEEE Communication Letters*, 5(11). 2001. 450–452.
- [67] Liu, J., Li, B., Zhang, Y. Q. Adaptive video multicast over the Internet. *IEEE Multimedia*, 10(1). 2003. 22-33.
- [68] Lohmar, T., Peng Z., Mahonen P. Performance Evaluation of a File Repair Procedure Based on a Combination of MBMS and Unicast Bearers. In *Proceedings of IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks*. 2006. 349–357.
- [69] Luby, M., Gasiba, T., Stockhammer T., Watson M. Reliable Multimedia Download Delivery in Cellular Broadcast Networks *IEEE Transactions on Broadcasting*, 53(1). 2007. 235–246.
- [70] Luby, M., Vicisano, L., Gemmell, J., Rizzo, L., Handley, M., Crowcroft, J. *Forward error correction (FEC) building block*. RFC 3452. 2002.
- [71] Luby, M., Vicisano, L., Gemmell, J., Rizzo, L., Handley, M., Crowcroft, J. *The use of forward error correction in reliable multicast*. IETF RFC 3453. 2002.
- [72] Paila, T., Luby, M., Lehtonen, R., Roca, V., Walsh R. *FLUTE-File Delivery Over Unidirectional Transport*. IETF RFC 3926. 2004.
- [73] Luby, M., Watson, M., Gasiba, T. Stockhammer, T., Wen, W. Raptor Codes for Reliable Download Delivery in Wireless Broadcast Systems. In *Proceedings of*

- IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, 1. 2006. 192-197.
- [74] MacKay, D. J. C. Fountain Codes. *IEE Proceedings - Communications*, 152(6). 2005. 1062 – 1068.
 - [75] Malkowski, C. UTRAN Enhancements for Multicast. In *Proceedings of IST/EU International Workshop on Hybrid Wireless Networks workshop*. 2003.
 - [76] Nilsson, M. Third Generation Radio Access Standards. *Ericsson Review*, 3. 1999.
 - [77] Nokia Telecommunications, white paper. *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)*. 1999.
 - [78] Nortel. *GSM-UMTS Network Evolution Positioning Paper*. 2005.
 - [79] Ogunbenkun, J., Mendjeli, A. MBMS service provision and its challenges. In *Proceedings of 4th International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*. 2003. 128 -133.
 - [80] OverDRiVE project IST-2001-35125. *Spectrum Efficient Multicast and Asymmetric Services in UMTS*.
 - [81] Parkvall, S., Englund, E., Lundevall, M., Torsner, J. Evolving 3G Mobile Systems: Broadband and Broadcast Services in WCDMA. *IEEE Communications Magazine*, 44(2). 2006. 30-36.
 - [82] Perez-Romero, J., Sallent, O., Agusti, R., Diaz-Guerra, M. *Radio Resource Management Strategies in UMTS*. John Wiley & Sons. 2005.
 - [83] Rhee, I., Ozdemir, V., Yi, Y. *TEAR: TCP emulation at receivers – flow control for multimedia streaming*. Technical report, Department of Computer Science, NCSU. 2000.
 - [84] Rizzo, L. PGMCC: a TCP-friendly single-rate multicast congestion control scheme. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 30(4). 2000. 17-28.
 - [85] Rummler, R., Chung, Y., Aghvami, H. Modeling and Analysis of an Efficient Multicast Mechanism for UMTS. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(1). 2005. 350-365.
 - [86] Saito, T., Yamamoto, M. Wireless-caused representative selection fluctuation problem in wireless multicast congestion control. *IEICE Transactions on Communications*, E88-B(7). 2005. 2819-2825.
 - [87] Schinnenburg, M., Forkel, I., Haverkamp, B. Realization and optimization of soft and softer handover in UMTS networks. In *Proceedings of the 5th European Personal Mobile Communications Conference*. 2003. 603-607.
 - [88] Schulzrinne, H., Casner, S., Frederick, R., Jacobson, V. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. *IETF RFC 1889*. 1996.
 - [89] Sesia, S., Toufik, I., Baker, M. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons. 2009.
 - [90] Silva, C., Souto, S., Cercas, C., Correia, A., Rodrigues, J. *Characterization of Power Control for UMTS*. In *Proceedings of International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, 2. 2003. 443-447.

- [91] Spaniol, O. Mobility Management in UMTS. *Datacommunication & Distributed Systems*. 2003.
- [92] Speakman, T., Crowcroft, J. Gemmell, J. Farinacci, D. Lin, S. Leshchiner, D. Luby, M. Montgomery, T. Rizzo, L. Tweedly, A. Bhaskar, N. Edmonstone, R. Sumanasekera, R. Vicisano, L. *PGM reliable transport protocol specification*. RFC 3208. 2001.
- [93] Tan W. T., Zakhor, A. Video multicast using layered FEC and scalable compression. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 11(3). 2001. 373-386.
- [94] *The Network Simulator ns-2*. Available at: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [95] *The ns-3 Network Simulator*. Available at: <http://www.nsnam.org/>.
- [96] *The UMTS multicast module for ns-2*. Available at: http://ru6.cti.gr/ru6/umts_downloads.php.
- [97] Vojnovic, M., Le Boudec, J. Y. On the long-run behavior of equation-based rate control. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(3). 2005. 568-581.
- [98] Wang, N., Zhang, Z. The impact of application layer Raptor FEC on the coverage of MBMS. In *Proceedings of Radio and Wireless Symposium*. 2008. 223-226.
- [99] Widmer, J., Boutremans, C., Le Boudec, J-Y. End-to-end Congestion Control for TCP-Friendly Flows with Variable Packet Size. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 34(2). 2004. 137-151.
- [100] Widmer, J., Denda, R., Mauve, M. A Survey on TCP-Friendly Congestion Control. *IEEE Network*, 15(3). 2001. 28-37.
- [101] Widmer, J., Handley, M. Extending equation-based congestion control to multicast Applications. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 31(4). 2001. 275-285.
- [102] Yang, S., Lin, Y. Performance evaluation of location management in UMTS. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(6). 2003. 1603-1615.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΑΚΡΩΝΥΜΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΑ

Ακρώνυμο	Επεξήγηση
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
8-PSK	Eight-Phase Shift Keying
AAL	ATM Adaptation Layer
ACK	Acknowledgement
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AuC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BLER	Block Error Ratio
BMC	Broadcast Control
BM-SC	Broadcast / Multicast Service Center
CCCH	Common Control Channel
CCPCH	Common Control Physical Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CLR	Current Limiting Receiver
CN	Core Network
CP	Control Plane
CPCH	Common Packet Channel
CS	Circuit Switched
CTCH	Common Traffic Channel
D-AMPS	Digital AMPS
DCCH	Dedicated Control Channel

DCH	Dedicated Channel
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DRL	Drift Routing List
DRNC	Drift RNC
DSCH	Downlink Shared Channel
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DVB	Digital Video Broadcast
DVB-H	DVB - Handheld
DVMRP	Distance Vector Multicast Routing Protocol
E-DCH	Enhanced - DCH
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
e-MBMS	Evolved - MBMS
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EURANE	Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions
FACH	Forward Access Channel
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FLUTE	File Delivery over Unidirectional Transport
FTP	File Transfer Protocol
FFT	Fast Fourier Transform
G	Geometry Factor
GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway MSC
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunnelling Protocol

HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HLR	Home Location Register
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel
HSPA	High Speed Packet Access
HS-PDSCH	High Speed - Physical Downlink Shared Channel
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IGMP	Internet Group Management Protocol
IMT	International Mobile Telephony
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
LA	Location Area
LT	Luby Transform
LTE	Long Term Evolution
M3UA	MTP3 User Adaptation Layer
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast / Multicast Service
Mbps	Mega bits per second
MBSFN	Multicast/Broadcast Single-Frequency Networking
MCCH	Multicast Control Channel
MCE	Multi-cell/multicast Coordination Entity
MCH	Multicast Channel
MGL	Multicast Group List
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MM	Mobility Management
MOSFP	Multicast Open Shortest Path
M-PDP	Multicast-Packet Data Protocol
MSC	Mobile Services Switching Center

MTCH	Multicast Traffic Channel
MTP3-b	Message Transfer Part Level 3
NAK	Negative Acknowledgment
NBAP	Node B Application Part
NMT	Nordic Mobile Telephone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
PAR	Peak-to-Average Ratio
PCCH	Paging Control Channel
PCH	Paging Channel
PDA	Personal Digital Assistant
PDC	Personal Digital Cellular
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Public Data Network
PDU	Protocol Data Unit
PGM	Pragmatic General Multicast
PGMCC	PGM Congestion Control
PIM	Protocol Independent Multicast
PMM	Packet MM
PS	Packet Switched
PSTN	Public Telephone Switched Network
p-t-m	Point-to-Multipoint
p-t-p	Point-to-Point
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RA	Routing Area
RACH	Random Access Channel

RAN	Radio Access Network
RANAP	Radio Access Network Application Part
RL	Radio Link
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network Subsystem
RNSAP	Radio Network Sublayer Application Part
RRC	Radio Resource Control
RSN	Retransmission Sequence Number
RTCP	Real-time Transport Control Protocol
RTP	Real-time Transport Protocol
RTT	Round-Trip Time
SCCP	Signalling Connection Control Part
S-CCPCH	Secondary Common Control Physical Channel
SC-OFDM	Single Carrier OFDM
SGSN	Serving GPRS Support Node
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SRNC	Serving RNC
SRNS	Serving RNS
SSCF-UNI	Service Specific Coordination Function for Support of Signalling at the User-Network Interface
SSCOP	Service Specific Connection-Oriented Protocol
STTD	Space Time Transmit Diversity
TACS	Total Access Communication System
TCP	Transport Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TFMCC	TCP-Friendly Multicast Congestion Control
TFRC	TCP-Friendly Rate Control
TTI	Transmission Time Interval

UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	User Plane
UPFP	User Plane Framing Protocol
URA	UTRAN Registration Area
USCH	Uplink Shared Channel
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN	UTRA Network
VLR	Visitor Location Register
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband CDMA

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

0-9

3GPP system: the telecommunication system standardised by the 3GPP consisting of a core network and a radio access network that may be either GERAN or UTRAN, or both.

A

Active set: Set of radio links simultaneously involved in a specific communication service between an UE and a UTRAN access point.

Automatic repeat request (ARQ): An error-control method for data transmission that uses acknowledgements and timeouts to achieve reliable data transmission over an unreliable service.

B

Base station (Node B): A base station is a network element in radio access network responsible for radio transmission and reception in one or more cells to or from the user equipment. A base station can have an integrated antenna or be connected to an antenna by feeder cables. In UTRAN it terminates the Iub interface towards the RNC.

Bearer: An information transmission path of defined capacity, delay and bit error rate, etc.

Bearer service: A type of telecommunication service that provides the capability of transmission of signals between access points.

Best effort service: A service model which provides minimal performance guarantees, allowing an unspecified variance in the measured performance criteria.

Broadcast: A value of the service attribute “communication configuration”, which denotes unidirectional distribution to all users [61].

C

Call: a logical association between several users (this could be connection oriented or connection less).

Cell: Radio network object that can be uniquely identified by a User Equipment from a (cell) identification that is broadcasted over a geographical area from one UTRAN Access Point. A Cell is either FDD or TDD mode.

Common channel: A channel not dedicated to a specific UE.

Connected mode: Connected mode is the state of User Equipment switched on and an RRC connection established.

Connection: A communication channel between two or more end-points (e.g. terminal, server etc.).

Control channel: A logical channel that carries system control information.

Core network (CN): An architectural term relating to the part of 3GPP System which is independent of the connection technology of the terminal (e.g. radio, wired).

Coverage area (of a mobile cellular system): An area where mobile cellular services are provided by that mobile cellular system to the level required of that system.

D

Dedicated channel (DCH): A channel dedicated to a specific UE.

Downlink: Unidirectional radio link for the transmission of signals from a UTRAN access point to a UE. Also in general the direction from Network to UE.

F

Forward Error Correction: A system of error control for data transmission, whereby the sender adds redundant data to its messages, also known as an error-correction code. This allows the receiver recover errors without the need to ask the sender for additional data.

G

GSM core network: refers in this specification to the GSM NSS and GPRS backbone infrastructure.

GSM/EDGE radio access network (GERAN): A conceptual term identifying that part of the network which consists of BSCs and BTSs between A/Gb or Iu and Um interfaces.

H

Handover: The transfer of a user's connection from one radio channel to another (can be the same or different cell).

Hard handover: Hard handover is a category of handover procedures where all the old radio links in the UE are abandoned before the new radio links are established.

I

Idle mode: The state of UE switched on but which does not have any established RRC connection.

Intercell handover: A handover between different cells. An intercell handover requires network connections to be altered.

Intersystem handover: Handover between networks using different radiosystems, e.g. UMTS - GSM.

Intracell handover: A handover within one sector or between different sectors of the same cell. An intracell handover does not require network connections to be altered.

Iu: Interconnection point between an RNC or a BSC and a 3G Core Network. It is also considered as a reference point.

Iub: Interface between an RNC and a Node B.

Iur: A logical interface between two RNC. Whilst logically representing a point to point link between RNC, the physical realisation may not be a point to point link.

L

Logical channel: A logical channel is an information stream dedicated to the transfer of a specific type of information over the radio interface. Logical Channels are provided on top of the MAC layer.

Long Term Evolution (LTE): The project name of a new high performance air interface for cellular mobile communication systems. It is the last step toward the 4th generation (4G) of radio technologies designed to increase the capacity and speed of mobile telephone networks.

M

Macrocells: “Macrocells” are outdoor cells with a large cell radius.

Medium access control (MAC): A sub-layer of radio interface layer 2 providing unacknowledged data transfer service on logical channels and access to transport channels.

Microcells: “Microcells” are small cells.

Mobility: The ability for the user to communicate whilst moving independent of location.

Multicast service: A unidirectional p-t-m service in which a message is transmitted from a single source entity to all subscribers currently located within a geographical area. The message contains a group identifier indicating whether the message is of interest to all subscribers or to only the subset of subscribers belonging to a specific multicast group.

Multipoint: A value of the service attribute “communication configuration”, which denotes that the communication involves more than two network terminations [61].

P

Packet data protocol (PDP): Any protocol which transmits data as discrete units known as packets, e.g., IP, or X.25.

Packet-switched (PS): Packet switching is a digital network communications method that groups all transmitted data, irrespective of content, type, or structure into suitably-sized blocks, called packets.

Paging: The act of seeking a User Equipment.

Physical channel: In FDD mode, a physical channel is defined by code, frequency and, in the uplink, relative phase (I/Q). In TDD mode, a physical channel is defined by code, frequency, and time-slot.

Picocells: “Picocells” are cells, mainly indoor cells, with a radius typically less than 50 metres.

Point-to-multipoint (p-t-m) service: A service type in which data is sent to “all service subscribers or a pre-defined subset of all subscribers” within an area defined by the Service Requester.

Point-to-point (p-t-p): A value of the service attribute “communication configuration”, which denotes that the communication involves only two network terminations.

Power control: The intelligent selection of transmit power in a communication system to achieve good performance within the system.

R

Radio access bearer: The service that the access stratum provides to the non-access stratum for transfer of user data between User Equipment and CN.

Radio access mode: Mode of the cell, FDD or TDD.

Radio access technology: UTRA, GERAN, etc.

Radio interface: The “radio interface” is the tetherless interface between User Equipment and a UTRAN access point. This term encompasses all the functionality required to maintain such interfaces.

Radio network controller (RNC): This equipment in the RNS is in charge of controlling the use and the integrity of the radio resources.

Radio network subsystem (RNS): Either a full network or only the access part of a UTRAN offering the allocation and the release of specific radio resources to establish means of connection in between an UE and the UTRAN. A Radio Network Subsystem is responsible for the resources and transmission/reception in a set of cells.

Radio resource control (RRC): A sublayer of radio interface Layer 3 existing in the control plane only which provides information transfer service to the non-access stratum. RRC is responsible for controlling the configuration of radio interface Layers 1 and 2.

Radio system: the selected 2nd or 3rd generation radio access technology, eg UTRAN or GERAN.

Real time: Time, typically in number of seconds, to perform the on-line mechanism used for fraud control and cost control.

Release 99: A particular version of the 3GPP System standards produced by the 3GPP project. Also: Release 4, Release 5, Release 6 etc.

Round-trip time (RTT): The time required for a packet to travel from a specific source to a specific destination and back again.

S

Sector: A sub-area of a cell. All sectors within one cell are served by the same base station. A radio link within a sector can be identified by a single logical identification belonging to that sector.

Serving RNS (SRNS): A role an RNS can take with respect to a specific connection between an UE and UTRAN. There is one Serving RNS for each UE that has a connection to UTRAN. The Serving RNS is in charge of the RRC connection between a UE and the UTRAN. The Serving RNS terminates the Iu for this connection.

Shared channel: A radio resource (transport channel or physical channel) that can be shared dynamically between several UEs.

Soft handover: Soft handover is a category of handover procedures where the radio links are added and abandoned in such manner that the UE always keeps at least one radio link to the UTRAN.

SRNS relocation: The change of Iu instance and transfer of the SRNS role to another RNS.

T

TCP-friendly: A rate control mechanism that is designed to be reasonably fair when competing for bandwidth with TCP flows.

Throughput: A parameter describing service speed. The number of data bits successfully transferred in one direction between specified reference points per unit time [61].

Traffic channel: A “traffic channel” is a logical channel which carries user information.

Transmission time interval (TTI): Transmission Time Interval is defined as the inter-arrival time of Transport Block Sets, i.e. the time it shall take to transmit a Transport Block Set.

Transport block: Transport Block is defined as the basic data unit exchanged between L1 and MAC. An equivalent term for Transport Block is “MAC PDU”.

Transport channel: The channels offered by the physical layer to Layer 2 for data transport between peer L1 entities are denoted as Transport Channels. Different types of transport channels are defined by how and with which characteristics data is transferred on the physical layer, e.g. whether using dedicated or common physical channels.

U

Universal subscriber identity module (USIM): An application residing on the UICC used for accessing services provided by mobile networks, which the application is able to register on with the appropriate security.

Universal terrestrial radio access network (UTRAN): UTRAN is a conceptual term identifying that part of the network which consists of RNCs and Node Bs between Iu and Uu interfaces.

Uplink: An “uplink” is a unidirectional radio link for the transmission of signals from a UE to a base station, from a Mobile Station to a mobile base station or from a mobile base station to a base station.

User Equipment (UE): A device allowing a user access to network services. For the purpose of 3GPP specifications the interface between the UE and the network is the radio interface. A User Equipment can be subdivided into a number of domains, the domains being separated by reference points. Currently defined domains are the USIM and ME Domains. The ME Domain can further be subdivided into several components showing the connectivity between multiple functional groups. These groups can be implemented in one or more hardware devices. An example of such connectivity is the TE - MT interface. Further, an occurrence of a User Equipment is an MS for GSM as defined in GSM TS 04.02.

UTRAN registration area (RA): The UTRAN Registration Area is an area covered by a number of cells. The URA is only internally known in the UTRAN.

Uu: The Radio interface between UTRAN and the User Equipment.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

3

3G - Third Generation · vii, 3, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 19, 43, 57, 111, 161, 162
 3GPP - Third Generation Partnership Project · 10, 12, 13, 14, 19, 38, 43, 49, 50, 51, 52, 53, 57, 58, 69, 70, 80, 81, 85, 86, 135, 136, 139, 144, 145, 146, 147, 148, 157, 161, 165, 170, 201

A

AMC - Adaptive Modulation and Coding · 45, 46, 48, 49
 ARQ - Automatic Repeat Request · 135, 201
 ATM - Asynchronous Transfer Mode · 22, 25, 26, 28

B

BM-SC - Broadcast / Multicast Service Center · 59, 60, 61, 64, 65, 86, 88, 140, 143, 144, 145, 148, 169
 Broadcast · 25, 57, 58, 62, 65, 66, 81, 138, 169, 201

C

CDMA - Code Division Multiple Access · 10, 19, 32, 38, 72
 CDMA2000 · 12, 15
 CN - Core Network · 21, 22, 23, 27, 28, 34, 35, 36, 39, 43, 61, 66, 68, 69, 92, 94, 201

D

DCH - Dedicated Channel · 31, 49, 70, 71, 74, 94, 97, 100, 102, 103, 109, 110, 112, 162, 202
 Downlink - Κατερχόμενος Σύνδεσμος · 12, 14, 30, 31, 32, 33, 43, 45, 46, 49, 51, 53, 73, 171, 202
 DRL - Drift Routing List · 88, 92, 93, 96, 100, 101, 111, 112, 162
 DRNC - Drift Radio Network Controller · 34, 36, 71, 72, 92, 93, 94, 95
 DSCH - Downlink Shared Channel · 30

E

E-DCH - Enhanced Dedicated Channel · 49
 EDGE - Enhanced Data Rates for Global Evolution · 10, 53
 e-MBMS - evolved MBMS · 169, 170, 171

ETSI - European Telecommunications Standards Institute · 10, 11, 14, 25
 EURANE · 100, 101, 123

F

FACH - Forward Access Channel · 30, 70, 71, 74, 92, 97, 100, 102, 103, 109, 110, 112, 136, 138, 144, 147, 148, 152, 153, 154, 157, 158, 162, 165
 Fast Scheduling · 45, 48, 137
 FEC - Forward Error Correction · 3, 5, 80, 81, 82, 135, 139, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 161, 164, 165, 172, 173, 174, 202
 Fountain Codes - Κώδικες Κρήνης · 80, 139

G

GERAN - GSM/EDGE Radio Access Network · 53, 59, 202
 GGSN - Gateway GPRS Support Node · 23, 28, 60, 65, 66, 68, 69, 78, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 95, 96, 97, 101, 102, 105, 124, 140, 143
 GPRS - General Packet Radio Services · 10, 11, 14, 19, 68
 GSM - Global System for Mobile Communications · 10, 11, 14, 19, 26, 34, 38, 59, 202
 GTP - GPRS Tunneling Protocol · 60, 61, 67, 68, 78

H

Handover · 21, 22, 26, 27, 31, 32, 33, 38, 70, 86, 88, 92, 93, 94, 95, 101, 103, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 161, 162, 202
 HARQ - Hybrid Automatic Repeat Request · 45, 47, 49, 137
 HSDPA - High Speed Downlink Packet Access · 12, 14, 31, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 52, 137, 157, 164, 165, 171
 HS-DSCH - High-Speed Downlink Shared Channel · 13, 30, 31, 44, 45, 46, 47, 48, 74, 92, 97, 98, 100, 102, 103, 109, 112, 136, 137, 143, 144, 147, 148, 152, 153, 154, 157, 158, 162, 165
 HSPA - High Speed Packet Access · 3, 4, 12, 13, 43, 44, 50, 58, 74, 136
 HSPA+ · 13, 51
 HSUPA - High Speed Uplink Packet Access · 12, 14, 43, 44, 48, 49, 52, 171

I

IMT-2000 · 19, 44

L

LTE - Long Term Evolution · 3, 13, 14, 51, 52, 53, 54, 58, 169, 171, 172, 173, 174

M

Macrocell · 10, 203

MBMS - Multimedia Broadcast / Multicast Service · 3, 51, 54, 59, 61, 62, 65, 70, 71, 74, 78, 80, 81, 82, 85, 86, 89, 92, 93, 95, 103, 106, 107, 111, 123, 135, 136, 137, 138, 139, 145, 146, 147, 148, 154, 157, 161, 164, 169, 171

MBSFN - Multicast/Broadcast Single-Frequency Networking · 169, 170, 171, 172

MGL - Multicast Group List · 88, 90, 91, 100, 101

Microcell · 10, 203

MIMO - Multiple Input-Multiple Output · 13, 50, 51, 54, 172

MM - Mobility Management · 23, 39, 85, 112, 162

Multicast · 25, 54, 57, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 71, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 85, 86, 92, 97, 103, 105, 107, 109, 111, 115, 116, 119, 123, 131, 135, 144, 146, 147, 157, 163, 164, 203

N

Node B · 21, 22, 24, 25, 26, 32, 33, 47, 48, 49, 50, 73, 92, 93, 100, 122, 123, 131, 132, 143, 144, 163, 164, 201

O

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing · 53, 171

P

Packet MM · 39

PGMCC - Pragmatic General Multicast Congestion Control · 5, 79, 115, 116, 117, 118, 120, 121, 123, 128, 131, 163

Picocell · 10, 203

PMM connected · 39, 40

PMM idle · 39, 40, 202

p-t-m - Point-to-Multipoint · 29, 57, 58, 66, 69, 71, 73, 74, 82, 136, 138, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 165, 171, 203

p-t-p - Point-to-Point · 29, 66, 69, 70, 73, 74, 82, 136, 143, 152, 154, 156, 157, 158, 165, 166, 203

Q

QAM - Quadrature Amplitude Modulation · 13, 46, 51

QPSK - Quadrature Phase-Shift Keying · 46

R

RA - Routing Area · 22, 39, 142, 143, 145, 149, 205

RACH - Random Access Channel · 30, 100

RL - Routing List · 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 100, 111, 112, 161, 162

RNC - Radio Network Controller · 21, 22, 25, 26, 27, 33, 34, 37, 38, 39, 50, 65, 67, 68, 71, 72, 78, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 102, 143, 161, 162, 204

RNS - Radio Network Subsystem · 22, 26, 33, 34, 92, 94, 103, 107, 204

RRC - Radio Resource Control · 39, 204

RRC cell connected · 39, 40, 201

RRC idle · 39

RRC URA connected · 39, 40

RTT - Round Trip Time · 50, 53, 116, 117, 128, 131, 163, 204

S

SC-OFDM - Single Carrier OFDM · 53, 171

SGSN - Serving GPRS Support Node · 23, 27, 28, 34, 36, 39, 60, 61, 65, 66, 67, 68, 78, 87, 88, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 100, 102, 140, 142, 143

SRNC - Serving Radio Network Controller · 34, 36, 71, 72, 92, 93, 94, 95

SRNS relocation · 26, 27, 36, 38, 92, 94, 95, 96, 97, 101, 103, 106, 107, 110, 112, 162, 204

T

TCP - Transmission Control Protocol · 28, 79, 125, 127, 128, 130, 131, 163

TCP-Friendliness · 115, 116, 117, 118, 126, 131, 163, 205

TDMA - Time Division Multiple Access · 10, 32

TFMCC - TCP-Friendly Multicast Congestion Control · 5, 79, 115, 116, 117, 120, 121, 123, 128, 131, 163

Throughput · 13, 45, 50, 52, 99, 103, 104, 105, 108, 109, 110, 112, 116, 117, 118, 119, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 137, 162, 171, 205

TTI - Transmission Time Interval · 45, 48, 49, 205

U

UDP - User Datagram Protocol · 26, 28, 81, 115, 116, 125, 139

UE - User Equipment · 20, 21, 24, 27, 32, 33, 34, 36, 38, 39, 49, 50, 61, 64, 65, 66, 70, 71, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 100, 101, 119, 120, 121, 122, 123, 130, 139, 144, 145, 148, 163, 201, 205

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System · 11, 12, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 34, 35, 38, 39, 43, 44, 45, 50, 57, 59, 60, 67, 71, 72, 73, 77, 78, 82, 89, 92, 93, 94, 95, 100, 111, 115, 123, 161, 162

Uplink - Ανερχόμενος Σύνδεσμος · 12, 14, 30, 31, 32, 33, 43, 49, 51, 53, 73, 171, 205

URA - UTRAN Registration Area · 22

UTRAN - Universal Terrestrial Radio Access
Network · 14, 15, 20, 21, 22, 27, 29, 31, 36, 38,
39, 40, 43, 53, 59, 61, 69, 70, 71, 73, 94, 97, 100,
103, 108, 112, 115, 121, 162, 201, 205

W

WCDMA - Wideband Code Division Multiple
Access · 10, 12, 19, 20, 22, 24, 43, 44, 70

A

Αντιπρόσωπος · 79, 119, 120, 121, 122, 131
Απόκριση · 117, 118, 127, 128, 131, 163

A

Διεπαφή Gn · 28, 61, 66, 67, 68
Διεπαφή Iu · 21, 22, 66, 71, 72, 127, 202
Διεπαφή Iub · 21, 25, 26, 33, 69, 97, 109, 112, 144,
162, 202
Διεπαφή Iu-PS · 22, 23, 27, 34, 61, 67, 68
Διεπαφή Iur · 22, 26, 34, 35, 36, 37, 38, 71, 72, 88,
92, 93, 103, 105, 106, 107, 108, 111, 112, 161,
162, 202
Διεπαφή Uu · 20, 21, 24, 25, 69, 97, 109, 112, 144,
162, 205
Δικαιοσύνη · 48, 116, 124, 125, 126, 131, 163

E

Έλεγχος Ισχύος · 21, 31, 57, 58, 70, 72, 73, 74, 82,
110, 112, 136, 137, 138, 145, 146, 148, 152, 153,
157, 162, 164, 165, 203
Έλεγχος Συμφόρησης · 3, 4, 79, 85, 115, 116, 117,
119, 122, 124, 125, 127, 128, 131, 163, 173
Ένδειξη Απώλειας Πακέτου · 121, 122, 123
Επεκτασιμότητα · 5, 79, 111, 112, 115, 116, 118,
131, 135, 162, 163

K

Κανάλια Μεταφοράς · 24, 29, 30, 47, 49, 73, 92, 94,
100, 103, 108, 109, 110, 112, 136, 143, 146, 147,
148, 152, 153, 155, 162, 205
Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών · 43, 57, 61, 77, 79,
82, 85, 86, 119, 135, 171
Κινητικότητα Χρηστών · 4, 9, 23, 32, 39, 53, 61,
70, 81, 85, 86, 88, 97, 101, 103, 105, 107, 110,
111, 112, 161, 162, 171, 203
Κώδικες LT · 80, 140

Κώδικες Raptor · 80, 81, 82, 135, 139, 140, 144,
145, 148, 151, 153, 158, 165, 173

A

Λογικά Κανάλια · 24, 29, 203

M

Μηχανισμοί Επιλογής Multicast Καναλιών · 74
Μηχανισμός MBMS Counting Mechanism · 74

Π

Πολυμεσική Επικοινωνία · 3, 12, 13, 14, 43, 50, 52,
57, 58, 59, 61, 71, 148, 152, 169, 171, 174
Πολυπλεξία FACH · 71, 109

P

Ρυθμός Απώλειας Πακέτων · 81, 116, 117, 118,
119, 121, 122, 123, 127, 128, 129, 130, 131, 135,
145, 150, 151, 163

Σ

Σημείο Εναλλαγής · 74, 154, 158, 165

T

Τροποποιημένος PGMCC · 115, 123, 124, 125, 126,
127, 128, 130, 131, 163
Τροποποιημένος TFMCC · 115, 123, 124, 125, 126,
127, 128, 130, 131, 163

Y

Υποβάθμιση Ασύρματου Συνδέσμου · ix, 115, 116,
119, 120, 121, 122, 123, 128, 129, 130, 131, 132,
163, 164, 173

Φ

Φυσικά Κανάλια · 29, 32, 203