



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αξιοποίηση του LTE δικτύου για M2M επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Δ. ΜΑΚΡΗΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Αξιοποίηση του LTE δικτύου για M2M επικοινωνίες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Δ. ΜΑΚΡΗΣ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γ. Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

.....

Αναστάσιος Δ. Μακρής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Αναστάσιος Δ. Μακρής, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κωττή Παναγιώτη για τη συνεργασία που είχαμε, καθώς χωρίς τις γνώσεις, τη μεταδοτικότητα και τις συμβουλές του δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου για τα ωραία φοιτητικά χρόνια που περάσαμε.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Περίληψη..... | 9 |
| Abstract | 11 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 13 |
| Κατάλογος Πινάκων | 17 |
| Κατάλογος Συντμήσεων | 19 |
| Κεφάλαιο 1 | 21 |
| Εισαγωγή | 21 |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη τεχνολογιών | 22 |
| 1.1.1 Εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών πριν τα συστήματα LTE | 22 |
| 1.1.2 Εξέλιξη LTE Δικτύων | 23 |
| 1.1.2.1 Έκδοση LTE Release 8 | 25 |
| 1.1.2.2 Έκδοση LTE Release 9 | 25 |
| 1.1.2.3 Έκδοση LTE Release 10 | 27 |
| 1.1.2.4 Έκδοση LTE Release 11 | 29 |
| 1.1.2.5 Έκδοση LTE Release 12 | 30 |
| 1.1.2.6 Έκδοση LTE Release 13 | 31 |
| 1.2 Σκοπός παρούσας Εργασίας..... | 31 |
| 1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας..... | 33 |
| Κεφάλαιο 2 | 35 |
| Επικοινωνία τύπου M2M | 35 |
| 2.1 Εισαγωγή | 35 |
| 2.2 Κατηγοριοποίηση συσκευών M2M..... | 38 |
| 2.3 Χαρακτηριστικά M2M δικτύων και εφαρμογών..... | 39 |
| 2.4 Ανάλυση Χρονοσειράς Χρήσης M2M..... | 43 |
| 2.5 Ανάλυση αγοράς και προβλέψεις..... | 48 |
| Κεφάλαιο 3 | 53 |
| Αρχιτεκτονική δικτύου M2M επικοινωνιών με χρήση δικτύου κινητής τηλεφωνίας LTE..... | 53 |
| 3.1 Το δίκτυο HAN | 54 |
| 3.2 Δίκτυο Ράδιο-Πρόσβασης E-UTRAN..... | 57 |
| 3.3 Δίκτυο κορμού EPC..... | 60 |
| 3.4 Στοιβά πρωτοκόλλων δικτύου LTE | 63 |
| Κεφάλαιο 4 | 67 |
| Χρήση LTE δικτύων προς εξυπηρέτηση M2M συσκευών | 67 |

| | |
|--|-----|
| 4.1 Θεωρητικά μοντέλα γεωγραφικής κάλυψης | 67 |
| 4.1.1 Μοντέλο Okumura – Hata | 68 |
| 4.1.2 Μοντέλο COST 231 – Hata..... | 69 |
| 4.1.3 Μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami | 70 |
| 4.2 Μελέτη θεωρητικών μοντέλων..... | 75 |
| 4.2.1 Μοντέλο Okumura – Hata..... | 75 |
| 4.2.2 Μοντέλο Cost231 – Hata | 75 |
| 4.2.3 Μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami | 76 |
| 4.2.4 Συμπεράσματα της θεωρητικής μελέτης..... | 77 |
| 4.3 Προσομοίωση Γεωγραφικής Κάλυψης | 77 |
| 4.4 Μέθοδοι Βελτίωσης Γεωγραφικής Κάλυψης LTE δικτύου..... | 82 |
| Κεφάλαιο 5..... | 85 |
| Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της κίνησης M2M με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος δικτύου..... | 85 |
| 5.1 Εισαγωγή | 85 |
| 5.2 Μελέτη ως προς το ρυθμό μετάδοσης και τη χωρητικότητα του δικτύου LTE | 86 |
| 5.2.1 Αντιστοίχιση ρυθμού μετάδοσης με φασματικούς πόρους | 89 |
| 5.3 Μελέτη μέγιστου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων προς τον ίδιο σταθμό βάσης... .. | 95 |
| 5.3.1 Υπολογισμός του πλήθους χρηστών και M2M συσκευών υπό τον ίδιο σταθμό βάσης..... | 96 |
| 5.3.2 Δίκτυο χωρίς χρήση θύρας M2M Gateway..... | 97 |
| 5.3.3 LTE δίκτυο όπου χρησιμοποιούνται θύρες M2M Gateway | 98 |
| 5.4 Υποστήριξη από το υπάρχον LTE δίκτυο M2M συσκευών με χρονοπρογραμματισμένη κίνηση..... | 99 |
| Κεφάλαιο 6..... | 103 |
| Συμπεράσματα | 103 |
| Κεφάλαιο 7..... | 105 |
| Βιβλιογραφία | 105 |

Περίληψη

Η εξέλιξη του Internet of Things την σημερινή εποχή απαιτεί την καθολική ύπαρξη M2M συσκευών και δικτύων. Η παρούσα εργασία στοχεύει στην αξιοποίηση των πόρων του LTE δικτύου κινητών επικοινωνιών που δεν χρησιμοποιούνται από H2H επικοινωνίες για την ικανοποίηση των αναγκών M2M επικοινωνιών. Η αξιοποίηση του LTE δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσα από την ανάδειξη των φασματικών και γεωγραφικών περιορισμών που διαθέτει το δίκτυο LTE.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η ιστορία των δικτύων τηλεπικοινωνιών, με ιδιαίτερη έμφαση στην εξέλιξη των LTE δικτύων. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται έμφαση στις M2M επικοινωνίες και την κατηγοριοποίηση αυτών με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, παρουσιάζονται προβλέψεις για τις M2M επικοινωνίες και το IoT. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου M2M το οποίο υλοποιείται με τη χρήση δικτύου LTE. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση του υπάρχοντος δικτύου LTE, οι γεωγραφικοί περιορισμοί που διαθέτει καθώς και τρόποι για τη βελτίωση της γεωγραφικής κάλυψης ενός δικτύου LTE προς υποστήριξη M2M επικοινωνιών. Στο πέμπτο κεφάλαιο αποτυπώνεται το μαθηματικό μοντέλο της κίνησης των M2M επικοινωνιών και η φασματική απόδοση του δικτύου LTE για υλοποίηση M2M δικτύων με και χωρίς χρήση M2M-G. Στο τελευταίο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι επεκτάσεις αυτής.

Λέξεις Κλειδιά

M2M επικοινωνίες, M2M αρχιτεκτονική, θύρα M2M-G, M2M δίκτυα, κατηγοριοποίηση M2M, φασματική απόδοση, γεωγραφική κάλυψη, LTE-M

Abstract

The Internet of Things era requires the ubiquitous presence of M2M devices and M2M networks. The thesis scope is to provide a realistic solution for M2M communications implementation over LTE network. The LTE network has specific resources, spectral and spatial. Thus, the LTE network limitations have to be considered.

The first chapter of this diploma thesis introduces the telecommunications network history and especially the evolution of LTE mobile networks. The second chapter describes M2M communications and their categorization based to the characteristics M2M communications have. In addition, predictions about M2M communications and the IoT are provided. The third chapter provides the architecture of M2M networks based on LTE networks. The fourth chapter contains the geographic constrains of an LTE network for M2M communications and efficient ways to increase the geographical coverage of LTE networks that support M2M communications. The fifth chapter describes the mathematic model of M2M network's traffic and the spectral efficiency of LTE networks supporting M2M communications. The final chapter presents the conclusions of the thesis and extensions that can be studied.

Key Words

M2M communications, M2M architecture, M2M categorization, Internet of Things, LTE network, spectral efficiency, geographical coverage, LTE-M, M2M Gateway

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1.1 Εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών από 1G σε 5G | 22 |
| Σχήμα 1.2 Εκδόσεις LTE από την 3GPP | 24 |
| Σχήμα 1.3 Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο LTE με χρήση οικιακού σταθμού βάσης | 27 |
| Σχήμα 1.4 Εξέλιξη κατηγοριών συσκευών M2M | 32 |
| Σχήμα 1.5 Παραδείγματα συσκευών M2M | 32 |
| Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση M2M συσκευών | 39 |
| Σχήμα 2.2 Κανονικοποιημένος όγκος κίνησης M2M | 43 |
| Σχήμα 2.3 Κανονικοποιημένος όγκος κίνησης smartphone | 43 |
| Σχήμα 2.4 - α Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές παρακολούθησης στοιχείων | 44 |
| Σχήμα 2.4 - β Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές ασφάλειας κτιρίων | 44 |
| Σχήμα 2.4 - γ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές παρακολούθησης στόλου οχημάτων | 44 |
| Σχήμα 2.4 - δ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές διασύνδεσης | 45 |
| Σχήμα 2.4 - ε Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές τηλεμέτρησης | 45 |
| Σχήμα 2.4 - στ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές τηλεϊατρικής | 45 |
| Σχήμα 2.5 Προτυποποίηση κίνησης εφαρμογών με βάση το χρόνο δραστηριότητας | 47 |
| Σχήμα 2.6 Εξέλιξη διασυνδεδεμένων συσκευών , καθώς και ημερομηνίες ορόσημο για το Internet of Things | 49 |
| Σχήμα 2.7 Αναλυτική εικόνα της μελλοντικής αγοράς συσκευών διασυνδεδεμένων στο Internet | 49 |
| Σχήμα 3.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου M2M που βασίζεται στο δίκτυο LTE | 53 |
| Σχήμα 3.2 Διαχωρισμός περιοχών του δικτύου M2M | 54 |
| Σχήμα 3.3 Παράδειγμα έξυπνης κατοικίας με μεγάλο πλήθος M2M συσκευών | 55 |
| Σχήμα 3.4 Συσσωμάτωση/Ενοποίηση πακέτων από την M2M-G | 57 |
| Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική δικτύου M2M με σημεία συσσωμάτωσης πακέτων | 58 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.6 Δίκτυο LTE | 60 |
| Σχήμα 3.7 Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE | 62 |
| Σχήμα 3.8 Στοίβα πρωτοκόλλων σε επίπεδο ελέγχου και σε επίπεδο χρήστη του LTE | 63 |
| Σχήμα 3.9 Διαχωρισμός Access Stratum και Non Access Stratum | 64 |
| Σχήμα 3.10 Ιεραρχική προσέγγιση M2M υπηρεσιών με χρήση δικτύου LTE | 65 |
| Σχήμα 4.1 Παράμετροι μοντέλου διάδοσης COST 231 - Walfisch-Ikegami | 70 |
| Σχήμα 4.2 Θεώρηση Walfisch - Bertoni | 72 |
| Σχήμα 4.3 Τομή και κάτοψη της γεωμετρίας όταν θεωρείται το μοντέλο των Ikegami – Yoshida – Umehira | 74 |
| Σχήμα 4.4 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο Okumura-Hata για μεσαίου μεγέθους πόλη και συχνότητα $f=900$ MHz | 75 |
| Σχήμα 4.5 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο Cost231-Hata για μητροπολιτικά κέντρα ή μεσαίου μεγέθους πόλεις και συχνότητα $f=1800$ MHz | 76 |
| Σχήμα 4.6 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami για μητροπολιτικά κέντρα – μικρού μεγέθους πόλεις, και συχνότητα $f=900$ MHz | 76 |
| Σχήμα 4.7 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami για μητροπολιτικά κέντρα – μικρού μεγέθους πόλεις, και συχνότητα $f=1900$ MHz | 77 |
| Σχήμα 4.8 Επίπεδα ισχύος προσομοιώσεων | 78 |
| Σχήμα 4.9 Απεικόνιση γεωγραφικής κάλυψης σταθμού eNB | 79 |
| Σχήμα 4.10 Μέγιστη απόσταση βέλτιστης περίπτωσης ισχύος λήψης | 79 |
| Σχήμα 4.11 Περιοχές χαμηλής γεωγραφικής κάλυψης λόγω χρήσης τριών τομέων | 80 |
| Σχήμα 4.12 Απόσταση μηδενικής κάλυψης από σταθμό eNB | 81 |
| Σχήμα 4.13 Γεωγραφική κάλυψη αγροτικής περιοχής | 81 |
| Σχήμα 4.14 Προσομοίωση με χρήση 4 τομέων | 83 |
| Σχήμα 4.15 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST231-Hata για μητροπολιτικά κέντρα, συχνότητα $f=1800$ MHz για ύψη δέκτη 1.5m και 10m | 83 |
| Σχήμα 4.16 Συνδυαστική χρήση επανάληψης αποστολής με εναλλαγή συχνότητας | 84 |
| Σχήμα 5.1 Ανάλυση ελεύθερων πόρων για M2M επικοινωνίες | 88 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 5.2 Στρώματα LTE | 90 |
| Σχήμα 5.3 Resource Blocks ανάλογα με το εύρος ζώνης | 90 |
| Σχήμα 5.4 Απεικόνιση Resource block, Slot, Subframe, Frame στο LTE | 91 |
| Σχήμα 5.5 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης FDMA(αριστερά) και OFDMA(δεξιά) | 91 |
| Σχήμα 5.6 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης OFDMA(αριστερά)και SC-FDMA(δεξιά) | 92 |
| Σχήμα 5.7 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης OFDMA (αριστερά) και SC-FDMA (δεξιά) | 92 |
| Σχήμα 5.8 Φασματική απόδοση bit/Hz σε αντιστοιχία με το εύρος ζώνης και τη διαμόρφωση | 95 |
| Σχήμα 5.9 Διάγραμμα Ροής για την εξυπηρέτηση M2M συσκευών από το σταθμό βάσης eNB που λειτουργούν με χρονοπρογραμματισμό | 100 |
| Σχήμα 5.10 Χρονική εξέλιξη πρότασης επικοινωνίας M2M συσκευών με δίκτυο LTE | 101 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 2.1 Παραδείγματα M2M εφαρμογών και υπηρεσιών κατηγοριοποιημένων ως προς τον τελικό χρήστη που τις χρησιμοποιεί | 36 |
| Πίνακας 2.2 Τεχνολογίες διασύνδεσης για επικοινωνίες M2M | 37 |
| Πίνακας 2.3 Εμβέλεια M2M δικτύων | 41 |
| Πίνακας 2.4 Προτεραιότητα εφαρμογών | 41 |
| Πίνακας 2.5 Αντιστοίχιση της κίνησης των κατηγοριών M2M με βάση τρία πρότυπα | 48 |
| Πίνακας 4.1 Παράγοντας $a(h_{MS})$ μοντέλου Okumura-Hata | 69 |
| Πίνακας 4.2 Τυπικές τιμές παραμέτρων μοντέλου Ikegami-Yoshida-Umehira | 73 |
| Πίνακας 5.1 Ρυθμοί μετάδοσης σε αντιστοιχία με το σχήμα διαμόρφωσης για χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz | 94 |
| Πίνακας 5.2 Ρυθμοί μετάδοσης σε αντιστοιχία με το σχήμα διαμόρφωση για εύρη ζώνης 5MHz και 10MHz | 94 |
| Πίνακας 5.3 Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας κατοίκων ανά τύπο περιοχής | 97 |

Κατάλογος Συντμήσεων

| | |
|---------|---|
| 3GPP | Third Generation Partnership Project |
| CP | Cyclic Prefix |
| eNB | Evolved NodeB |
| EPC | Evolved Packet Core |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| E-UTRAN | Evolved Terrestrial Radio Access Network |
| FCC | Federal Communication Union |
| FDD | Frequency Division Duplex |
| H2H | Human to Human |
| HAN | Home Access Network |
| HTC | Human Type Communications |
| IoT | Internet of Things |
| IP | Internet Protocol |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LTE | Long Term Evolution |
| LTE-A | Long Term Evolution Advanced |
| LTE-M | Long Term Evolution for Machine to Machine |
| M2M | Machine to Machine |
| M2M-G | Machine to Machine Gateway |
| M2M-R | Machine to Machine Relay Node |
| M2M-D | Machine to Machine Device |
| M2M-S | Machine to Machine Server |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output |
| MTC | Machine Type Communications |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access |
| QAM | Quadrature amplitude modulation |
| QoS | Quality of Service |
| RB | Resource Block |
| RE | Resource Element |
| SC-FDMA | Single Carrier Frequency Division Multiple Access |
| TDD | Time Division Duplex |
| VoLTE | Voice over Long Term Evolution |

Κεφάλαιο 1

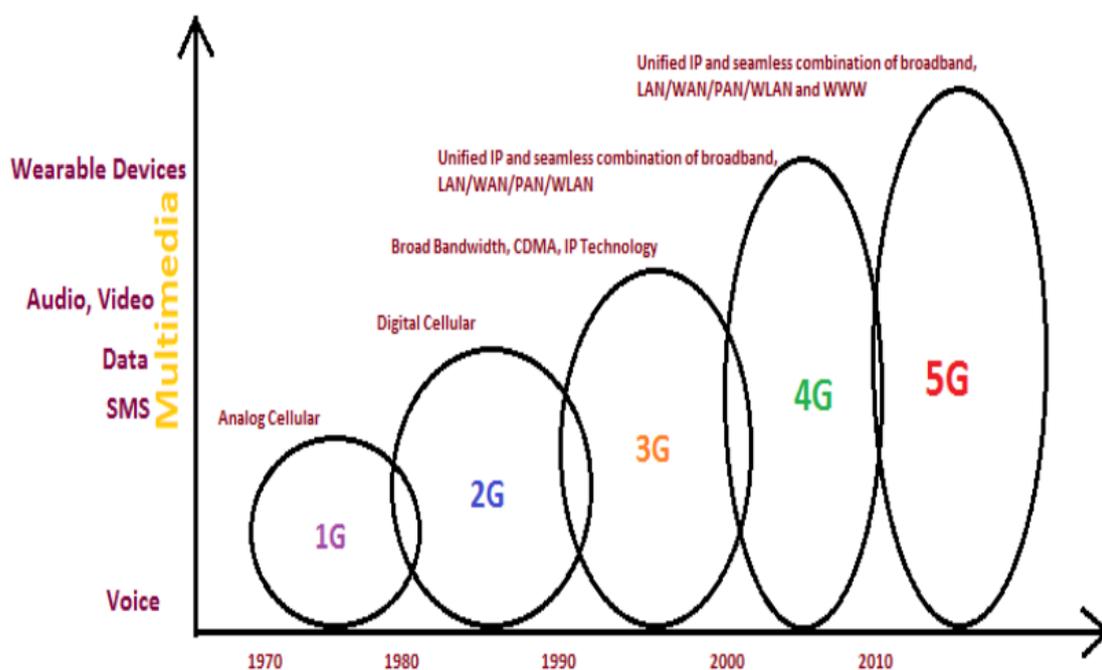
Εισαγωγή

Οι κινητές επικοινωνίες έχουν καταστεί καθημερινή ευκολία και αναγκαιότητα. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τηλεπικοινωνίες έχουν εξελιχθεί από ακριβή τεχνολογία που ικανοποιούσε ανάγκες ολιγάριθμων ατόμων στα σημερινά πανταχού παρόντα συστήματα, που χρησιμοποιούνται από την πλειονότητα του πληθυσμού παγκοσμίως. Από τα πρώτα πειράματα ραδιοεπικοινωνιών τη δεκαετία του 1890 από τον Γουλιέλμο Μαρκόνι, η εξέλιξη μέχρι τα σημερινά συστήματα κινητών επικοινωνιών είναι πολύ μεγάλη. Για να μπορεί ο αναγνώστης να κατανοήσει πλήρως τα σημερινά πολύπλοκα συστήματα, είναι αναγκαία η κατανόηση της προέλευσης και της εξέλιξης των κυψελωτών συστημάτων. Μέχρι και η ίδια η διαδικασία ανάπτυξης νέων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών έχει αλλάξει σε σχέση με το παρελθόν, και από τοπικό ή εθνικό ζήτημα, πλέον είναι διαδικασία αυξημένης πολυπλοκότητας, η οποία υλοποιείται από παγκόσμιους οργανισμούς όπως η Third Generation Partnership Project (3GPP) και η International Telecommunication Union (ITU).

Οι κινητές επικοινωνίες χωρίζονται συχνά σε γενιές (Σχ.1.1), με το 1G να αποτελείται από τα συστήματα αναλογικής μετάδοσης την δεκαετία του 1980, το 2G να περιλαμβάνει τα πρώτα ψηφιακά κινητά συστήματα και το 3G να είναι η γενιά κινητών επικοινωνιών όπου εμφανίστηκε η χρήση ευρυζωνικών δεδομένων. Η επόμενη γενιά 4G, γνωστή και ως Long Term Evolution (LTE), παρέχει ακόμα καλύτερη υποστήριξη σε συστήματα που χρησιμοποιούν ευρυζωνικά δεδομένα. Ταυτόχρονα, όμως, τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς 4G αναπτύσσονται προς υποστήριξη υπηρεσιών φωνής Voice over LTE (VoLTE) και συσκευών M2M (LTE-M). Εντός του 2016 αναμένεται να ξεκινήσει πιλοτικά η υποστήριξη υπηρεσιών φωνής VoLTE. Αντίθετα, η υποστήριξη M2M υπηρεσιών από το δίκτυο LTE είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η μελλοντική εξέλιξη των κινητών δικτύων επικοινωνιών θα είναι το 5G, το οποίο σύμφωνα με τις πρώτες εκτιμήσεις θα λειτουργήσει πιλοτικά από το 2020. Οι ονομασίες των γενιών αυτών είναι απλά ετικέτες που τους έχουν αποδοθεί. Στην πραγματικότητα, η διαφοροποίηση είναι στην τεχνολογία, τις δυνατότητες και την εξέλιξη που έχει κάθε μία από τις γενιές αυτές.

Οι M2M υπηρεσίες εμφανίζουν ραγδαία ανάπτυξη, ως μέρος του Internet of Things (IoT). Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας M2M έχει οδηγήσει σε πλήθος νέων ευκαιριών. Η αγορά των τηλεπικοινωνιών και της πληροφορικής αναμένεται να διευρύνει ακόμα περισσότερο τα κέρδη και το μερίδιό τους με την έλευση των νέων

τεχνολογιών και υπηρεσιών του IoT. Αποτέλεσμα αυτού, είναι το ενδιαφέρον των τηλεπικοινωνιακών παρόχων να υποστηρίξουν M2M υπηρεσίες μέσω του ήδη υπάρχοντος κυψελωτού δικτύου.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών από 1G σε 5G

1.1 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη τεχνολογιών

1.1.1 Εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών πριν τα συστήματα LTE

Το 1946, η Αμερικανική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών Federal Communications Commission (FCC) ενέκρινε την πρώτη εμπορική τηλεφωνική υπηρεσία για χρήση σε αυτοκίνητα, που υλοποιήθηκε από την AT&T. Το 1947, η ίδια εταιρία εισήγαγε την ιδέα της κυψελωτών συστημάτων με αναχρησιμοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων. Η ιδέα αυτή έγινε θεμελιώδης για όλα τα μεταγενέστερα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Παρόμοια συστήματα λειτουργούσαν από μερικούς τηλεφωνικούς παρόχους τις δεκαετίες των 1950 και 1960, οι οποίοι εκτός από σταθερές τηλεφωνικές γραμμές εισήγαγαν στην αγορά τηλέφωνα ενσωματωμένα σε αυτοκίνητα. Οι συσκευές αυτές ήταν ιδιαίτερα ογκώδεις, απαιτούσαν εξαιρετικά

υψηλούς πόρους, τόσο ενεργειακούς όσο και φασματικούς, με αποτέλεσμα οι χρήστες που μπορούσαν να έχουν μια τέτοια υπηρεσία να είναι ελάχιστοι.

Η μεγάλη αύξηση των συνδρομητών και της χρήσης των κινητών επικοινωνιών επήλθε όταν οι κινητές επικοινωνίες έγιναν παγκόσμιο ζήτημα με αρκετές ενδιαφερόμενες πλευρές εμπορικά. Τα πρώτα παγκόσμια συστήματα κινητών επικοινωνιών εισήχθησαν το 1980, με πιο γνωστά τα NMT (υλοποιήθηκε στις Σκανδιναβικές χώρες), το AMPS (στην Βόρειο Αμερική), το TACS (στην Ευρώπη) και το J-TACS (στην Ιαπωνία). Ο εξοπλισμός που χρειαζόταν για την υποστήριξη των συστημάτων παρέμενε ογκώδης, με χαμηλής ποιότητας ομιλία και πολλές παρεμβολές. Τα συστήματα αυτά και γενικά η 1G υποστήριζαν την κλασική τηλεφωνία σε συνδυασμό με ορισμένες πρόσθετες υπηρεσίες.

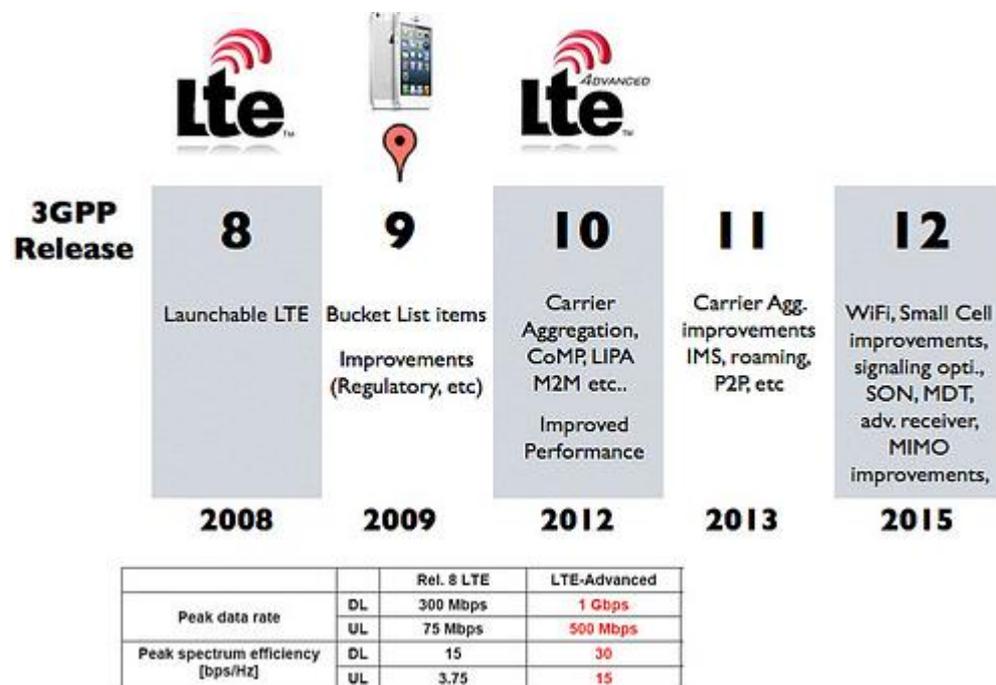
Με την έλευση των ψηφιακών συστημάτων στα μέσα της δεκαετίας του 1980, παρουσιάστηκε η δυνατότητα ανάπτυξης των συστημάτων και προτύπων 2G. Οι ψηφιακές τεχνολογίες αύξησαν την χωρητικότητα των συστημάτων, βελτίωσαν την ποιότητα υπηρεσίας Quality of Service (QoS) και οδήγησαν στην κατασκευή περισσότερο ελκυστικών κινητών συσκευών. Ταυτόχρονα, στην Ευρώπη, άρχισε να υλοποιείται το σχέδιο GSM για την ανάπτυξη πανευρωπαϊκού δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το πρότυπο του GSM ήταν βασισμένο στην τεχνική πρόσβασης Time Division Multiple Access (TDMA). Τα πρότυπα που αναπτύχθηκαν είχαν σκοπό να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες χαμηλού εύρους ζώνης, όπως η φωνή. Η εξέλιξη, όμως, του 2G έδωσε τη δυνατότητα για μεταφορά και δεδομένων, για παράδειγμα μηνυμάτων SMS. Η αποστολή πακέτων δεδομένων μέσω του κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1990, όταν το General Packet Radio Services (GPRS) ενσωματώθηκε στην τεχνολογία GSM. Οι πρόσθετες βελτιώσεις, όπως το GPRS, που προστέθηκαν στο 2G έγιναν ευρέως γνωστές ως 2.5G. Τέλος, η τρίτη γενιά 3G έδωσε νέες προοπτικές στο μέλλον των τηλεπικοινωνιών, καθώς κατέστησε εφικτές υπηρεσίες οι οποίες στο παρελθόν δεν ήταν δυνατό να υλοποιηθούν, όπως η χρήση του Διαδικτύου, η παρακολούθηση video κλπ.

1.1.2 Εξέλιξη LTE Δικτύων

Η εξέλιξη από τα συστήματα 3G σε 4G πραγματοποιήθηκε με στόχο την ανάπτυξη νέων εφαρμογών για τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα. Παράλληλα, εξελίχτηκε και το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν τα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των εταιριών που δραστηριοποιούνται στο χώρο αυτό, οι προκλήσεις από διαφορετικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για τις κινητές επικοινωνίες (π.χ. WiMAX) και οι νέοι κανονισμοί φάσματος έχουν μεταβάλει

δραστικά το περιβάλλον σε σχέση με το άμεσο παρελθόν. Απαιτείται, δηλαδή, υψηλότερη φασματική απόδοση καθώς οι διαθέσιμοι φασματικοί πόροι είναι δεδομένοι και πρέπει να διαμοιραστούν σε πλήθος τηλεπικοινωνιακών παρόχων που λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των δικτύων LTE είναι η εξυπηρέτηση του πρωτοκόλλου IP, σε επίπεδο δικτύου με βάση το μοντέλο OSI. Το πρωτόκολλο IP λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, από οποιαδήποτε υπηρεσία και αν χρησιμοποιείται, οπότε καθιστά δυνατή την εξυπηρέτηση πλήθους διαφορετικών υπηρεσιών, με διαφορετικές τεχνολογικά απαιτήσεις.



Σχήμα 1.2 Εκδόσεις LTE από την 3GPP

Η εξέλιξη της τεχνολογίας LTE έχει περάσει από διάφορα στάδια. Από το 2008 όταν παρουσιάστηκε η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη έκδοση Release 8, έως το 2016, όταν παρουσιάστηκε για πρώτη φορά η έκδοση Release 13, η τεχνολογία έχει περάσει από πολλά στάδια, όπως αναλύεται στα εδάφια 1.1.2.1-1.1.2.6.

1.1.2.1 Έκδοση LTE Release 8

Η βασική έκδοση LTE, ως προς το δίκτυο κορμού και το δίκτυο ραδιοπρόσβασης, καθορίστηκε στην έκδοση Release 8 το 2008. Οι καινοτόμες δυνατότητες του νέου αυτού προτύπου ήταν:

- Υψηλές ταχύτητες στη downlink ζεύξη (έως 300 Mbps) και στην uplink ζεύξη (έως 75 Mbps) με χρήση αποκλειστικά και μόνο ενός καναλιού, χωρίς δηλαδή να χρησιμοποιείται τεχνική συνάθροισης φάσματος.
- Βελτίωση της φασματικής απόδοσης, ιδιαίτερα για την uplink ζεύξη, σε σχέση με τα κληροδοτούμενα από τις προηγούμενες τεχνολογίες συστήματα.
- Πλήρης ενσωμάτωση μεθόδων πρόσβασης Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD).
- Ο κορμός δικτύου βασίζεται σε μεταγωγή πακέτων και όχι σε μεταγωγή κυκλώματος, όπως συνέβαινε σε προγενέστερα συστήματα. Αποτέλεσμα αυτού υπήρξε η μείωση κόστους και πολυπλοκότητας των συστημάτων.

Οι κυριότερες νέες τεχνολογίες που ενσωματώθηκαν στην έκδοση LTE Release 8 σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες, ώστε να μπορέσουν να επιτευχθούν αυτές οι προαναφερθείσες δυνατότητες είναι:

- Υιοθέτηση των σχημάτων διαμόρφωσης OFDMA και SC-FDMA, τόσο για τη downlink όσο και για την uplink ζεύξη. Η χρήση αυτών των σχημάτων διαμόρφωσης επιτρέπει τον προγραμματισμό ζεύξεων στενής ζώνης και την αποτελεσματική υποστήριξη χωρικής πολυπλεξίας.
- Υποστήριξη έξι καναλιών εύρους ζώνης από 1.4 MHz μέχρι 20 MHz για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης και αποτελεσματικής ανακατανομής των φασματικών πόρων.
- Βασική υποστήριξη χωρικής πολυπλεξίας (MIMO), με έως τέσσερα επίπεδα στην downlink ζεύξη.
- Μείωση της καθυστέρησης απόκρισης μέσω ταχύτερων μηχανισμών ελέγχου στο φυσικό στρώμα.
-

1.1.2.2 Έκδοση LTE Release 9

Η έκδοση Release 9 είχε ως κύριο σκοπό τη κάλυψη κενών που υπήρχαν στην προηγούμενη έκδοση, σε συνδυασμό με την προετοιμασία για την ομαλή μετάβαση στην επόμενη Release 10. Κύρια χαρακτηριστικά που διαφοροποιούνται στη συγκεκριμένη έκδοση σε σχέση με την προηγούμενη είναι:

1. *Χρησιμοποίηση νέων συχνοτήτων*

Έχει εισαχθεί η ζώνη συχνοτήτων περί τα 800 MHz στην Ευρώπη, το οποίο ελευθερώθηκε από τη μετάβαση στη ψηφιακή τηλεόραση, και η ζώνη συχνοτήτων περί τα 1500 MHz στην Ιαπωνία.

2. *Εισαγωγή οικιακών σταθμών βάσης femtocell*

Η ιδέα χρήσης οικιακών σταθμών βάσης femtocell δεν εφαρμόζεται αποκλειστικά στα συστήματα LTE. Ωστόσο, στα συστήματα LTE δόθηκε η δυνατότητα να περιληφθούν στον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος, και όχι να τροποποιηθεί το ήδη υπάρχον σύστημα για να περιληφθούν οι οικιακοί σταθμοί βάσης. Ένας οικιακός σταθμός βάσης femtocell λειτουργεί σε μικρή περιοχή εντός της γεωγραφικής κάλυψης μιας μεγαλύτερης κυψέλης. Οι φασματικοί πόροι που χρησιμοποιεί ένας οικιακός σταθμός βάσης μπορεί να είναι είτε οι ίδιοι με αυτούς της μεγαλύτερης κυψέλης, είτε μπορεί να λειτουργεί σε κάποια φασματική περιοχή που έχει αποδοθεί αποκλειστικά σε femtocells. Ο οικιακός σταθμός βάσης δεν λειτουργεί ως κόμβος αναμετάδοσης του δικτύου αλλά επικοινωνεί με αυτό μέσω του ενσύρματου ευρυζωνικού δικτύου της σταθερής τηλεφωνίας. Τις περισσότερες φορές, ένας οικιακός σταθμός βάσης femtocell αναπτύσσεται σε εσωτερικό χώρο. Επιπλέον, η χρήση οικιακών σταθμών βάσης HeNB, παρέχει τη δυνατότητα επέκτασης της γεωγραφικής κάλυψης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου LTE σε περιοχές εκτός κάλυψης των κανονικών σταθμών βάσης, με μοναδική προϋπόθεση την ύπαρξη διαθεσιμότητας ενσύρματου ευρυζωνικού δικτύου στην περιοχή αυτή.

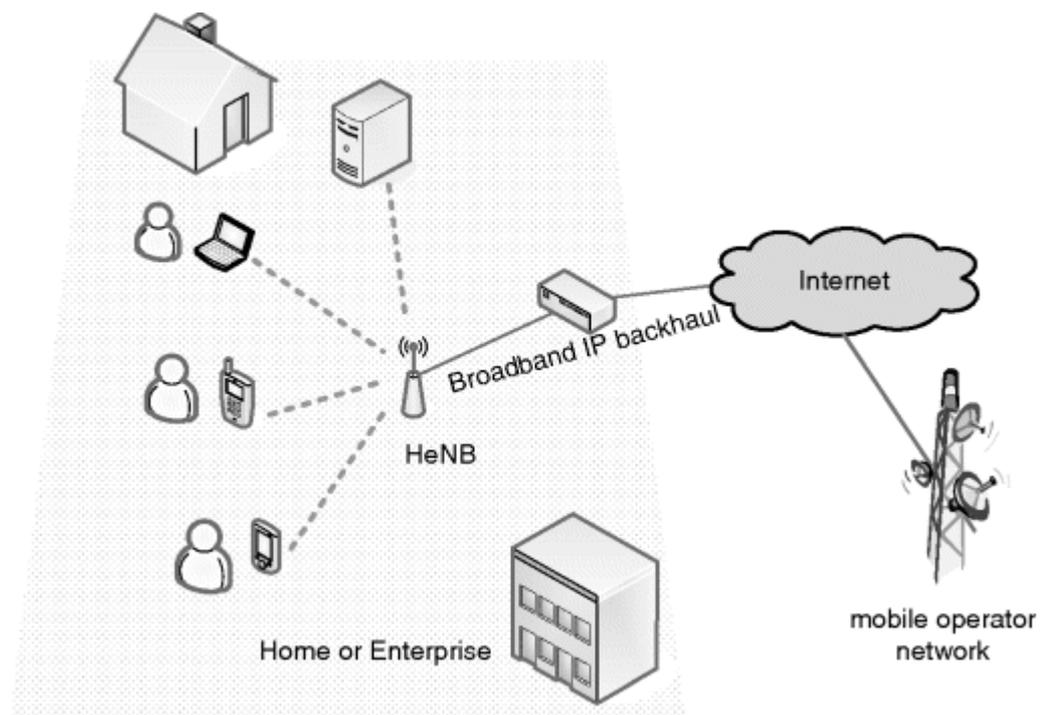
3. *Εισαγωγή τοπικών σταθμών βάσης picocells*

Στην έκδοση Release 9 για πρώτη φορά τα χαρακτηριστικά του LTE ικανοποιούσαν τις προϋποθέσεις για χρήση τοπικών σταθμών βάσης. Οι απώλειες που υπάρχουν στη ζεύξη χρήστη και τοπικού σταθμού βάσης είναι μόλις 45dB, τιμή χαμηλή συγκριτικά με τις ζεύξεις με μακροκυψέλες όπου οι απώλειες είναι 70dB. Αποτέλεσμα αυτού είναι να απαιτείται ισχύς εκπομπής του τοπικού σταθμού βάσης μόλις 24dBm.

4. *Εισαγωγή αυτό-οργανωμένων δικτύων*

Τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι κεντρικά σχεδιασμένα και η προσθήκη νέων κόμβων-σταθμών βάσης είναι ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία. Τα αυτό-οργανωμένα δίκτυα, δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, αλλά στις περιπτώσεις όπου έχουν δοκιμαστεί υπήρξαν τα εξής αποτελέσματα:

- Αυτοματοποίηση του καταλόγου γειτονικών κόμβων του ραδιοδικτύου.
- Αυτό-καθορισμός νέων σταθμών βάσης LTE eNB εντός του δικτύου.
- Αντιμετώπιση προβλημάτων ενός eNB που προκύπτουν από το ίδιο το δίκτυο.
- Παραμετροποίηση της κάλυψης και χωρητικότητας από το ίδιο το δίκτυο.
- Βελτιστοποίηση των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας QoS.



Σχήμα 1.3 Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο LTE με χρήση οικιακού σταθμού βάσης

1.1.2.3 Έκδοση LTE Release 10

Στην έκδοση Release 10 έγινε η μετάβαση από το LTE στο LTE-Advanced που έχει γίνει γνωστό με την εμπορική ονομασία 4G. Όταν ακόμα βρισκόταν σε στάδιο μελέτης, η έκδοση Release 10 είχε ως τελικό σκοπό να επιτευχθούν τα εξής:

1. Υψηλές Ταχύτητες

Στην downlink ζεύξη σκοπός ήταν να επιτευχθεί ταχύτητα μετάδοσης 1Gbps, για εφαρμογές χαμηλής κινητικότητας, και 100Mbps για εφαρμογές υψηλής κινητικότητας. Αντίστοιχα στην uplink ζεύξη ο στόχος ήταν 500Mbps υπό συνθήκη χαμηλής κινητικότητας.

2. Χαμηλή καθυστέρηση απόκρισης

Ο χρόνος εγκατάστασης και αποκατάστασης σύνδεσης μεταξύ του τερματικού και του σταθμού βάσης πρέπει να είναι μικρότερος από 50 ms.

3. Κινητικότητα

Υποστήριξη μεγαλύτερων ταχυτήτων έως 300 km/h και για συγκεκριμένες συχνότητες ακόμα και 500 km/h.

4. Μεγαλύτερη φασματική απόδοση

Αύξηση της φασματικής απόδοσης από 15bps/Hz σε 30bps/Hz στην downlink ζεύξη και από 3.75bps/Hz σε 15bps/Hz στην uplink ζεύξη.

Η ικανοποίηση των συγκεκριμένων απαιτήσεων οδήγησε σε σημαντικές τεχνολογικές βελτιώσεις συγκριτικά με την προηγούμενη έκδοση. Οι βελτιώσεις αυτές ήταν:

- *Υποστήριξη συνάθροισης φάσματος*

Για την επίτευξη του στόχου της ταχύτητας έως 1Gbps εφαρμόστηκε η συνάθροιση φάσματος (carrier aggregation). Η φασματική συνάθροιση υποστηρίζει σύνολο εύρους ζώνης έως 100MHz, όχι υποχρεωτικά από συνεχόμενες φασματικά περιοχές. Μπορούν, δηλαδή, να χρησιμοποιηθούν φασματικοί πόροι από οποιαδήποτε περιοχές συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί στις επικοινωνίες LTE (π.χ. από τις συχνότητες 800 MHz και 2.6 GHz).

- *Σχήμα μετάδοσης της uplink ζεύξης*

-Χωρική πολυπλεξία, με έως και τέσσερα επίπεδα στην uplink ζεύξη.

-Χρήση διαφορικής μετάδοσης.

-Βελτίωση της διαμόρφωσης SC-FDMA ως προς την επιλεκτικότητα συχνοτήτων.

- *Σχήμα μετάδοσης της downlink ζεύξης*

-Βελτίωση της χωρικής πολυπλεξίας από τέσσερα επίπεδα σε οκτώ.

-Βελτίωση του σήματος αναφοράς στη downlink ζεύξη.

- *Χρήση φασματικής αναμετάδοσης*

Η ιδέα της αναμετάδοσης σήματος δεν είναι νέα στις τηλεπικοινωνίες. Στην περίπτωση της χρήσης αναμετάδοσης στα LTE δίκτυα, έχει εισαχθεί η ιδέα της πολυβηματικής αναμετάδοσης (χρήση άνω του ενός κόμβου αναμετάδοσης) με την ευφυΐα των κόμβων αναμετάδοσης να έχει αυξηθεί. Αν, για παράδειγμα, δύο κινητά τερματικά βρίσκονται υπό τη γεωγραφική κάλυψη του ίδιου κόμβου αναμεταδότη, η επικοινωνία τους γίνεται

αποκλειστικά μέσω αυτού του κόμβου και δεν απαιτείται να μεταφερθεί όλη η πληροφορία των πακέτων στο δίκτυο κορμού.

Στην έκδοση του LTE Release 10, υπήρξε για πρώτη φορά ειδική αναφορά για την επικοινωνία τύπου μηχανών Machine Type Communication (MTC). Στην πραγματικότητα, η μέριμνα που υπήρξε ήταν σχεδόν μηδενική. Στις επόμενες εκδόσεις LTE, ωστόσο, η μέριμνα για τις MTC είναι πολύ σημαντικότερη.

1.1.2.4 Έκδοση LTE Release 11

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που βελτιώθηκαν στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών LTE στην έκδοση Release 11 είναι:

1. Βελτιστοποίηση δικτύου πρόσβασης LTE για υπηρεσίες δεδομένων

Το μεγάλο εύρος υπηρεσιών που χρησιμοποιούν δεδομένα κινητής τηλεφωνίας (π.χ. SMS, χρήση διαδικτύου, χρήση κοινωνικών δικτύων κλπ) συχνά δημιουργεί φόρτο στο δίκτυο, ειδικά όταν όλες αυτές οι υπηρεσίες προσπαθούν να λειτουργήσουν παράλληλα. Ο φόρτος του δικτύου οδηγεί σε μείωση της ικανοποίησης που απολαμβάνει ο τελικός χρήστης σε συνδυασμό με μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του τερματικού. Για το λόγο αυτό, παραμετροποιήθηκε κατάλληλα το δίκτυο LTE, ώστε κάθε κινητό τερματικό να αποστέλλει στο δίκτυο τις ρυθμίσεις τις σχετικές με την κατανάλωση ενέργειας που επιθυμεί ο χρήστης, με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

2. Σηματοδοσία και διαδικασία για την αποφυγή παρεμβολών από την ίδια τη συσκευή

Οι έξυπνες κινητές συσκευές χρειάζεται να συνδέονται ταυτόχρονα σε διαφορετικά δίκτυα, όπως LTE, Wi-Fi, Bluetooth. Η χρήση διαφορετικών δικτύων ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές και να μειώσει την ποιότητα υπηρεσίας του χρήστη. Αποτέλεσμα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε ήταν η εισαγωγή ενός μηνύματος που υποδεικνύει το είδος της παρεμβολής, τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς τη συχνότητα της παρεμβολής. Το δίκτυο λαμβάνει τη συγκεκριμένη ειδοποίηση και μειώνει τις παρεμβολές ανακατανέμοντας τους φασματικούς πόρους.

3. *Συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων*

Η αλλαγή σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις LTE ως προς την τεχνολογία MIMO βρίσκεται στη ζεύξη downlink. Πλέον, παρέχεται η δυνατότητα ώστε οι πομποί μετάδοσης να βρίσκονται σε διαφορετικά γεωγραφικά σημεία και όχι να είναι συνεγκατεστημένοι στον ίδιο σταθμό βάσης. Στην ζεύξη uplink, η βελτίωση αυτή δεν είναι δυνατή, καθώς το κινητό τερματικό είναι μοναδικό.

4. *Εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων δικτύου LTE*

Λόγω της ραγδαίας αύξησης του πλήθους των σταθμών βάσης, απαιτεί κατάλληλη μέριμνα για τη μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου. Εκτός από τις κανονικές κυψέλες που διαθέτει, κάθε σταθμός βάσης διαθέτει και μια κυψέλη ενίσχυσης. Η λογική για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι να απενεργοποιείται η συγκεκριμένη κυψέλη όταν ελαττώνεται ο φόρτος του δικτύου.

1.1.2.5 Έκδοση LTE Release 12

Στην έκδοση LTE Release 12 πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εκσυγχρονίσεις στο δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών LTE:

1. *Βελτιώσεις στους σταθμούς βάσης μικρής εμβέλειας*

Οι σταθμοί βάσης μικρής εμβέλειας έχουν αναπτυχθεί από την έκδοση Release 10. Για πρώτη φορά, όμως, στην παρούσα έκδοση αναπτύχθηκαν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα ταυτόχρονης διπλής σύνδεσης από τα κινητά τερματικά, δηλαδή χρήσης φασματικών πόρων τόσο από το σταθμό βάσης μικρής εμβέλειας όσο και από τη μακροκυψέλη.

2. *Βελτίωση στη συνάθροιση φάσματος*

Με την εισαγωγή της τρέχουσας έκδοσης LTE υποστηρίζεται η συνάθροιση φάσματος μεταξύ δύο διαφορετικών τεχνολογιών LTE, του LTE TDD και του LTE FDD. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα συνάθροισης φασματικών ζωνών που προέρχονται από διαφορετικά τμήματα συχνοτήτων του φάσματος που έχει μισθώσει ο πάροχος.

3. *Συνένωση LTE δικτύων με δίκτυα Wi-Fi*

Η παρούσα βελτίωση επιτρέπει στους παρόχους του LTE (δηλαδή τις εταιρίες τηλεπικοινωνιών) να έχουν μεγαλύτερο έλεγχο στη ρύθμιση των συνδέσεων Wi-Fi που είναι δυνατές για το τερματικό. Για το σκοπό αυτό,

αναπτύχθηκε κατάλληλος μηχανισμός ώστε η κίνηση να μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ του δικτύου LTE και του δικτύου Wi-Fi.

Ως προς τις συσκευές M2M και λόγω της μεγάλης αύξησης των σχετικών εφαρμογών που μπορούν να υποστηριχθούν από τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, στην έκδοση LTE Release 12 διατυπώθηκε το πρότυπο συσκευών Cat-0. Στην κατηγορία συσκευών αυτή, ο ρυθμός μετάδοσης είναι χαμηλότερος σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις και είναι ανάλογος των απαιτήσεων των συσκευών M2M (1 Mbps για uplink και downlink ζεύξη). Επίσης, υποστηρίζεται η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας ώστε η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών M2M να πλησιάζει τα 10 έτη.

1.1.2.6 Έκδοση LTE Release 13

Τη στιγμή όπου γράφεται η παρούσα εργασία, η έκδοση LTE Release 13 βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τα οποία αναμένεται να περιλαμβάνει είναι:

1. *Χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος για επικοινωνίες LTE*
2. *Χωρική πολυπλεξία από 8 επίπεδα σε 64 επίπεδα (MIMO)*
3. *Βελτίωση της κάλυψης εσωτερικών χώρων*
4. *Βελτιώσεις για τις επικοινωνίες M2M, μέσω της προτυποποίησης (Cat-M) μιας νέας κατηγορίας συσκευών, όπως φαίνεται στο Σχ.1.4*
5. *Υποστήριξη τερματικών, υπό την προϋπόθεση ότι οι απώλειες διάδοσης είναι μικρότερες από 155.7 dB, ενώ στην αρχική έκδοση LTE οι απώλειες ζεύξης έπρεπε να είναι μικρότερες από 140.7 dB.*

1.2 Σκοπός παρούσας Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να διερευνήσει την ενσωμάτωση των M2M επικοινωνιών στο υφιστάμενο κυψελωτό δίκτυο τηλεπικοινωνιών LTE. Ενδεχομένως υπάρχει αρκετά μεγάλη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια (ενδεικτικό τμήμα στο Κεφ.7) για το πώς τα δίκτυα LTE θα ενσωματώσουν την κίνηση που παράγεται από συσκευές ή εφαρμογές M2M. Οι περισσότερες, όμως, εργασίες είτε είναι σε πολύ πρώιμο επίπεδο είτε αναλύουν μεμονωμένα τμήματα του θέματος αυτού. Σημαντικό είναι ότι η παρούσα μελέτη εξετάζει την ενσωμάτωση των M2M

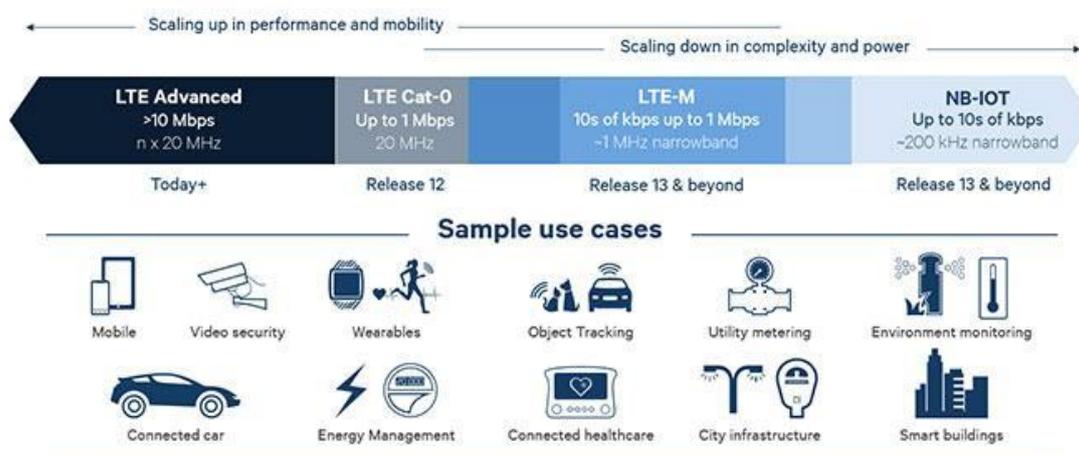
επικοινωνιών στα δίκτυα LTE από άκρο σε άκρο. Εντούτοις, επειδή η συγκεκριμένη ιδέα είναι αρκετά νέα, η μελέτη πραγματοποιείται σε εισαγωγικό επίπεδο. Αποτέλεσμα είναι τα πρότυπα που θα καθιερωθούν τελικά από τους παγκόσμιους οργανισμούς τηλεπικοινωνιών ενδεχομένως να διαφέρουν από αυτά που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή. Ασφαλώς, θα υπάρχει καλύτερη γνώση για το πού οδηγείται η εξέλιξη των M2M μετά την τελική ολοκλήρωση του LTE Release 13).

3GPP evolution efforts for loST so far

| | LTE-M | | | NB-IoT |
|------------------------|------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | Cat-1 | Cat-0 | Cat-M | |
| Standardization | 3GPP Rel.8 | 3GPP Rel.12 | 3GPP Rel.13 (2016 1Q) | 3GPP Rel. 13 (2016 2Q) |
| Bandwidth | 20 MHz | 20 MHz | 1.4 MHz | 200 KHz |
| Data rate | DL | ~ 10 Mbps | ~ 1 Mbps | ~ 1 Mbps |
| | UL | ~ 5 Mbps | ~ 1 Mbps | ~ 1 Mbps |
| Max UE Tx Power | 23 dBm | 23 dBm | 20 dBm | 23 dBm |
| Battery life | - | ~ 10 years | ~ 10 years | ~ 10 years |
| Features | - | Half duplex (375 Kbps) PSM | Lower power eDRX | Narrower BW Extended coverage |

PSM: Power Saving Mode, eDRX: extended Discontinuous Reception

Σχήμα 1.4 Εξέλιξη κατηγοριών συσκευών M2M



Σχήμα 1.5 Παραδείγματα συσκευών M2M

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μια εισαγωγή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, με ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών LTE και την εξέλιξη του, καθώς και μια εισαγωγική γνωριμία με τις τροποποιήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτό για την υποστήριξη των M2M συσκευών. Στο Κεφάλαιο 2, η εργασία επικεντρώνεται στην επικοινωνία μεταξύ διατάξεων M2M, στα χαρακτηριστικά τους, και την κίνηση που παράγουν στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών LTE. Στο Κεφάλαιο 3, αναλύεται η δομή του υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου 4^{ης} γενιάς (LTE) με τελικούς κόμβους τόσο κινητά τερματικά όσο και συσκευές M2M. Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται η γεωγραφική κάλυψη του δικτύου LTE με ταυτόχρονη παρουσίαση μεθόδων για επέκταση της γεωγραφικής κάλυψης. Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιείται μια απόπειρα αποτύπωσης του μοντέλου της κίνησης που παράγεται από τις M2M συσκευές καθώς και μελέτη ως προς το ρυθμό μετάδοσης ή άλλως τη χωρητικότητα του ήδη υπάρχοντος LTE δικτύου. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τις διπλωματικής μαζί με μελλοντικές προεκτάσεις για μελέτη.

Κεφάλαιο 2

Επικοινωνία τύπου M2M

2.1 Εισαγωγή

Η έρευνα και η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιτύχει τη συνεργασία μεταξύ πλήθους ευφυών συστημάτων μέσω ενσύρματων και ασύρματων δικτύων. Για να επιτευχθεί η διασύνδεση διαφορετικών συστημάτων καθοριστική υπήρξε η επικοινωνία τύπου Machine-to-Machine (M2M) ή Machine Type Communication (MTC), δηλαδή η αυτόνομη επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς καθόλου ή με ελάχιστη παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα. Οι συσκευές που πραγματοποιούν τέτοιου είδους επικοινωνία μπορεί να είναι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, έξυπνοι αισθητήρες ή, ακόμα, και κινητά τηλέφωνα “smartphones”. Η κρισιμότητα και η χρησιμότητα των M2M επικοινωνιών έχουν πλέον καταστήσει καθολική την παρουσία τους ενώ, ταυτόχρονα, αποτελούν σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Αυτό μπορεί να κατανοηθεί πλήρως αν αναλυθεί το πλήθος των εφαρμογών που υλοποιούνται με χρήση τέτοιου τύπου επικοινωνιών.

Η επικοινωνία στα δίκτυα M2M μπορεί να υλοποιηθεί μέσω διαφόρων πρωτοκόλλων όπως τα πρωτόκολλα Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, RF κ.α.. Στον Πιν.2.2 πραγματοποιείται καταγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των πρωτοκόλλων μετάδοσης. Στην πράξη, για την επικοινωνία όλων των στοιχείων-συσκευών ενός δικτύου, σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται ένα μόνο πρωτόκολλο, καθώς οι απαιτήσεις διαφέρουν σε κάθε επιμέρους τμήμα του. Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παρούσα εργασία εστιάζει στην επικοινωνία M2M που πραγματοποιείται μέσω LTE. Ως εκ τούτου δίνεται έμφαση στο πώς μπορεί η κίνηση προερχόμενη από την επικοινωνία μεταξύ μηχανών να ενσωματωθεί στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς (LTE και LTE-Advanced).

Για τη διευκόλυνση της κατανόησης της εργασίας παρατίθενται ορισμένοι βασικοί ορισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

- **M2M διατάξεις**

Υπό τον όρο M2M διάταξη ορίζεται οποιαδήποτε συσκευή που μπορεί να συνδεθεί σε κάποιο τοπικό δίκτυο (ή απευθείας στο Διαδίκτυο) και να επικοινωνεί με άλλες αντίστοιχες συσκευές χωρίς καθόλου ή με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι αισθητήρες ενσωματωμένοι σε κινούμενες διατάξεις, ηλεκτρικές συσκευές με ενσωματωμένους αισθητήρες(π.χ. ψυγείο, πλυντήριο), ηλεκτρικοί

λαμπτήρες με δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης, ρολόγια χειρός ,ακόμα και κινητά τηλέφωνα εάν αυτά έχουν προγραμματιστεί κατάλληλα για MTC.

- **M2M εφαρμογές (ή M2M υπηρεσίες)**

Υπό τον όρο M2M εφαρμογές ή υπηρεσίες ορίζονται οι ολοκληρωμένες λύσεις που παρέχονται για την επίλυση κάποιου προβλήματος ή την αντιμετώπιση κάποιας ανάγκης. Περιλαμβάνουν συσκευές M2M, κατάλληλο λογισμικό, και την απαραίτητη τεχνική υποστήριξη από τον πάροχο της εφαρμογής που απαιτείται για την ορθή λειτουργία από άκρο σε άκρο. Οι εφαρμογές ή υπηρεσίες αυτές μπορεί να είναι από ψυχαγωγικής μορφής με τελικό καταναλωτή κάποιον μεμονωμένο χρήστη μέχρι και εταιρικές εφαρμογές υψηλού επιπέδου που έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένη λειτουργία (π.χ. παρακολούθηση στόλου οχημάτων με ταυτόχρονη καταγραφή της οδηγικής συμπεριφοράς του οδηγού). Παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται στον Πιν.2.1 .

- **M2M δίκτυα**

Υπό τον όρο M2M δίκτυα προσδιορίζεται το σύνολο των M2M συσκευών που χρησιμοποιούνται σε μία εφαρμογή, καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης των συσκευών αυτών. Για λόγους ευκολίας και απλότητας, έχει καθιερωθεί πλήθος M2M δικτύων να προσδιορίζονται με κριτήριο τη χωρική έκταση που καταλαμβάνουν ή εξυπηρετούν (π.χ. δίκτυο οικίας, δίκτυο κτηρίου, πόλης κλπ.). Αναλυτικότερη περιγραφή του χωρικού προσδιορισμού δίδεται στην Παράγραφο 2.3.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πράξη δεν μπορεί να γίνει σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στους προηγούμενους ορισμούς. Συχνό φαινόμενο είναι η κατασκευή M2M συσκευών για την κάλυψη αναγκών που μπορεί να προκύψουν από συγκεκριμένη εφαρμογή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κατασκευή αισθητήρων συγκεκριμένων προδιαγραφών για ενσωμάτωση σε οχήματα νέας τεχνολογίας. Ο αισθητήρας στην περίπτωση αυτή αποτελεί μέρος της εφαρμογής που υλοποιεί και μελετάται ως μέρος αυτής και σπάνια ως ξεχωριστή M2M συσκευή.

| Μεμονωμένα Άτομα | Κοινωνικά Σύνολα | Εταιρίες/Επιχειρήσεις |
|---|--|---|
| Τηλε-ιατρικοί αισθητήρες | Έξυπνες Στάσεις | Συστήματα ασφαλείας κτιρίων |
| Έξυπνο σύστημα ασφαλείας κατοικίας | Έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας | Παρακολούθηση στόλου οχημάτων |
| Έξυπνες συσκευές (πλυντήριο, ψυγείο κλπ.) | Συστήματα ασφαλείας- παρακολούθησης δρόμων | Συστήματα Αυτόματης παρακολούθησης πληροφοριακών συστημάτων |

Πίνακας 2.1 – Παραδείγματα M2M εφαρμογών και υπηρεσιών κατηγοριοποιημένων ως προς τον τελικό χρήστη που τις χρησιμοποιεί

| Πρωτόκολλο/ Τεχνολογία | Ethernet | Wi-Fi | ZigBee/ 6LoWPAN | Bluetooth/ Bluetooth 4.0 | UWB | WBAN | Cellular (not only LTE) | LTE | LTE-M (Rel 13) |
|---|-----------------------------|---|----------------------------|--|--|--|---|---|------------------------------------|
| Πρότυπο IEEE | 802.3 | 802.11 | 802.15.4 | 802.15.1 | 802.15.3a | 802.15.6 | - | - | - |
| Συχνότητα Λειτουργίας | - | 2.4GHz 5GHz | 2.4GHz 915MHz 868MHz | 2.4GHz | 3.1-10.6 GHz | 2.4GHz | 800,900, 1800,2100, 2600 MHz | 800,900, 1800,2100, 2600 MHz | 800,900, 1800,2100, 2600 MHz |
| Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης | 10 Mbps Up to 100Gbps | 1300+ Mbps | Up to 250 kbps | 50 Mbps | 480Mbps up to 1.6Gbps | Up to 200kbps | Up to 1Gbps | 1Gbps | Up to 100kbps |
| Ακτίνα Λειτουργίας | 100m | 50m | 10-20m | 200m | 30m | 5m | 10km | 1-10km | 1-10km |
| Κατανάλωση Ενέργειας | Χαμηλή | Υψηλή | Χαμηλή | Χαμηλή | Χαμηλή | Χαμηλή | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή |
| Διάρκεια ζωής μπαταρίας συσκευής | Υψηλή | Χαμηλή | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή | Χαμηλή | Χαμηλή | Υψηλή |
| Γνωστές Εφαρμογές | Χρήση σε δίκτυα Η/Υ | Οικιακή χρήση | Συσκευές IoT | Προσωπικά διασυνδεδεμένα αντικείμενα | Προσωπικά διασυνδεδεμένα αντικείμενα | Προσωπικά διασυνδεδεμένα αντικείμενα | Κινητά και συσκευές που χρησιμοποιούν δεδομένα | Κινητά και συσκευές που χρησιμοποιούν δεδομένα | Συσκευές M2M |
| Σύνδεση στο Διαδίκτυο | Ναι μέσω δρομολογητή | Ναι | Ναι μέσω δρομολογητή | Ναι μέσω δρομολογητή | Ναι μέσω δρομολογητή | Ναι μέσω δρομολογητή | Ναι | Ναι | Ναι |
| Λοιπές πληροφορίες | - | Αναμένεται έκδοση παθητικού Wifi για συσκευές IoT | - | Αναμένεται νέα έκδοση 4.2 για απευθείας μετάδοση δεδομένων στο Διαδίκτυο | - | - | - | - | - |

Πίνακας 2.2 – Τεχνολογίες διασύνδεσης για επικοινωνίες M2M

2.2 Κατηγοριοποίηση συσκευών M2M

Η πραγματοποίηση μελέτης ομαλής συνύπαρξης, με κριτήριο τη μηδενική υποβάθμιση της ποιότητας της υπηρεσίας που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης, των M2M συσκευών με τις συσκευές που προϋπήρχαν στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο τέταρτης γενιάς, απαιτεί κατηγοριοποίηση των συσκευών-εφαρμογών M2M. Η κατηγοριοποίηση των M2M συσκευών πραγματοποιείται ως προς τον τύπο της εφαρμογής που υπηρετούν. Κάθε υποκατηγορία παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ως προς την κίνηση που προωθεί στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας LTE σε σχέση με τις υπόλοιπες. Με βάση τα προηγούμενα, οι συσκευές M2M κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

1) Συσκευές παρακολούθησης στοιχείων

Οι M2M συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την από απόσταση παρακολούθηση αντικειμένων όπως κοντέινερ μεταφοράς ή άλλων διακινούμενων φορτίων. Τις περισσότερες φορές, οι M2M συσκευές αυτού του τύπου συνυπάρχουν με κατάλληλους μετρητές (θερμοκρασίας, πίεσης κ.α.).

2) Συσκευές ασφάλειας κτιρίων

Η κατηγορία των M2M αυτή περιλαμβάνει κυρίως συσκευές καταγραφής μεταβολής της κατάστασης θυρών και κάμερες παρακολούθησης κτιρίων. Οι εφαρμογές της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται κυρίως σε εταιρικούς οργανισμούς και επιχειρήσεις για λόγους ασφαλείας ή για καταγραφή των κινήσεων των εργαζομένων.

3) Συσκευές παρακολούθησης στόλου οχημάτων

Με τις συσκευές αυτού του τύπου πραγματοποιείται καταγραφή της θέσης, του χρόνου άφιξης και αναχώρησης από επιλεγμένους προορισμούς. Επίσης προσφέρεται δυνατότητα πρόσβασης σε στοιχεία πραγματικού χρόνου, όπως ενδεικτικά η οδηγική συμπεριφορά του οδηγού, η κατάσταση του οχήματος και των εμπορευμάτων.

4) Συσκευές διασύνδεσης

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι M2M συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση οποιασδήποτε συσκευής ή θύρας, είτε πρόκειται για αναλογική είτε για ψηφιακή, με το υπόλοιπο δίκτυο. Λειτουργούν δηλαδή ως προσαρμογείς πρωτοκόλλων του δικτύου. Οι M2M συσκευές αυτές μπορούν να εκσυγχρονίσουν ήδη υπάρχοντα μηχανήματα, παρέχοντάς τους διασύνδεση σε κάποιο δίκτυο ή το Διαδίκτυο με πολύ μικρό κόστος.

5) Συσκευές τηλεμέτρησης

Είναι οι M2M συσκευές που πραγματοποιούν απομακρυσμένες μετρήσεις και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές, περιβαλλοντικές ή ενεργειακές εφαρμογές.

6) Συσκευές τηλεϊατρικής

Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και προσφέρουν τη δυνατότητα παρακολούθησης και αυτόματης ενημέρωσης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 2.1 Κατηγοριοποίηση M2M συσκευών

2.3 Χαρακτηριστικά M2M δικτύων και εφαρμογών

Σε σχέση με τις επικοινωνίες Human-to-Human H2H ή, άλλως, Human Type Communications HTC, οι επικοινωνίες M2M έχουν συνήθως διαφορετικές προδιαγραφές ενώ ταυτόχρονα απαιτούν σύγχρονο τεχνολογικό υπόβαθρο. Το δίκτυο κορμού πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει το διαφορετικό χαρακτήρα των επικοινωνιών αυτών, με κυριότερο χαρακτηριστικό το πολύ μεγάλο πλήθος M2M συσκευών που πρέπει να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιορισμένο χωρικά περιβάλλον. Αναλυτικότερα, η συνύπαρξη των H2H και M2M επικοινωνιών επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει καμία απολύτως επίδραση στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που παρέχει ένα κυψελωτό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στις επικοινωνίες τύπου H2H. Οι συσκευές M2M παράγουν σε ατομικό επίπεδο

πολύ μικρό όγκο δεδομένων. Ως σύνολο, όμως, αποτελούν σημαντικό τμήμα ενός δικτύου, χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη μελέτη εκσυγχρονισμού ενός ήδη υπάρχοντος τηλεπικοινωνιακού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η κίνηση που παράγεται από τα δίκτυα M2M διαφέρει από τη γνωστή μέχρι τώρα κίνηση των έξυπνων συσκευών. Όπως φαίνεται στο Σχ.2.2 η κίνηση upstream υπερβαίνει την κίνηση downstream στο μεγαλύτερο διάστημα μιας ημερολογιακής ημέρας με ελάχιστες εξαιρέσεις. Για λόγους σύγκρισης, στο Σχ.2.3 απεικονίζεται η παραγόμενη από έξυπνα κινητά τηλέφωνα ροή κίνησης. Παρατηρείται ότι η upstream είναι τρεις φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη downstream. Απαιτείται, λοιπόν, επανασχεδίαση του ήδη υπάρχοντος κυψελωτού δικτύου με προσεκτική ανακατανομή των φασματικών πόρων, που θα λαμβάνει υπόψη την ανάγκη κάλυψης των νέων αναγκών.

Για την καλύτερη κατανόηση των αναγκών που προκύπτουν, γίνεται αναλυτική καταγραφή των χαρακτηριστικών των M2M:

1) Χωρική εμβέλεια M2M εφαρμογών

Οι έως τώρα υπάρχουσες εφαρμογές λειτουργούν με διαφορετική εμβέλεια. Η ομαδοποίηση εφαρμογών, ως προς τη χωρική έκταση που καταλαμβάνουν, είναι ιδιαίτερως σημαντική για την ορθή σχεδίαση ή τροποποίηση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Με κριτήριο τη γεωγραφική κατανομή τους, οι εφαρμογές M2M είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Σώματος–Body Area Networks (αισθητήρες σε ενδύματα, ιατρικοί αισθητήρες επί ή εντός του ανθρώπινου σώματος κλπ.)
- Προσωπικής περιοχής -Personal Area Networks
- Αυτοκινήτου–Car Area Networks (Οι περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα δεν περιλαμβάνουν τα αυτοκίνητα ως γεωγραφική κατανομή δικτύου, ωστόσο η κατεύθυνση της εξέλιξης της τεχνολογίας καθιστά αναπόφευκτη την καταγραφή τους ως ιδιαίτερη κατηγορία. Εξάλλου, έχουν ήδη αρχίσει να εμφανίζονται έξυπνα αυτοκίνητα (smart cars), έχοντας αυτοματοποιήσει λειτουργίες όπως η προειδοποίηση σύγκρουσης με ταυτόχρονη μείωση ταχύτητας του οχήματος, ενώ έχουν ήδη αρχίσει μελέτες που αφορούν αυτο-οδηγούμενα οχήματα.)
- Κατοικίας–Home Area Networks (Έξυπνα σπίτια (smart homes) τα οποία περιλαμβάνουν από πολλές συσκευές που υλοποιούν πλήθος διαφορετικών εφαρμογών, ψυχαγωγικές, ασφαλείας, ευφυούς μέτρησης προς εξοικονόμηση ενέργειας κλπ.).

- Πόλης –Metropolitan Area Networks (Εξυπνες πόλεις (smart cities) για την επίβλεψη και διαμόρφωση των κατάλληλων υποδομών με στόχο την εύρυθμη λειτουργία μιας πόλης.)

| Δίκτυο | Εμβέλεια |
|----------------------------|----------------------------|
| Σώματος | Έως 1m |
| Προσωπικής περιοχής | Έως 10m |
| Αυτοκινήτου | Στο σύνολο του αυτοκινήτου |
| Κατοικίας | Στο σύνολο της κατοικίας |
| Πόλης | Στο σύνολο της πόλης |

Πίνακας 2.3 – Εμβέλεια M2M δικτύων

2) Διαφορετική ποιότητα υπηρεσιών (QoS)

Ορισμένες εφαρμογές, όπως τα οχήματα τα οποία θα οδηγούνται μόνα τους, απαιτούν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας που ποσοτικοποιείται μέσω της σχεδόν μηδενικής πιθανότητας απώλειας σύνδεσης με υπόλοιπο δίκτυο.

3) Προτεραιότητα εφαρμογών

Με βάση την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας είναι φανερό η σημασία της εισαγωγής προτεραιοτήτων για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως φαίνεται και από τον Πιν.2.4. Σε περίπτωση, δηλαδή, συμφόρησης στο δίκτυο, πρέπει οι εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή προτεραιότητα να διατηρούν αδιάλειπτη την επικοινωνία, ενώ οι εφαρμογές χαμηλής προτεραιότητας να διακόπτουν την επικοινωνία τους μέχρι την αποσυμφόρηση του δικτύου.

| Προτεραιότητα | Παράδειγμα Εφαρμογών |
|-------------------|---|
| Πολύ Υψηλή | Βιοϊατρικοί αισθητήρες, συστήματα ασφαλείας |
| Υψηλή | Μετάδοση εικόνας πραγματικού χρόνου |
| Χαμηλή | Οποιαδήποτε εφαρμογή διαθέτει τη δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων και αποστολής τους σε μελλοντικό χρόνο ,πχ γεωπονικά στοιχεία , |

Πίνακας 2.4-Προτεραιότητα εφαρμογών

4) Χαμηλή κινητικότητα

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι, μέχρι το 2020, περίπου το 70% της κίνησης στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα θα προέρχεται από συσκευές στατικού χαρακτήρα. Το χαρακτηριστικό αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μελέτη προσαρμογής ενός δικτύου LTE προς εξυπηρέτηση και M2M εφαρμογών και συσκευών. Το θετικό

στοιχείο που προκύπτει από το χαρακτηριστικό αυτό είναι ότι μπορεί να υπάρξει πρόβλεψη της κίνησης που θα κυκλοφορεί σε ένα δίκτυο.

5) Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Λόγω του μεγάλου πλήθους των συσκευών M2M καθώς και της δύσκολης πρόσβασης σε κάποιες από αυτές, πρέπει να εξασφαλιστεί η χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας, σε συνδυασμό ασφαλώς με την εξασφάλιση κάποιας πηγής τροφοδοσίας. Αυτή η πηγή μπορεί να είναι είτε απευθείας σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε κάποια μπαταρία. Οι νέες τεχνολογίες, συγκεκριμένα το πρωτόκολλο LTE-M, θα προσφέρουν στις συσκευές M2M διάρκεια ζωής μεγαλύτερης των 10 ετών.

6) Ασφάλεια και επίβλεψη

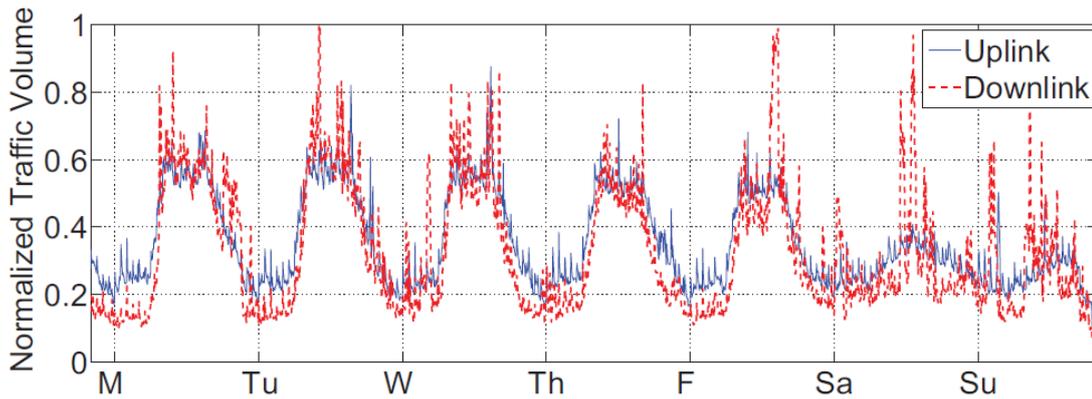
Η φύση των M2M εγκαταστάσεων καθιστά τις εφαρμογές ευάλωτες σε επιθέσεις τόσο στο υλικό όσο και στο λογισμικό τους. Οι εφαρμογές πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε ανωμαλία και να προβαίνουν αυτόματα σε συγκεκριμένες ενέργειες ή να ενεργοποιούν τις κατάλληλες ειδοποιήσεις. Ταυτόχρονα, ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να έχει συνεχώς τη δυνατότητα να παρακολουθεί και να επιβλέπει το σύνολο του δικτύου.

7) Χρονικά προγραμματισμένη κίνηση

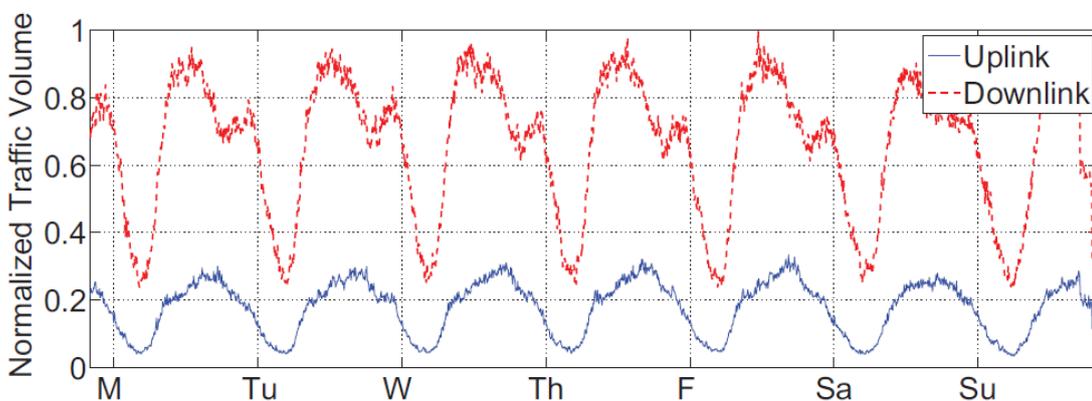
Ο χρονικός προγραμματισμός ορισμένων υπηρεσιών είναι καθοριστικής σημασίας. Οι χρονικές περίοδοι επικοινωνίας πρέπει να είναι σαφώς προκαθορισμένες, λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της επόμενης παραγράφου όπου γίνεται ανάλυση της χρονοσειράς κίνησης δεδομένων από συσκευές M2M σε διάρκεια μιας εβδομάδας. Ο προγραμματισμός, όμως, αυτός δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιπτώσεις υπηρεσιών που απαιτούν μετάδοση σε πραγματικό χρόνο, ή έκτακτα γεγονότα που μπορούν να επηρεάσουν το φόρτο του δικτύου.

8) Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση απόκρισης δικτύου

Πρέπει να μειωθεί ο χρόνος απόκρισης του δικτύου σε πολύ χαμηλά επίπεδα, της τάξης των ms, ώστε έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ορισμένες εφαρμογές και υπηρεσίες. Ενδεικτικό είναι ότι για οχήματα που κινούνται μόνα τους ή για τον τηλεχειρισμό μηχανημάτων απαιτείται χρόνος απόκρισης 1-10 ms.



Σχήμα 2.2 Κανονικοποιημένος όγκος κίνησης M2M



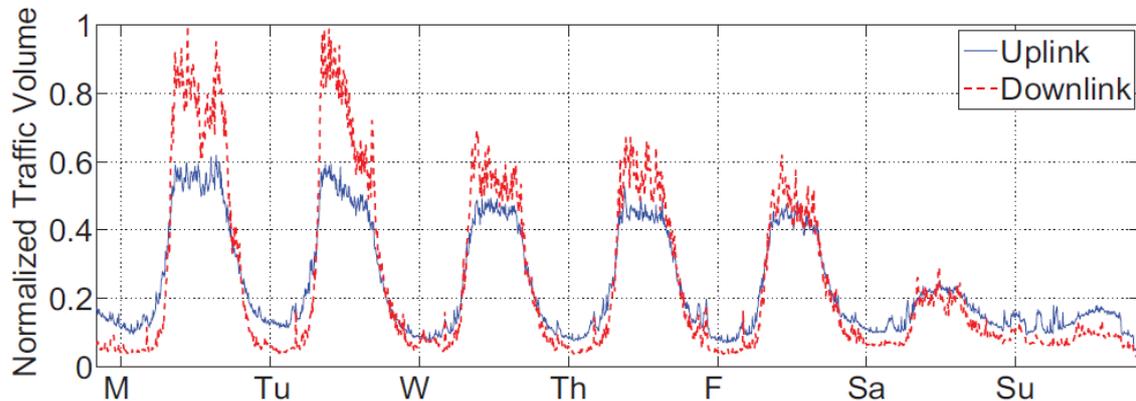
Σχήμα 2.3 Κανονικοποιημένος όγκος κίνησης smartphone

2.4 Ανάλυση Χρονοσειράς Χρήσης M2M

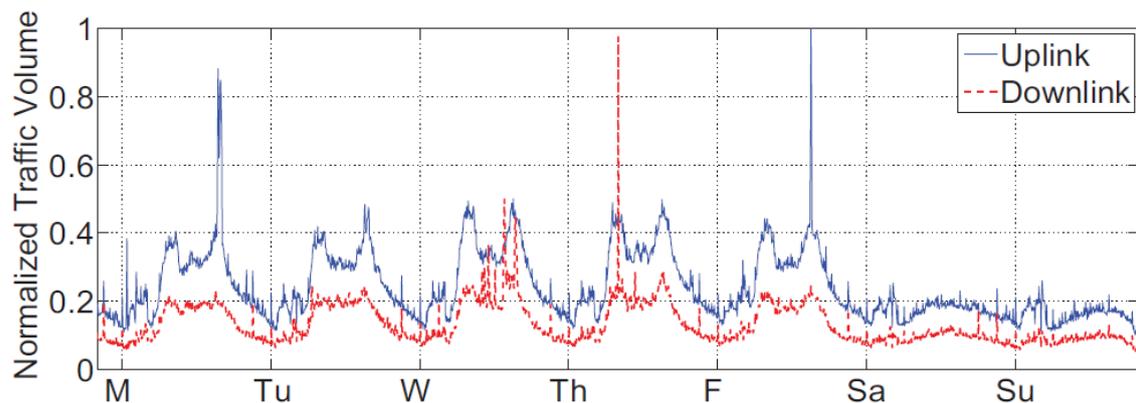
Η μελέτη που θα ακολουθήσει απαιτεί γνώση της κατανάλωσης φυσικών πόρων, με μεγαλύτερη έμφαση κατά τις ώρες αιχμής λειτουργίας των συσκευών M2M. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, στις υπηρεσίες M2M έχει αποδοθεί ένα εβδομαδιαίο πρότυπο ως προς την κίνηση που διοχετεύουν στο δίκτυο, είτε πρόκειται για downlink είτε για uplink.

Η συγκριτική μελέτη των Σχημάτων 2.2 και 2.3 οδηγεί σε δύο ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Πρώτον, ο όγκος δεδομένων της κίνησης downlink υπερσχύει σαφώς του όγκου της κίνησης uplink για τις έξυπνες συσκευές (smartphones), ενώ στις M2M συσκευές η downlink κίνηση είναι ελάχιστα χαμηλότερη της uplink. Δεύτερον, παρατηρείται ότι οι αιχμές στο διάγραμμα των smartphones είναι ευρύτερες, αρχίζουν το πρωί και εκτείνονται έως τα μεσάνυχτα για όλη τη διάρκεια μιας εβδομάδας. Αντίθετα, στη χρονοσειρά των M2M οι αιχμές είναι οξύτερες, τελειώνουν το απόγευμα και εμφανίζουν σημαντική μείωση κατά τη διάρκεια του

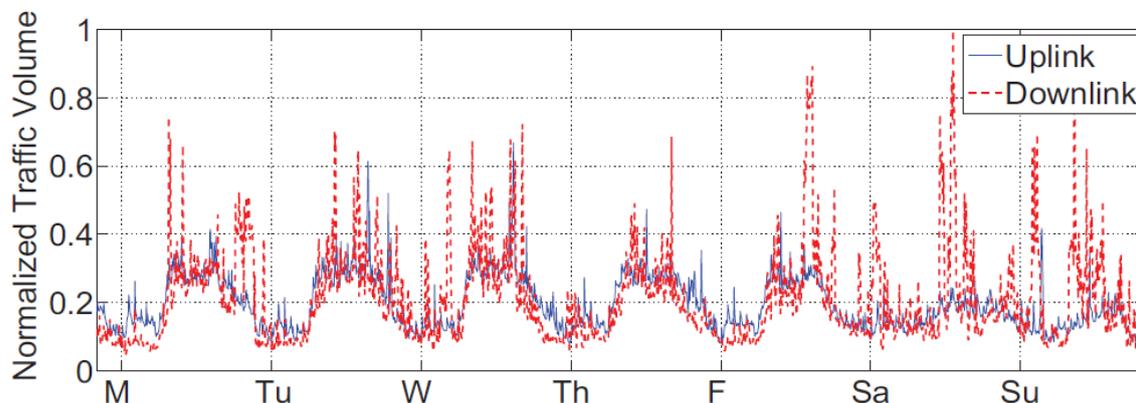
Σαββάτου και της Κυριακής. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι οι καμπύλες από τα κινητά τηλέφωνα είναι στενά συνυφασμένες με τις ώρες κατά τις οποίες οι άνθρωποι είναι δραστήριοι ενώ οι καμπύλες των M2M συνδέονται με τις ώρες εργασίας αφού η μέχρι τώρα χρήση τους συναντάται κυρίως σε επαγγελματικά περιβάλλοντα. Τα κινητά τηλέφωνα, εξάλλου, είναι ευρέως διαδεδομένα σε αντίθεση με τις M2M συσκευές που τώρα αρχίζουν να χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές.



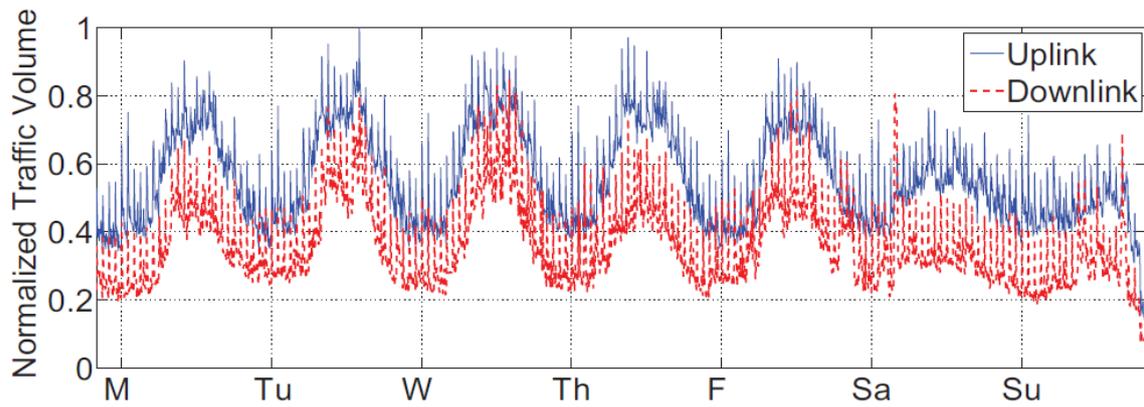
Σχήμα 2.4 - α Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές παρακολούθησης στοιχείων



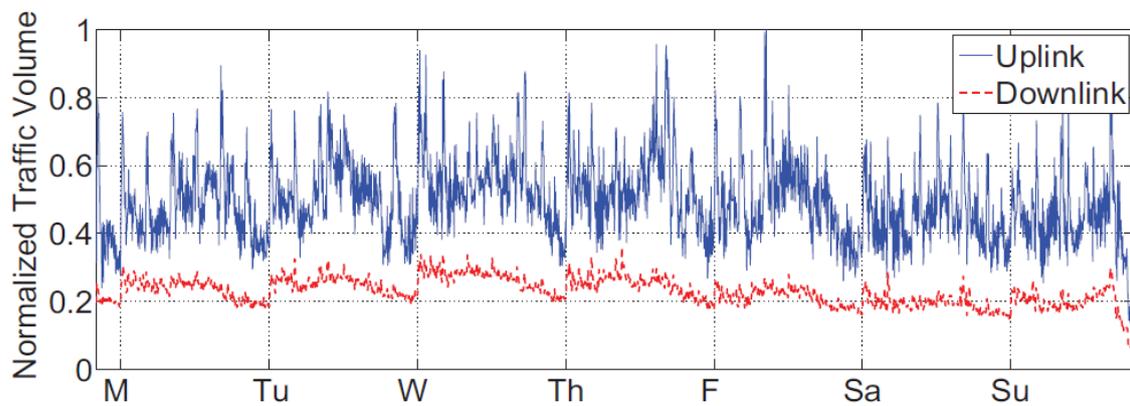
Σχήμα 2.4 - β Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές ασφάλειας κτιρίων



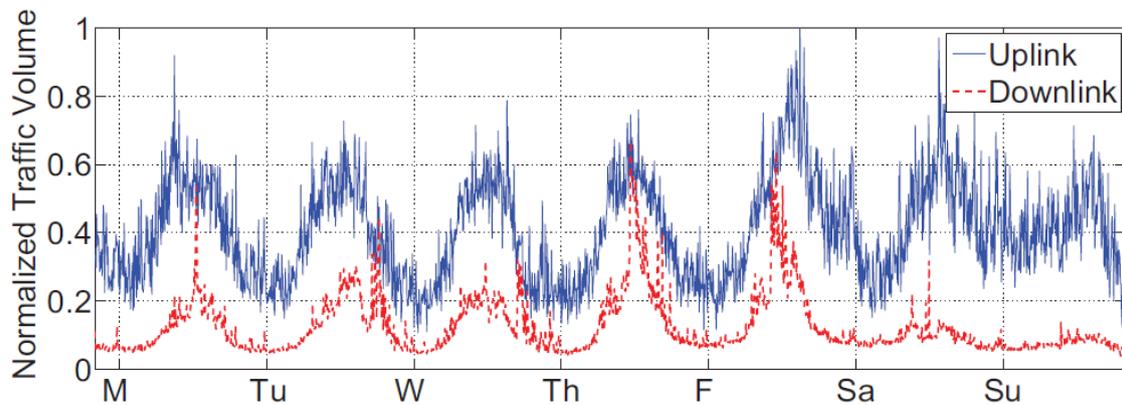
Σχήμα 2.4 - γ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές παρακολούθησης στόλου οχημάτων



Σχήμα 2.4 - δ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές διασύνδεσης



Σχήμα 2.4 – ε Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές τηλεμέτρησης



Σχήμα 2.4 - στ Κίνηση προερχόμενη από M2M συσκευές τηλεϊατρικής

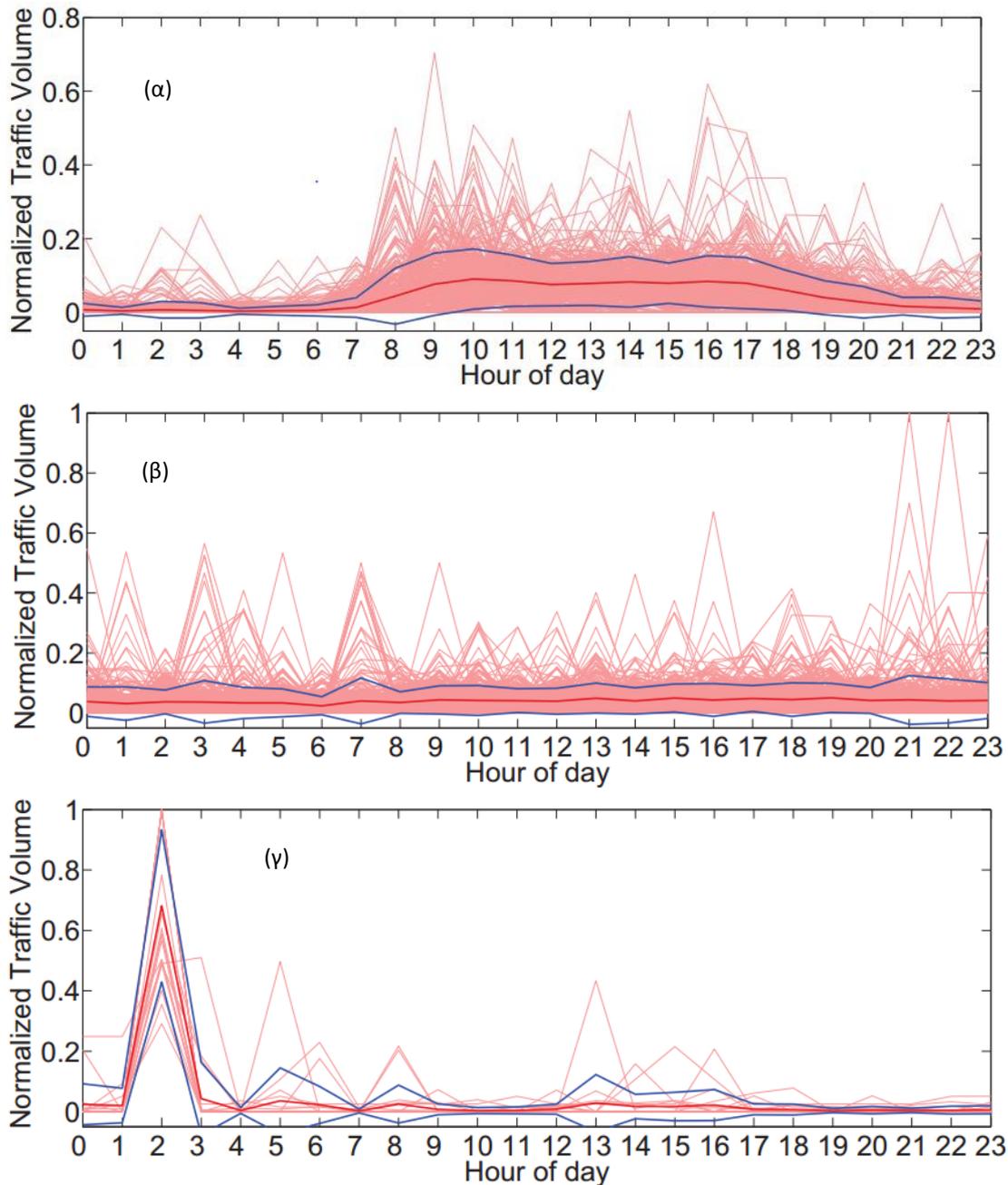
Στα Σχήματα 2.4α-στ απεικονίζεται η χρονοσειρά κίνησης δεδομένων για τις κυριότερες κατηγορίες M2M συσκευών, όπως αυτές παρουσιάστηκαν και στην παράγραφο 2.2. Το πρώτο άμεσο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα πρότυπα των χρονοσειρών διαφοροποιούνται σημαντικά λόγω των διαφορετικών εφαρμογών που υλοποιούν ή εξυπηρετούν. Η προαναφερθείσα συσχέτιση του ωραρίου εργασίας με την κίνηση που παράγεται από M2M συσκευές εμφανίζεται κυρίως στο Σχ.2.4β, που αφορά κτιριακές εγκαταστάσεις. Εμφανίζονται δύο αιχμές

που χρονικά ουσιαστικά ταυτίζονται με την έναρξη και λήξη του συνηθισμένου ωραρίου εργασίας. Πρακτικά, η μόνη κατηγορία της οποίας το γράφημα παραμένει αναλλοίωτο και με ημερήσια περιοδική συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια μιας εβδομάδας είναι αυτή των συσκευών μετρήσεων. Αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον ληφθούν υπόψη οι εφαρμογές που υλοποιούν οι M2M συσκευές μετρήσεων σύμφωνα και με το σχετικό ορισμό που δόθηκε στο εδάφιο 2.3.

Η παράθεση των διαγραμμάτων ημερήσιας χρησιμοποίησης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου κινητής τηλεφωνίας από M2M υπηρεσίες είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και την αποφυγή συμφόρησης. Στον Πιν.2.5 παρουσιάζεται ανάλυση σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο το χρόνο αναφοράς κατά τον οποίο πραγματοποιείται η κύρια αλληλεπίδραση M2M συσκευών στο πλαίσιο της εκάστοτε εφαρμογής (Ημερήσια, Σταθερή, Νυκτερινή). Ο πίνακας αυτός έχει προκύψει από το Σχ.2.5 που περιλαμβάνει βιβλιογραφικές μετρήσεις συσκευών κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Στο Σχ.2.5 παρουσιάζονται τρία πρότυπα κίνησης, το ημερήσιο, το σταθερό, και το νυκτερινό. Μία εφαρμογή που δραστηριοποιείται κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή οι κύριες δραστηριότητες αυτής είναι από τις 8 το πρωί μέχρι τις 8 το βράδυ, ανήκει στο ημερήσιο πρότυπο κίνησης. Μία εφαρμογή η οποία εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά δραστηριότητας σε όλη τη διάρκεια ενός 24ωρου ανήκει στο σταθερό πρότυπο κίνησης. Τέλος, μια εφαρμογή που δραστηριοποιείται κατά κύριο λόγο τις νυκτερινές ώρες, δηλαδή 12 το βράδυ με 6 το πρωί, ομοιάζει πολύ με το νυκτερινό πρότυπο κίνησης.

Στον Πιν.2.5 παρουσιάζεται η ταύτιση των κατηγοριών M2M που έχουν οριστεί στο εδάφιο 2.2 με κάποιο από τα τρία πρότυπα κίνησης. Μία χρονοσειρά δραστηριότητας δεδομένων όμως δεν ομοιάζει αυστηρά με ένα πρότυπο σε κάθε περίπτωση. Μπορεί να ομοιάζει με ένα, με δύο ή και με τα τρία πρότυπα. Για παράδειγμα, οι συσκευές M2M που εξυπηρετούν εφαρμογές παρακολούθησης στοιχείων προωθούν στο δίκτυο κίνηση που εμφανίζει χρονική συμπεριφορά που πρακτικά αντιστοιχεί κατά 16.9% με το ημερήσιο πρότυπο, 15.7% με το σταθερό πρότυπο και 4.8% με το νυκτερινό πρότυπο. Αντίστοιχα, στις συσκευές M2M τηλεϊατρικής η δραστηριότητα ομοιάζει κατά 3.6% με το ημερήσιο πρότυπο, 2.8% με το σταθερό πρότυπο και κατά 13.3% με το νυκτερινό πρότυπο. Η ταύτιση αυτή συμβάλλει σημαντικά στην πρόβλεψη της μελλοντικής κίνησης που μπορεί να διακινείται εντός ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Η κίνηση σε αυτήν την περίπτωση θα μπορεί να προσδιορισθεί συνολικά αλλά και για κάθε κατηγορία M2M υπηρεσιών ξεχωριστά.



**Σχήμα 2.5- Προτυποποίηση κίνησης εφαρμογών με βάση το χρόνο δραστηριότητας
 α) Ημερήσιο πρότυπο, β) Σταθερό πρότυπο, γ) Νυκτερινό πρότυπο**

Η μέχρι τώρα ανάλυση των χρονοσειρών έχει παρουσιάσει σημαντική ομοιότητα στο ημερήσιο πρότυπο που ακολουθούν οι M2M συσκευές και τα κινητά τηλέφωνα “smartphone”. Η διαφορά, ωστόσο, που παρατηρείται στις αιχμές των διαγραμμάτων προσφέρει τη δυνατότητα παροχής οικονομικότερων προσφορών, από τους παρόχους των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, με σκοπό τη χρήση του δικτύου σε ώρες εκτός αιχμής προς αποφόρτιση του δικτύου. Τέλος, το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των χρονοσειρών

είναι η ανάγκη δημιουργίας κοινών τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων για το συγχρονισμό της επικοινωνίας μεταξύ M2M.

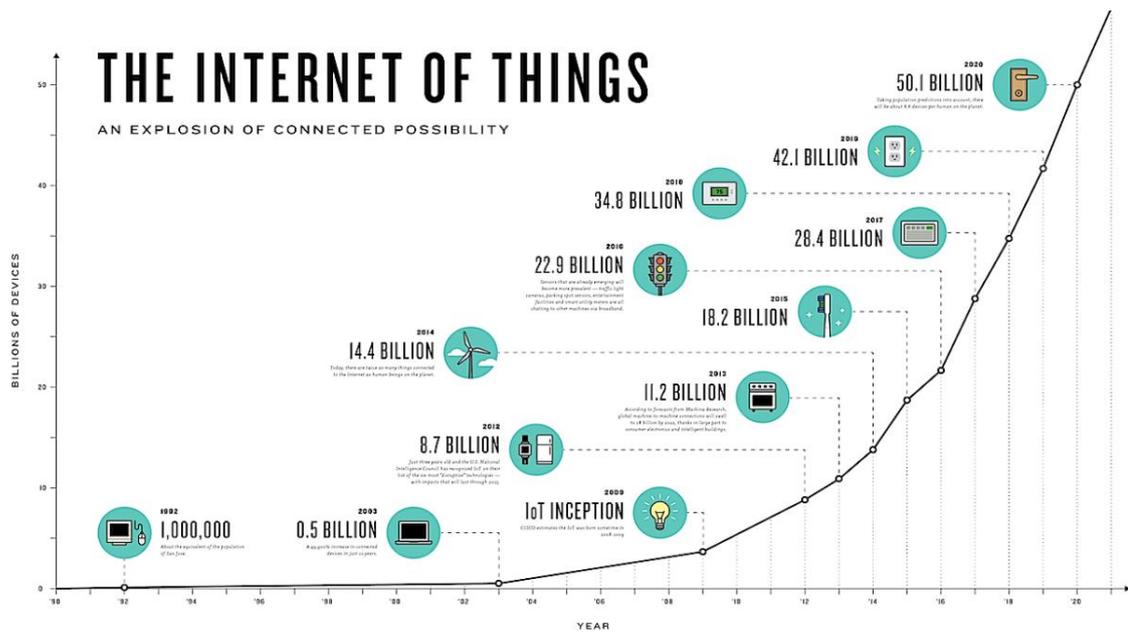
| | Ημερήσιο | Σταθερό | Νυκτερινό |
|---|----------|---------|-----------|
| Συσκευές M2M παρακολούθησης στοιχείων | 16.9% | 15.7% | 4.8% |
| Συσκευές M2M ασφάλειας κτιρίων | 11.8% | 19.1% | 15.7% |
| Συσκευές M2M παρακολούθησης στόλου οχημάτων | 57.1% | 47.5% | 44.6% |
| Συσκευές M2M διασύνδεσης | 8.3% | 11.1% | 12.0% |
| Συσκευές M2M τηλεμέτρησης | 2.3% | 3.8% | 9.6% |
| Συσκευές M2M τηλεϊατρικής | 3.6% | 2.8% | 13.3% |

Πίνακας 2.5 Αντιστοίχιση της κίνησης των κατηγοριών M2M με βάση τρία πρότυπα

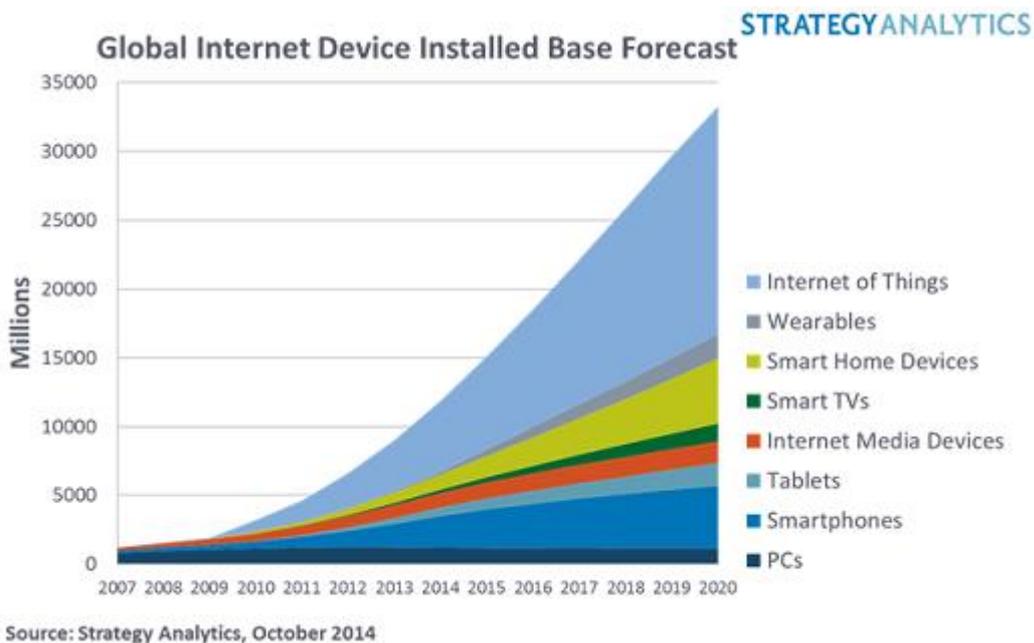
2.5 Ανάλυση αγοράς και προβλέψεις

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και συγκεκριμένα η είσοδος των M2M συσκευών και υπηρεσιών έχει οδηγήσει πλήθος μεγάλων εταιριών στην ανάλυση της υπάρχουσας αγοράς καθώς και στην πρόβλεψη των μελλοντικών μεγεθών που αφορούν τις Machine Type Communications (MTC). Οι πρώτες εκτιμήσεις προβλέπουν σημαντικά οικονομικά οφέλη και ευκαιρίες για μελλοντικές επενδύσεις στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Το κυριότερο, όμως, στοιχείο είναι ότι οι M2M υπηρεσίες πρόκειται να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι τηλεπικοινωνίες και, κατ' επέκταση, οι επιχειρήσεις. Έως το 2020 αναμένεται να υπάρχουν περισσότερες από 20 δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένες συσκευές (υπάρχουν προβλέψεις ακόμα και για 50 δις), και οι M2M συσκευές αναμένεται να αποτελούν κυρίαρχο τμήμα αυτών. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από την ανάλυση των Σχ.2.6 και Σχ.2.7 τα οποία παρέχουν μια πρώτη εικόνα για τις μελλοντικές διασυνδεδεμένες συσκευές).

Πολύ σημαντικά στοιχεία για την εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών μπορεί να δώσει το διαδραστικό εργαλείο της Cisco VNI, το οποίο παρουσιάζει την παγκόσμια αγορά για το 2019. Τα κυριότερα σημεία για το 2019 είναι:



Σχήμα 2.6 Εξέλιξη διασυνδεδεμένων συσκευών , καθώς και ημερομηνίες ορόσημο για το Internet of Things



Σχήμα 2.7-Αναλυτική εικόνα της μελλοντικής αγοράς συσκευών διασυνδεδεμένων στο Internet

Γενικά για τη διασύνδεση στο Διαδίκτυο:

- 3.9 δις διασυνδεδεμένοι χρήστες έως το 2019 παγκοσμίως ενώ το 2014 υπήρχαν 2.8 δις. Στην Δυτική Ευρώπη, όπου ανήκει και η Ελλάδα, το 2019 αναμένεται να υπάρχουν 350 εκ., μικρή αύξηση σε σχέση με το 2014 που ήταν 335 εκ..

- 24.5 δις συσκευές με πρόσβαση στο διαδίκτυο παγκοσμίως (14.2 δις το 2014) ενώ στη Δυτική Ευρώπη οι συσκευές αναμένεται να ανέλθουν σε 3.5 δις το 2019 (1.9 δις το 2014).
- Η κίνηση δεδομένων στο Διαδίκτυο θα έχει τριπλάσιο όγκο το 2019 σε σχέση με το 2014 παγκοσμίως με την περιοχή της Δ. Ευρώπης να ακολουθεί την ίδια ακριβώς τάση.

Για τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών:

- Αναμένεται να υπάρχουν 5.2 δις χρήστες κινητών τηλεφώνων το 2019 σε παγκόσμιο επίπεδο. Το 2014 υπήρχαν 4.3 δις ενώ το 2013 3.9 δις παγκοσμίως. Οι αντίστοιχες τιμές για τη Δ. Ευρώπη είναι 382.6 εκ. το 2019, 367 εκ. για το 2014 και 360.6 εκ. χρήστες το 2013.
- Ο όγκος της κίνηση στα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών αναμένεται να έχει δεκαπλασιαστεί μέχρι το 2019 συγκριτικά με τα δεδομένα του 2014 σε παγκόσμιο επίπεδο. Αντίστοιχα στη Δ. Ευρώπη αναμένεται να είναι μόλις επταπλάσιος.
- Το 59% των τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων το 2019 θα είναι «έξυπνες». Το 2014 το ποσοστό αυτό ανερχόταν σε 26%.

Για τα δίκτυα M2M ισχύει:

- Η κίνηση που προκαλείται από M2M αναμένεται το 2019 να είναι τριανταέξι φορές μεγαλύτερη σε σχέση με το 2014 (που αναλογεί σε Ετήσιο Ρυθμό Ανάπτυξης 103%). Το ίδιο ποσοστό αναμένεται και για την Δ. Ευρώπη.
- Η κίνηση από M2M το 2019 θα είναι περίπου 1.2 Exabytes ανά μήνα παγκοσμίως, με το αντίστοιχο μέγεθος για την Δ. Ευρώπη να είναι 192.4 Petabytes ανά μήνα.
- Η κίνηση προερχόμενη από M2M το 2019 θα αντιστοιχεί σε ποσοστό 5% της συνολικής κίνησης στο παγκόσμιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ενώ στην Δ. Ευρώπη σε 8%. Το 2014 τα ποσοστά αυτά ήταν 1.37% και 1.57% αντίστοιχα.
- Οι διασυνδεδεμένες M2M συσκευές στο παγκόσμιο δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών θα αποτελούν το 28.2 % των συσκευών σε παγκόσμιο επίπεδο ενώ στη Δ. Ευρώπη το ποσοστό αυτό προβλέπεται ότι θα είναι 50.2% (για το έτος 2019). Αντίστοιχα, το 2014 τα ποσοστά αυτά διαμορφώθηκαν σε 6.6% και 14.9%.
- Η μέση συσκευή M2M θα παράγει περίπου 320MB κίνησης ανά μήνα το 2019, ενώ το 2014 το μέγεθος αυτό ήταν μόλις 60 MB.

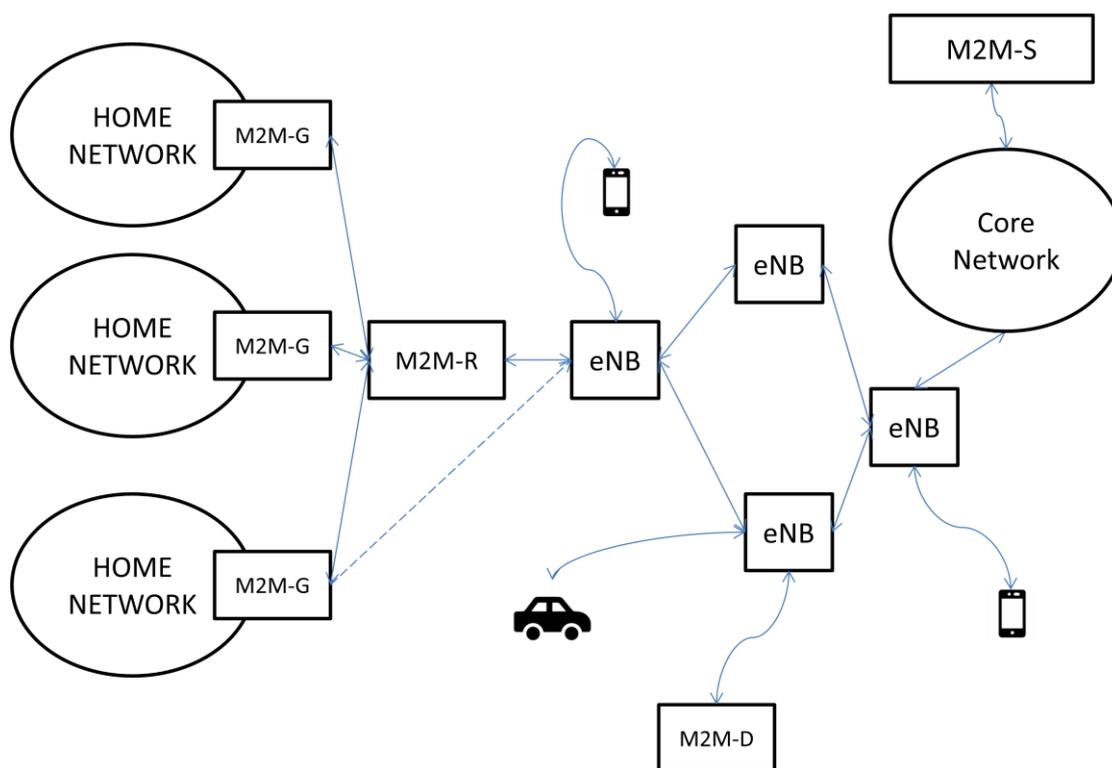
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα ανωτέρω στοιχεία είναι τα εξής:

- Σε υποανάπτυκτες περιοχές παρατηρείται μια αύξηση του αριθμού των χρηστών καθώς αναπτύσσονται υποδομές για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ενώ σε ανεπτυγμένες περιοχές τα δίκτυα εξελίσσονται και ο αριθμός συσκευών ανά χρήστη αυξάνεται. Συγκεκριμένα, η διείσδυση των κινητών τηλεφώνων σε παγκόσμιο επίπεδο για την τρέχουσα χρονική περίοδο κυμαίνεται σε ποσοστό περίπου 60 % του παγκόσμιου πληθυσμού (το 2019 το ποσοστό αυτό θα είναι περίπου 70%). Παράλληλα, στη Δ. Ευρώπη το ποσοστό ήδη υπερβαίνει το 88% του πληθυσμού, με την αύξηση μέχρι το 2019 να είναι μόλις 2% (90% του πληθυσμού).
- Πολύ σημαντική αναμένεται να είναι η εισαγωγή του cloud networking, με τους χρήστες να θέλουν να έχουν πρόσβαση στα δεδομένα τους από οποιαδήποτε συσκευή.
- Όσον αφορά τις M2M συσκευές, η μαζική είσοδος τους στην αγορά αναμένεται να δημιουργήσει σημαντικές ευκαιρίες για επενδύσεις. Ταυτόχρονα, όμως, απαιτείται επανασχεδιασμός του υπάρχοντος δικτύου κινητής τηλεφωνίας με κύριο γνώμονα την επίδραση που αναμένεται από την εξέλιξη των M2M. Αυτός, εξάλλου, είναι και ο στόχος της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 3

Αρχιτεκτονική δικτύου M2M επικοινωνιών με χρήση δικτύου κινητής τηλεφωνίας LTE

Η αρχιτεκτονική των δικτύων M2M βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο από τους αρμόδιους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς (3GPP, ETSI κλπ.), οπότε τα ήδη ανεπτυγμένα δίκτυα δεν βασίζονται σε κατάλληλα πρότυπα αλλά σε βέλτιστες πρακτικές. Επομένως, η αρχιτεκτονική των δικτύων μπορεί να διερευνηθεί μόνο σε πρώιμο στάδιο, οπότε το πρότυπο που θα καθιερωθεί τελικά, ενδεχομένως διαφέρει από το προσχέδιο της αρχιτεκτονικής του δικτύου M2M που θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό.



Machine to Machine Gateway (M2M-G)

Machine to Machine Relay Node (M2M-R)

Evolved Node B (eNB)

Machine to Machine Device (M2M-D)

Machine to Machine Server (M2M-S)

Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική Δικτύου M2M που βασίζεται στο δίκτυο LTE



Σχήμα 3.2 Διαχωρισμός περιοχών του δικτύου M2M

Η αρχιτεκτονική ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου, εκτός από την ανάλυση της φυσικής του μορφής, απαιτεί και ανάλυση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται, ιδίως από το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας LTE.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 3.2, το φυσικό δίκτυο μπορεί, για λόγους απλότητας, να χωριστεί σε τρεις περιοχές, το Δίκτυο Έξυπνων Κατοικιών Home Automation Network (HAN), το Δίκτυο Πρόσβασης Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN), και το δίκτυο κορμού Evolved Packet Core (EPC).

3.1 Το δίκτυο HAN

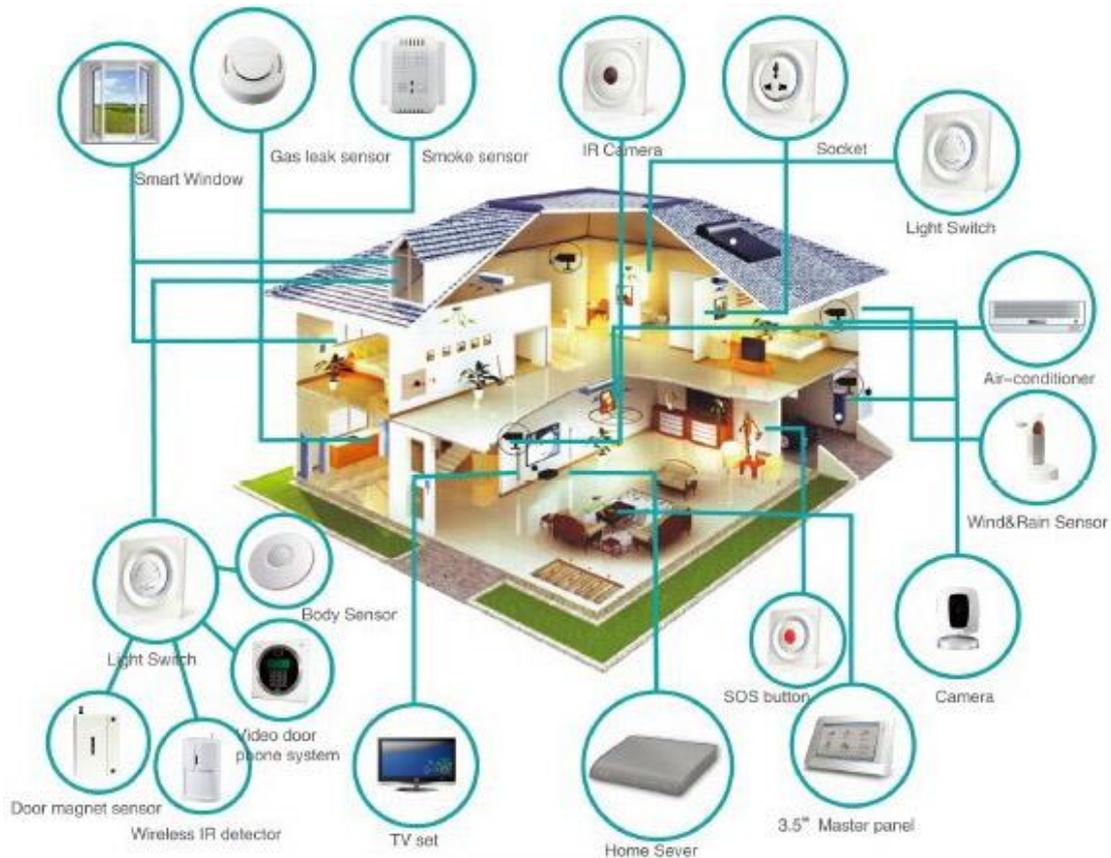
Είναι το δίκτυο το οποίο εισάγει στις κατοικίες τεχνολογία που βελτιώνει την ποιότητα ζωής των νοικοκυριών, μέσω υπηρεσιών όπως τηλεϊατρική, χρήση πολυμέσων για διασκέδαση και εξοικονόμηση ενέργειας κλπ. Η ενσύρματη προσέγγιση (PLC, Ethernet) που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν τείνει να εγκαταλειφθεί λόγω της δύσκολης, υψηλού κόστους και χρονοβόρας εγκατάστασης, καθιστώντας προτιμητέο τον ασύρματο τρόπο μετάδοσης. Τα πλεονεκτήματα του ασύρματου τρόπου επικοινωνίας εντός του οικιακού περιβάλλοντος, συγκεκριμένα η εύκολη αρχική εγκατάσταση και το χαμηλό κόστος αγοράς, έχουν οδηγήσει στη διατύπωση πλήθους πρωτοκόλλων ασύρματης μετάδοσης. Τα κυριότερα πρωτόκολλα για ασύρματη μετάδοση σε εσωτερικούς χώρους είναι το Bluetooth, το ZigBee, το UWB και το Wi-fi.

Συσκευή M2M εντός του δικτύου HAN είναι οποιοσδήποτε κόμβος διασυνδέεται με άλλους κόμβους μέσω κάποιου δικτύου ή έχει απευθείας σύνδεση με το Διαδίκτυο. Παραδείγματα συσκευών M2M εντός δικτύου HAN είναι έξυπνες τηλεοράσεις, έξυπνα πλυντήρια, μετρητές για το δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας, τηλεχειριζόμενοι λαμπτήρες, συσκευές ανίχνευσης κίνησης, ασύρματες κάμερες κλπ..

Οι βασικές λειτουργίες των M2M συσκευών εντός ενός HAN δικτύου είναι:

- 1) Συλλογή δεδομένων

Κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων οι M2M συσκευές πραγματοποιούν μετρήσεις και τις αποστέλλουν στη θύρα Machine-to-Machine Gateway (M2M-G).



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα έξυπνης κατοικίας με μεγάλο πλήθος M2M συσκευών

2) Επεξεργασία δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τις M2M συσκευές αναλύονται σε κάποιο κέντρο ελέγχου και αποφάσεων. Αν η επεξεργασία είναι πολύπλοκη, πραγματοποιείται από τον Machine-to-Machine Server (M2M-S), απαιτείται δηλαδή πρώτα αποστολή τους στον M2M-S, και, στη συνέχεια, ακολουθεί η επεξεργασία τους.

3) Αποστολή δεδομένων

Τα δεδομένα αποστέλλονται από τη θύρα M2M-G στο εξωτερικό δίκτυο

Η επικοινωνία μεταξύ των M2M συσκευών εντός του δικτύου HAN πραγματοποιείται είτε απευθείας είτε με υποστήριξη από τη θύρα M2M-G. Η θύρα M2M-G είναι η έξυπνη M2M συσκευή που έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα, να τα επεξεργάζεται και τελικά να τα προωθεί στο εξωτερικό δίκτυο. Η M2M-G επιτελεί σημαντικές λειτουργίες, καθώς ρυθμίζει την ορθή λειτουργία του οικιακού υποδικτύου. Ταυτόχρονα, διασυνδέει ετερογενή δίκτυα μέσω του πρωτοκόλλου IP. Διασυνδέει, δηλαδή, το εσωτερικό οικιακό δίκτυο HAN, το οποίο λειτουργεί με συγκεκριμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας (Zigbee, Wi-fi, Bluetooth,

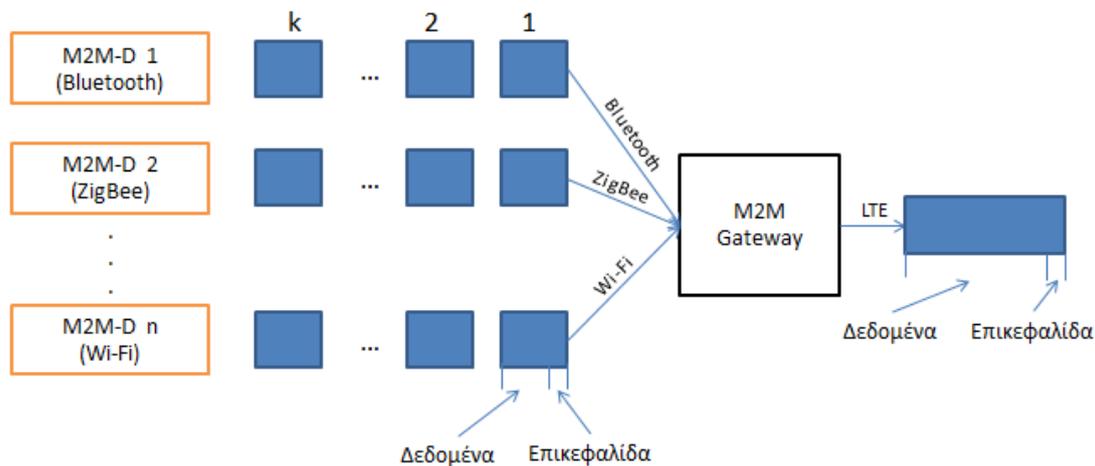
UWB, κλπ) με το εξωτερικό δίκτυο μέσω LTE. Λόγω αυτής της λειτουργίας, ο κόμβος M2M-G οφείλει να υποστηρίζει μεγάλο πλήθος τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

Η χρήση M2M-G προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας στις συσκευές που είναι διασυνδεδεμένες με αυτήν, καθώς δεν απαιτείται οι M2M συσκευές να είναι σε ενεργή κατάσταση σε όλη τη διάρκεια μιας ημερολογιακής ημέρας. Όποτε απαιτείται η εκτέλεση κάποιας ενέργειας, η θύρα M2M-G ενημερώνει την M2M συσκευή και μεταβαίνει από την κατάσταση αδρανείας στην ενεργή κατάσταση προς εκτέλεση των δραστηριοτήτων που της έχουν ανατεθεί. Ταυτόχρονα, η χρήση θυρών M2M-G οδηγεί σε μείωση του κόστους της συνολικής M2M εγκατάστασης. Οι M2M συσκευές επιτελούν ελάχιστες βασικές λειτουργίες, ενώ η θύρα M2M-G αναλαμβάνει τις υπόλοιπες. Στη θύρα M2M-G πραγματοποιείται και η προτεραιοποίηση των προσφερόμενων υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα προτεραιότητας. Η θύρα M2M-G αποτελεί, δηλαδή, το κέντρο αποφάσεων του συστήματος. Τέλος, δύο σημαντικές λειτουργίες που επιτελεί η M2M-G είναι ο χρονικός προγραμματισμός κίνησης και η συσσωμάτωση της πληροφορίας που παράγεται στις M2M-D σε ενιαία πακέτα δεδομένων.

Η λειτουργία του χρονικού προγραμματισμού κίνησης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η ανάλυση της κίνησης από smartphones και M2M συσκευές στο εδάφιο 2.4 προσφέρει τη γνώση των χρονικών διαστημάτων στη διάρκεια μιας ημέρας όπου το κυψελωτό δίκτυο διαθέτει αχρησιμοποίητους φασματικούς πόρους. Η αποστολή των δεδομένων που δεν είναι ευαίσθητα σε καθυστέρηση από την M2M-G μπορεί να πραγματοποιείται σε αυτές τις χρονικές στιγμές.

Οι M2M συσκευές παράγουν πολύ μικρό όγκο δεδομένων αφού οι πληροφορίες που συνήθως διακινούνται είναι μικρού όγκου. Στις περιπτώσεις αυτές, οι επικεφαλίδες των πακέτων IP είναι μεγάλες συγκριτικά με τον όγκο δεδομένων που διακινούνται και καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό του συνολικού πακέτου δεδομένων. Ενδεικτικό είναι ότι η σταθερή επικεφαλίδα ενός IPv6 πακέτου είναι 40 bytes, μέγεθος που είναι συγκρίσιμο με αυτό των δεδομένων που αποστέλλονται. Η θύρα M2M-G συσσωματώνει μεγάλο αριθμό διαφορετικών πακέτων σε ενιαίο πακέτο, το οποίο έχει κοινή επικεφαλίδα, όπως απεικονίζεται και στο Σχ. 3.4. Η αρνητική επίπτωση της ενοποίησης των πακέτων είναι η καθυστέρηση αποστολής τους, αφού πρέπει να συμπληρωθεί ένα πλήρες πακέτο IP πριν αποσταλεί από τη θύρα M2M-G στο εξωτερικό δίκτυο. Πρέπει να προβλέπεται ειδική μέριμνα για υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας. Σε διαφορετική περίπτωση, υπάρχει το ενδεχόμενο κάποια υπηρεσία που απαιτεί άμεση μετάδοση δεδομένων, π.χ. ειδοποίηση συναγερμού κατοικίας, να καθυστερήσει στη θύρα M2M-G μέχρι να συμπληρωθεί πακέτο δεδομένων IP για να αποσταλεί. Η αύξηση του πλήθους των συσκευών M2M που υποστηρίζονται από ένα δίκτυο HAN, μειώνει δραστικά τη μέση καθυστέρηση για την αποστολή των πακέτων, καθώς το πακέτο

συμπληρώνεται σε ταχύτερο χρονικό διάστημα. Ο συνδυασμός του χρονικού προγραμματισμού και της συσσωμάτωσης πακέτων δίνει τη βέλτιστη λύση προς αποφυγή συμφόρησης στις επόμενες βαθμίδες του δικτύου.



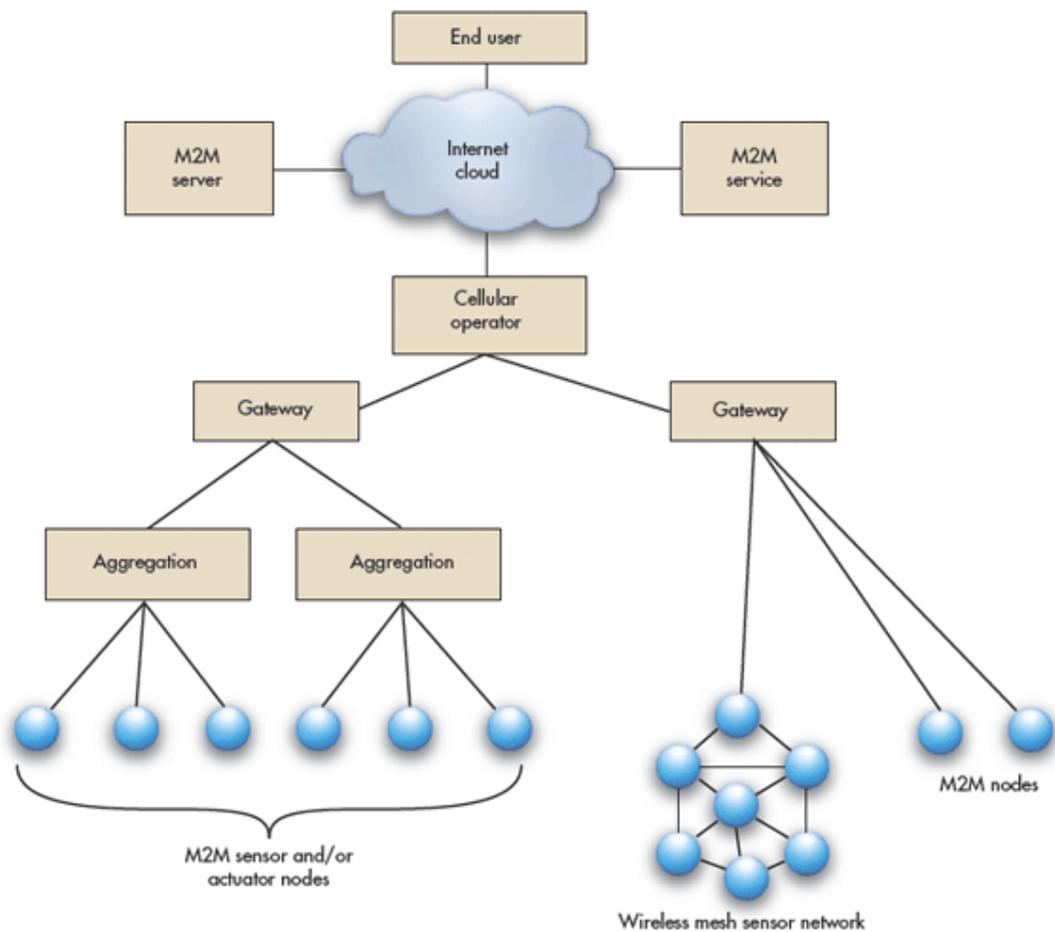
Σχήμα 3.4 Συσσωμάτωση/Ενοποίηση πακέτων από την M2M-G

Τέλος, ο κόμβος αναμετάδοσης πακέτων M2M-Relay Node (M2M-R), αν και είναι πιθανό να βρίσκεται εκτός του δικτύου κατοικίας HAN – αυτό εξαρτάται από την τοπολογία του εκάστοτε δικτύου – στη συγκεκριμένη εργασία θεωρείται εντός του HAN. Ο κόμβος αυτός μπορεί να υλοποιεί λειτουργίες παρόμοιες με αυτές του κόμβου M2M-G. Διασυνδέει διαφορετικά HAN μεταξύ τους και απομονώνει το σύνολο των δικτύων HAN από το δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών LTE. Μπορεί να λειτουργεί ως M2M-G στην περίπτωση όπου η M2M-G ενός δικτύου HAN δεν υποστηρίζει σύνδεση με δίκτυο LTE. Ταυτόχρονα, επεκτείνει, τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου κινητών επικοινωνιών αποκλειστικά για χρήση από M2M υπηρεσίες. Η λειτουργία των M2M-R είναι παρόμοια με τη λειτουργία των σταθμών βάσης χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας (μικροκυψέλες). Η σημαντική διαφορά των κόμβων M2M-R σε σχέση με τις μικροκυψέλες είναι ότι οι μικροκυψέλες είναι μέρος του δικτύου LTE, ενώ οι κόμβοι M2M-R αντιμετωπίζονται από το δίκτυο ως τερματικά που επικοινωνούν απευθείας με τους σταθμούς βάσης του LTE.

3.2 Δίκτυο Ράδιο-Πρόσβασης E-UTRAN

Δίκτυο Ραδιο-Πρόσβασης (E-UTRAN) είναι το τμήμα που διαχειρίζεται τη ραδιο-επικοινωνία μεταξύ των κινητών σταθμών και του δικτύου κορμού. Αποτελεί,

δηλαδή, το τμήμα του δικτύου που βρίσκεται ανάμεσα στα τερματικά, είτε πρόκειται για M2M συσκευές είτε για κινητά τηλέφωνα, και το δίκτυο κορμού EPC. Κάθε κινητός σταθμός LTE σε κάθε χρονική στιγμή περιέρχεται στη δικαιοδοσία μίας κυψέλης του δικτύου και επικοινωνεί με τον αντίστοιχο Evolved Node B (eNB). Ο σταθμός βάσης eNB επικοινωνεί με όλους τους κινητούς σταθμούς που είναι συνδεδεμένοι σε αυτόν, διακινεί δεδομένα από και προς αυτούς και, επιπλέον, ελέγχει βασικές χαμηλού επιπέδου λειτουργίες τους, αποστέλλοντας κατάλληλα μηνύματα σηματοδοσίας (π.χ. εντολές μεταπομπής). Εκτός από τα τερματικά, κάθε eNB συνδέεται και με το δίκτυο κορμού μέσω της διεπαφής S1, αλλά και με γειτονικούς σταθμούς βάσης eNB του E-UTRAN, μέσω της διεπαφής X2, η οποία μεταφέρει κυρίως μηνύματα σηματοδοσίας αλλά και προωθεί πακέτα δεδομένων, στην περίπτωση μεταπομπής.



Σχήμα 3.5 Αρχιτεκτονική δικτύου M2M με σημεία συσσωμάτωσης πακέτων

Συνοπτικά, οι βασικές λειτουργίες του συστήματος που υλοποιούνται από τους σταθμούς eNB είναι:

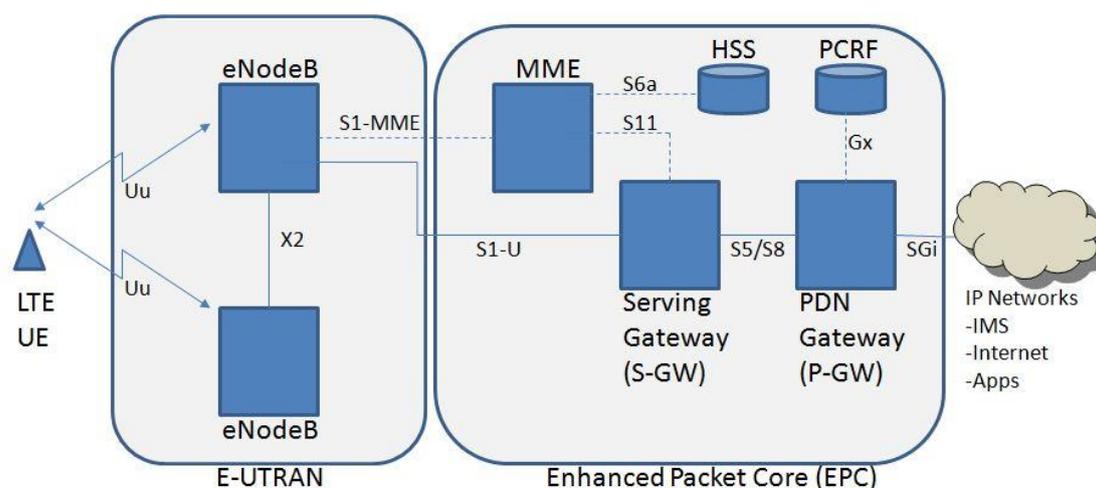
- Λειτουργίες διαχείρισης ραδιο-πόρων (RRM). Συγκεκριμένα, έλεγχος ραδιοκομιστή (radio bearer), έλεγχος αποδοχής σύνδεσης, έλεγχος κινητικότητας συνδεδεμένων χρηστών και δυναμική εκχώρηση ραδιο-πόρων στους χρήστες.
- Επιβολή των επιπέδων QoS στην uplink ζεύξη.
- Ευρυεκπομπή πληροφοριών κυψέλης, όπως κωδικός κυψέλης Cell-ID, κωδικός περιοχής LAC, κωδικό κρυπτογράφησης Primary Scrambling Code, κλπ.
- Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση δεδομένων σε επίπεδο χρήστη και ελέγχου.
- Συμπίεση και αποσυμπίεση επικεφαλίδων IP πακέτων δεδομένων του επιπέδου χρήστη.
- Δρομολόγηση των δεδομένων του επιπέδου χρήστη προς το Serving Gateway (S-GW).
- Χρονοπρογραμματισμός και εκπομπή των μηνυμάτων τηλε-ειδοποίησης και των προειδοποιητικών μηνυμάτων για φυσικές καταστροφές. Τα μηνύματα αυτά δημιουργούνται από τη μονάδα Mobility Management Entity (MME).
- Χρονοπρογραμματισμός και εκπομπή των μηνυμάτων ευρυεκπομπής που δημιουργούνται από τη μονάδα MME ή τη μονάδα λειτουργίας και συντήρησης (Operation & Maintenance) του δικτύου.
- Διάρθρωση μετρήσεων και αναφοράς μετρήσεων για τις λειτουργίες κινητικότητας και χρονοπρογραμματισμού.

Οι συσκευές M2M χρησιμοποιούν το E-UTRAN τμήμα του δικτύου για την αποστολή δεδομένων σε κάποιο απομακρυσμένο M2M-S όπου πραγματοποιείται διαχείριση και επεξεργασία τους. Στα δεδομένα των M2M συσκευών μπορεί να έχει πρόσβαση, μέσω του M2M-S, κάθε πιστοποιημένος χρήστης, χωρίς να είναι απαραίτητη η φυσική παρουσία στην M2M συσκευή αυτή.

Η πρόσβαση σε κάποιο σταθμό eNB αποτελεί στενωπό του συνολικού δικτύου και γενικά της αρχιτεκτονικής του συστήματος στο οποίο αναφέρεται η παρούσα εργασία. Οι λόγοι της δύσκολης προσβασιμότητας είναι τόσο η περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη των δικτύων LTE όσο και οι περιορισμένοι φασματικοί πόροι που έχουν ανατεθεί στις κινητές τηλεπικοινωνίες και κατ'επέκταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους eNB. Κάθε σταθμός eNB χαρακτηρίζεται από μέγιστο αριθμό τερματικών που μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα. Σε περίπτωση έκτακτου περιστατικού, διατάξεις M2M-D προσπαθούν να συνδεθούν στο γειτονικό eNB, μεταβαίνοντας από την κατάσταση αδράνειας σε ενεργή κατάσταση προς μετάδοση πακέτων στο δίκτυο. Λόγω της ζήτησης για ταυτόχρονη σύνδεση μεγάλου πλήθους συσκευών και τερματικών στο eNB, προκύπτει σημαντική αύξηση του ποσοστού αποκλεισμού συνδέσεων. Η ορθή αρχιτεκτονική σχεδίαση του δικτύου μπορεί να μειώσει το ποσοστό αυτό. Επομένως, καθίσταται φανερό η σημασία των M2M-G

και M2M-R καθώς και των λειτουργιών που επιτελούν, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στο εδάφιο 3.1. Η απομόνωση των προηγούμενων βαθμίδων μέσω της συσσωμάτωσης των πακέτων οδηγεί στην αποφυγή επιβάρυνσης του δικτύου ραδιο-πρόσβασης.

3.3 Δίκτυο κορμού EPC



Σχήμα 3.6 Δίκτυο LTE

Η δομή του δικτύου κορμού EPC απεικονίζεται στο Σχ. 3.6. Οι βασικές δομικές μονάδες του δικτύου είναι :

- Οικείος εξυπηρετητής συνδρομητών-Home Subscriber Server (HSS)

Ο HSS είναι η κεντρική βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία των συνδρομητών του τηλεπικοινωνιακού παρόχου του οικείου LTE δικτύου. Παρέχει, επίσης, υποστήριξη σε βασικές λειτουργίες, όπως διαχείριση κινητικότητας χρηστών, εγκατάσταση κλήσης και συνεδρίας, πιστοποίηση χρηστών και εξουσιοδότηση πρόσβασης. Τέλος, περιέχει στοιχεία για τα Δίκτυα Πακέτων Δεδομένων (Packet Data Networks - PDNs), στα οποία μπορεί να συνδεθεί ένα τερματικό (π.χ. το Access Point Name (APN) ή τη διεύθυνση του PDN) και πληροφορίες για τα MME με τα οποία επικοινωνεί το τερματικό.

- Κεντρική πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων - PDN Gateway

Η κεντρική πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων, PDN-Gateway (P-GW), επικοινωνεί με τα υπόλοιπα PDNs, όπως π.χ. το Διαδίκτυο, μέσω της διεπαφής S-Gi. Ο

διαχωρισμός των PDN πραγματοποιείται μέσω της χαρακτηριστικής ονομασίας σημείου πρόσβασης (APN) που διαθέτει. Η πύλη P-GW διασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του τερματικού με εξωτερικά δίκτυα δεδομένων και δρομολογεί δεδομένα από και προς τα PDN, εκχωρώντας διευθύνσεις και προθέματα IP στα τερματικά. Ένα τερματικό μπορεί ταυτόχρονα να διατηρεί συνδέσεις με περισσότερα του ενός P-GW για να αποκτήσει πρόσβαση σε αντίστοιχα PDN δίκτυα. Η πύλη P-GW επιβάλλει την εκάστοτε εφαρμοζόμενη πολιτική για κάθε χρήστη, φιλτράρει τα πακέτα δεδομένων που διακινούνται προς και από το χρήστη, υποστηρίζει τις διαδικασίες χρεώσεων, νόμιμης υποκλοπής και απόρριψης πακέτων. Τέλος, σημαντική λειτουργία της P-GW είναι ότι ενεργεί ως άγκυρα για την κινητικότητα μεταξύ δικτύων 3GPP και non-3GPP. Αποτελεί δηλαδή το σταθερό κόμβο ο οποίος διασυνδέει τα δίκτυα 3GPP και non-3GPP.

- Κεντρική πύλη εξυπηρέτησης (S-GW)

Η κεντρική πύλη S-GW ενεργεί ως δρομολογητής προωθώντας πακέτα δεδομένων των χρηστών από το σταθμό βάσης προς την αντίστοιχη κεντρική πύλη P-GW. Παράλληλα, η S-GW ενεργεί ως άγκυρα κινητικότητας σε επίπεδο χρηστών κατά τη μεταπομπή μεταξύ διαφορετικών σταθμών eNB ή μεταξύ του δικτύου LTE και άλλων δικτύων. Η επικοινωνία μεταξύ της S-GW και της P-GW πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής S5 ή S8, αντίστοιχα με το αν οι δύο τερματικοί κινητοί σταθμοί βρίσκονται στο ίδιο ή σε διαφορετικό δίκτυο. Για τερματικά που βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας (idle state), η S-GW διακόπτει την κίνηση downlink προς τα τερματικά αυτά, και ενεργοποιεί τηλε-ειδοποίηση όταν δέχεται δεδομένα στην downlink ζεύξη που προορίζονται για τα τερματικά που βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Επιπλέον, η S-GW διαχειρίζεται και αποθηκεύει πλαίσια εξοπλισμού χρήστη, π.χ. παραμέτρους υπηρεσίας κομιστή IP, και εσωτερικές πληροφορίες δρομολόγησης του δικτύου. Τέλος, σε περίπτωση νόμιμης υποκλοπής, η S-GW αντιγράφει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση του χρήστη.

- Μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (MME)

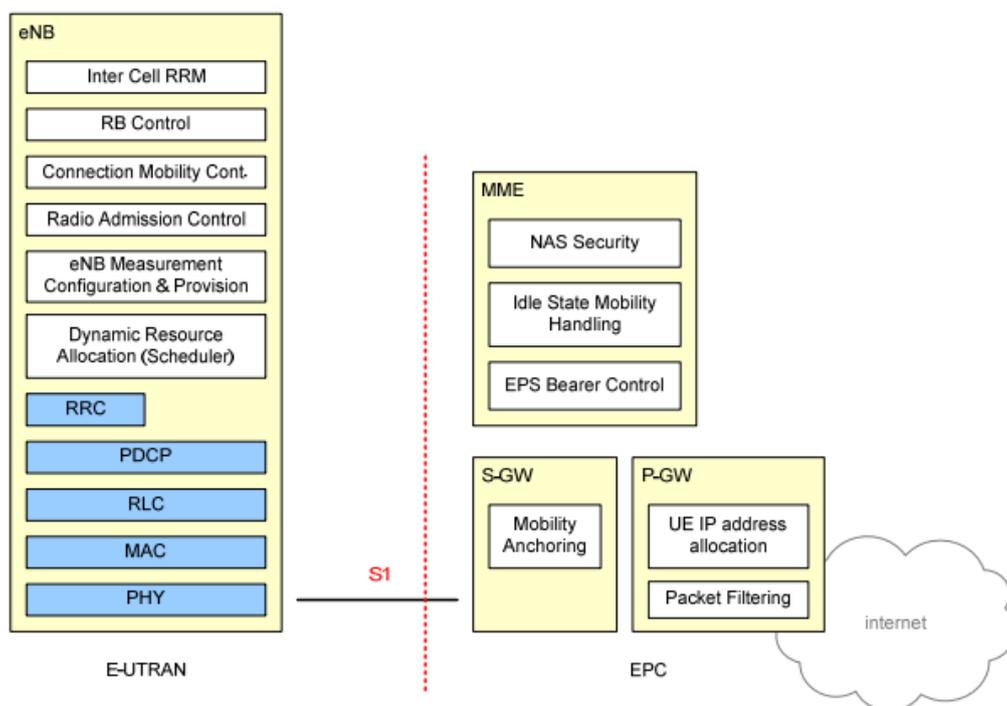
Η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (MME) ελέγχει τις λειτουργίες υψηλού επιπέδου του κινητού σταθμού, όπως η σηματοδότηση και η επικοινωνία με τον οικείο εξυπηρετητή HSS. Η μονάδα MME αποτελεί τον κύριο κόμβο ελέγχου του δικτύου πρόσβασης LTE. Είναι υπεύθυνη τόσο για τον εντοπισμό των τερματικών που βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας όσο και για τις υπηρεσίες τηλε-ειδοποίησης και επανεκπομπής. Συμμετέχει στις διαδικασίες ενεργοποίησης και απενεργοποίησης κομιστή, έχει την ευθύνη επιλογής S-GW για κάθε κινητό σταθμό τόσο κατά την αρχική εισαγωγή του στο δίκτυο όσο και κατά τη μεταπομπή εντός του δικτύου LTE, όταν απαιτείται αλλαγή κόμβου δικτύου κορμού. Επίσης, σημαντική είναι η λειτουργία της πιστοποίησης χρήστη που πραγματοποιείται σε

συνεργασία με τον HSS. Η μονάδα MME αποτελεί σημείο τερματισμού για την κρυπτογράφηση και την προστασία της ακεραιότητας της σηματοδότησης του Non

Access Stratum (NAS), αλλά και τον έλεγχο ασφαλείας του Access Stratum (AS). Επιπλέον, η MME δημιουργεί και εκχωρεί προσωρινές ταυτότητες στα τερματικά και ελέγχει την εξουσιοδότηση του τερματικού να συμμετέχει στο δημόσιο επίγειο δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών του παρόχου (PLMN), επιβάλλοντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς περιαγωγής σε κάθε τερματικό. Τέλος, η MME παρέχει τις λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου για την υποστήριξη κινητικότητας μεταξύ LTE και δικτύων 2G/3G.

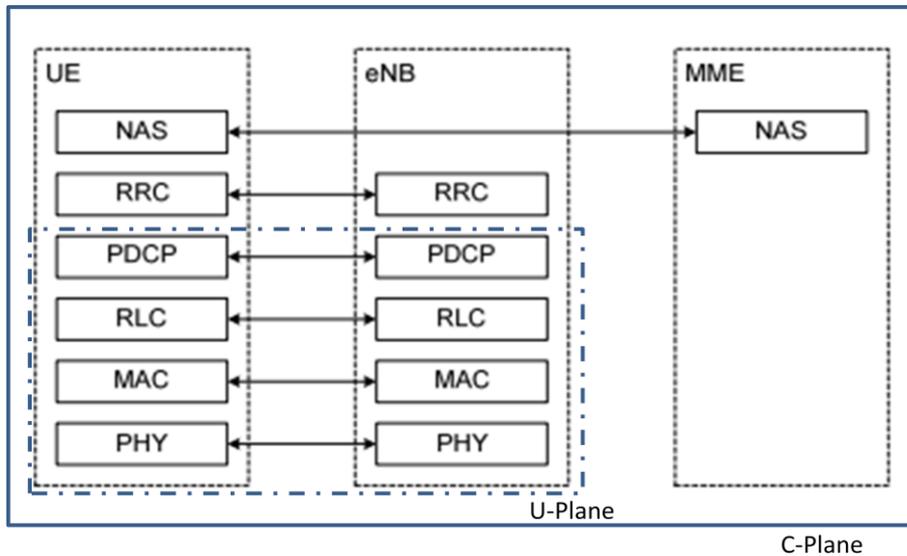
- Μονάδα πολιτικής και κανόνων χρέωσης (PCRF)

Η μονάδα πολιτικής και κανόνων χρέωσης, Policy and Charging Rules Function – PCRF, είναι μονάδα λογισμικού που επικοινωνεί με τις βάσεις δεδομένων του δικτύου και ελέγχει την εφαρμογή της πολιτικής χρεώσεων που εφαρμόζεται σε κάθε συνδρομητή.



Σχήμα 3.7 Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE

3.4 Στοιβά πρωτοκόλλων δικτύου LTE



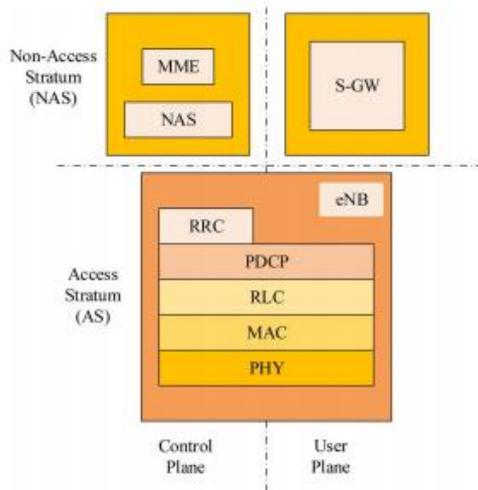
Σχήμα 3.8 Στοιβά πρωτοκόλλων σε επίπεδο ελέγχου και σε επίπεδο χρήστη του LTE

Οι λειτουργίες επιπέδου χρήστη (συμπίεση επικεφαλίδας πακέτων, κρυπτογράφηση, αίτηση αυτόματης αναμετάδοσης ARQ και Hybrid-ARQ) υλοποιούνται μέσω διασύνδεσης του εξοπλισμού χρήστη (UE) με το σταθμό βάσης eNB στα επίπεδα PHY, MAC, RLC και PDCP.

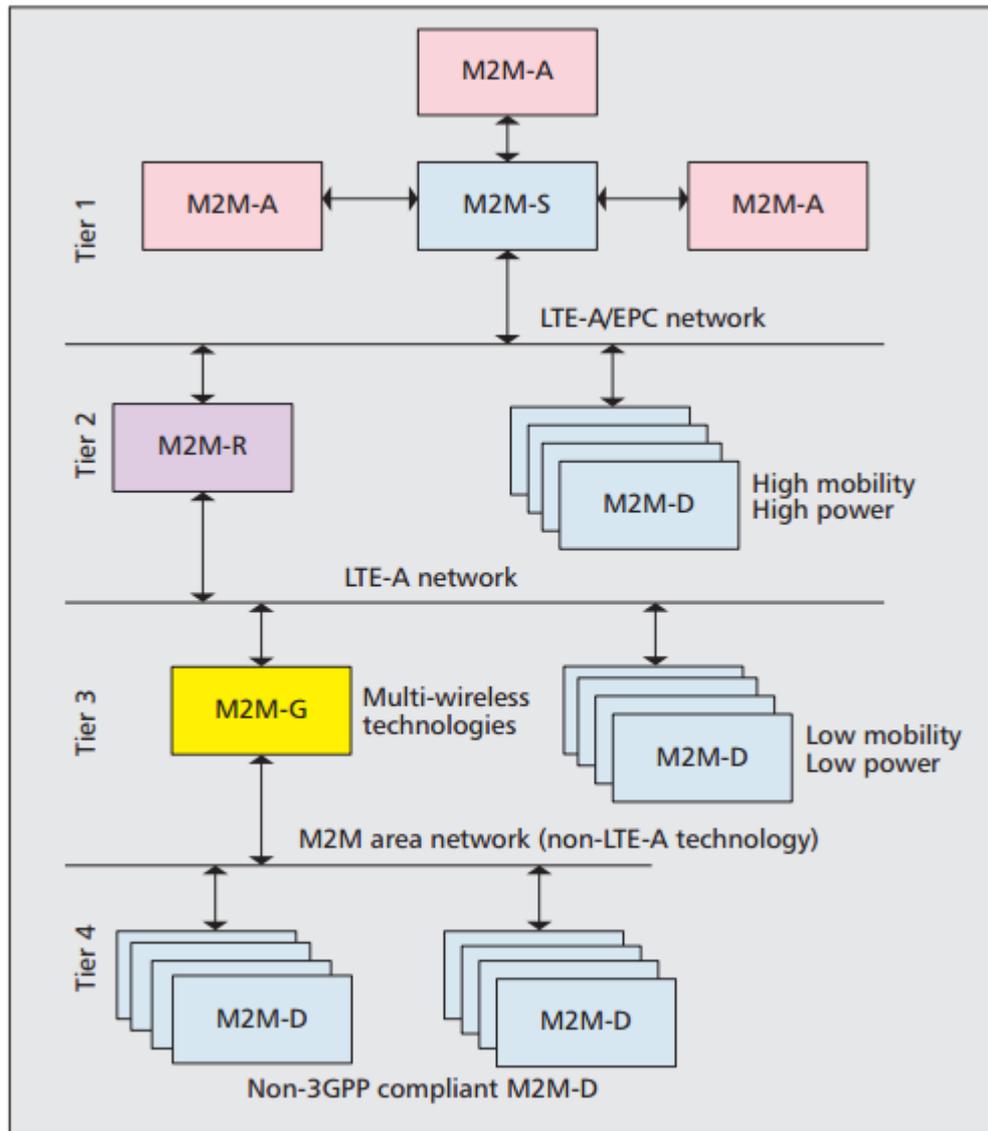
- Το στρώμα PDCP, το οποίο από την πλευρά του δικτύου τερματίζεται στο eNB. Στο C-plane επεξεργάζεται και μεταφέρει τις πληροφορίες του στρώματος RRC, ενώ στο U-plane διαχειρίζεται πακέτα δεδομένων IP και υλοποιεί τις λειτουργίες της κρυπτογράφησης και της προστασίας της ακεραιότητας των δεδομένων. Τέλος, υλοποιεί τις διαδικασίες αναμετάδοσης κατά την πραγματοποίηση μεταπομπής.
- Τα στρώματα Radio Link Control (RLC) και MAC τερματίζονται και αυτά, από την πλευρά του δικτύου, στο eNB. Η κύρια λειτουργία του RLC είναι η οργάνωση πακέτων δεδομένων ανώτερων στρωμάτων σε μέγεθος κατάλληλο για μετάδοση μέσω της ραδιο-επαφής του LTE. Στο επίπεδο RLC ανακτώνται και τα πακέτα που έχουν χαθεί κατά τη μετάδοση, ενώ αναδιατάσσονται και τα πακέτα που φθάνουν στο δέκτη σε αλλαγμένη σειρά. Το στρώμα MAC είναι υπεύθυνο για την πολύπλεξη και αποπολύπλεξη δεδομένων μεταξύ φυσικού στρώματος και στρώματος RLC. Επικοινωνεί με το στρώμα RLC μέσω λογικών καναλιών και με το φυσικό στρώμα μέσω καναλιών μεταφοράς. Οι κύριες λειτουργίες του MAC είναι: ο χρονοπρογραμματισμός των ράδιο-πόρων μεταξύ των UEs, η υλοποίηση των

διαδικασιών τυχαίας πρόσβασης και η χρονική ευθυγράμμιση στην uplink ζεύξη.

- Το φυσικό στρώμα (PHY) περιλαμβάνει την επεξεργασία των καναλιών μεταφοράς που υλοποιούν τις διαδικασίες ελέγχου σφαλμάτων, την επεξεργασία των φυσικών καναλιών και υλοποιούν τις τεχνικές OFDMA, SC-FDMA και MIMO. Στο φυσικό στρώμα ανήκει επίσης το αναλογικό τμήμα του δικτύου (μίκτες, κεραίες κλπ.). Η επικοινωνία του PHY με το MAC γίνεται μέσω καναλιών μεταφοράς, ενώ τα διάφορα τμήματα του PHY επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω φυσικών καναλιών.
- Το στρώμα Radio Resource Control (RRC) εφαρμόζεται μόνο στο C-Plane και αυτό από την πλευρά του δικτύου τερματίζεται στο eNB. Υλοποιεί τις λειτουργίες ευρυεκπομπής, τηλε-ειδοποίησης, και διαχείρισης συνδέσεων RRC, τις λειτουργίες κινητικότητας, τον έλεγχο και την αναφορά των μετρήσεων του εξοπλισμού χρήστη και τον έλεγχο του ραδιο-κομιστή (Radio Bearer Control). Τέλος, μεταφέρει τις πληροφορίες του NAS, είτε αυτές προορίζονται για συγκεκριμένο συνδρομητή ή για όλους τους συνδρομητές του δικτύου.
- Το πρωτόκολλο ελέγχου του συστρώματος μη πρόσβασης NAS τερματίζεται, από την πλευρά του δικτύου, στη μονάδα MME και μεταξύ άλλων πραγματοποιεί τη διαχείριση του κομιστή EPS (Evolved Packet System), τις διαδικασίες επαλήθευσης ταυτότητας, το χειρισμό της κινητικότητας και την ενεργοποίηση της τηλε-ειδοποίησης στην κατάσταση αδρανείας το ECM (EPS Connection Management) και τους ελέγχους ασφαλείας του συστήματος.



Σχήμα 3.9 Διαχωρισμός Access Stratum και Non Access Stratum



Σχήμα 3.10 Ιεραρχική προσέγγιση M2M υπηρεσιών με χρήση δικτύου LTE

Κεφάλαιο 4

Αξιοποίηση από πλευρά γεωγραφικής κάλυψης LTE δικτύων προς εξυπηρέτηση M2M συσκευών

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά πραγματοποιείται μια θεωρητική προσέγγιση της γεωγραφικής κάλυψης ενός δικτύου κινητών τηλεπικοινωνιών LTE και, στη συνέχεια, με χρήση του διαδικτυακού διαδραστικού εργαλείου xirio-online αποτυπώνεται η γεωγραφική κάλυψη σταθμών βάσης επί πραγματικών χαρτογραφικών δεδομένων.

4.1 Θεωρητικά μοντέλα γεωγραφικής κάλυψης

Η θεωρητική προσέγγιση της γεωγραφικής κάλυψης πραγματοποιείται με χρήση κάποιου μοντέλου επιλεγμένου μεταξύ του μεγάλου πλήθους εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης απωλειών διάδοσης που έχουν αναπτυχθεί. Η επιλογή του κατά περίπτωση κατάλληλου μοντέλου πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:

- Συχνότητα λειτουργίας
- Τύπος περιοχής (αστική, προαστιακή, αγροτική, με λόφους ή βουνά)
- Απόσταση πομπού και δέκτη
- Ύψος κεραιών πομπού και δέκτη
- Γεωγραφικά χαρακτηριστικά της προς κάλυψη περιοχής (προσανατολισμός δρόμων, μέσο ύψος κτιρίων, μέση απόσταση οικοδομικών τετραγώνων, μορφολογία περιοχής κατά την ευθεία που ενώνει πομπό και δέκτη, η ύπαρξη βλάστησης, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια των κτιρίων).

Τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν για θεωρητική μελέτη είναι:

- Μοντέλο Okumura - Hata
- Μοντέλο COST 231 - Hata
- Μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami

4.1.1 Μοντέλο Okumura – Hata

Το μοντέλο Okumura – Hata είναι ένα καθαρά εμπειρικό μοντέλο, του οποίου οι παράμετροι προσδιορίζονται με τη μέθοδο της προσαρμογής σε εκτεταμένες μετρήσεις. Το μοντέλο αυτό αποδίδει πολύ καλές προσεγγίσεις με μικρό σφάλμα.

Το εύρος τιμών των παραμέτρων για το οποίο έχει νόημα εφαρμογή των μοντέλο Okumura – Hata είναι:

$$\begin{aligned}150 &\leq f_c \leq 1500 \text{ MHz} \\30 &\leq h_{BS} \leq 200 \text{ m} \\1 &\leq h_{MS} \leq 10 \text{ m} \\1 &\leq d \leq 20 \text{ km}\end{aligned}\tag{4.1}$$

όπου f_c η συχνότητα λειτουργίας σε MHz, h_{BS} το ύψος του σταθμού βάσης σε μέτρα, h_{MS} το ύψος του κινητού τερματικού σε μέτρα και d η απόσταση σταθμού βάσης και κινητού τερματικού σε km.

Το μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για συστήματα που βασίζονται σε δίκτυο μακροκυψέλων και για κατοικημένες περιοχές. Εφαρμόζεται, δηλαδή, το συγκεκριμένο μοντέλο μόνο στην περίπτωση όπου η κεραία του σταθμού βάσης είναι τοποθετημένη σε ύψος υψηλότερο από αυτό των κτιρίων της προς κάλυψη περιοχής και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μικροκυψέλες. Οι απώλειες διάδοσης εξαρτώνται από τον τύπο της περιοχής.

Για αστικό περιβάλλον, το μοντέλο προβλέπει τη μεση τιμή για των απωλειών διάδοσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{aligned}L_{50}(dB) &= 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{BS} - a(h_{MS}) \\&\quad + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{BS}) \log_{10} d\end{aligned}\tag{4.2}$$

όπου $a(h_{MS})$ είναι διορθωτικός παράγοντας που λαμβάνει υπόψη το ύψος της κεραίας του κινητού τερματικού. Ο παράγοντας $a(h_{MS})$ εμφανίζει διαφοροποίηση με βάση το μέγεθος της πόλης, όπως φαίνεται από τον Πίν.4.1.

Για προαστιακό περιβάλλον οι μέσες απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(\text{αστικό}) - 2 \left[\log_{10} \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5.4\tag{4.3}$$

Μικρού ή Μεσαίου μεγέθους πόλεις:

$$a(h_{MS}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{MS} - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

Μεγάλες Πόλεις

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29 (\log_{10} 1.54 h_{MS})^2 - 1.1, & f_c \leq 200 \text{MHz} \\ 3.2 (\log_{10} 11.75 h_{MS})^2 - 4.97, & f_c \geq 400 \text{MHz} \end{cases}$$

Πίνακας 4.1 – Παράγοντας $a(h_{MS})$ μοντέλου Okumura-Hata

Για προαστιακό περιβάλλον οι μέσες απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(\text{αστικό}) - 2 [\log_{10}(\frac{f_c}{28})]^2 - 5.4 \quad (4.3)$$

ενώ για αγροτικό περιβάλλον από τη σχέση:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(\text{αστικό}) - 4.78(\log_{10} f_c)^2 + 18.33 \log_{10} f_c - 40.94 \quad (4.4)$$

όπου $L_{50}(\text{αστικό})$ είναι οι απώλειες διάδοσης για τις αντίστοιχες παραμέτρους για αστικό περιβάλλον, όπως προκύπτουν με εφαρμογή της (4.2).

4.1.2 Μοντέλο COST 231 – Hata

Το μοντέλο COST 231 – Hata αποτελεί επέκταση του μοντέλου Okumura-Hata για συχνότητες μεταξύ 1500MHz και 2000MHz. Ταυτόχρονα, όμως, το μοντέλο αυτό έχει προσαρμοστεί στις ανάγκες των ευρωπαϊκών πόλεων. Εφαρμόζεται αποκλειστικά σε αστικά περιβάλλοντα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$L(dB) = 46.3 + 33.9 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{BS} - a(h_{MS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{BS}) \log_{10} d + C \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

όπου

$$a(h_{MS}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{MS} - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8)$$

και

$$C = \begin{cases} 0dB, & \text{μεσαίου μεγέθους πόλεις, μικρα αστικά κέντρα} \\ & \text{με μικρή πυκνότητα βλάστησης} \\ 3dB, & \text{μητροπολιτικά κέντρα} \end{cases}$$

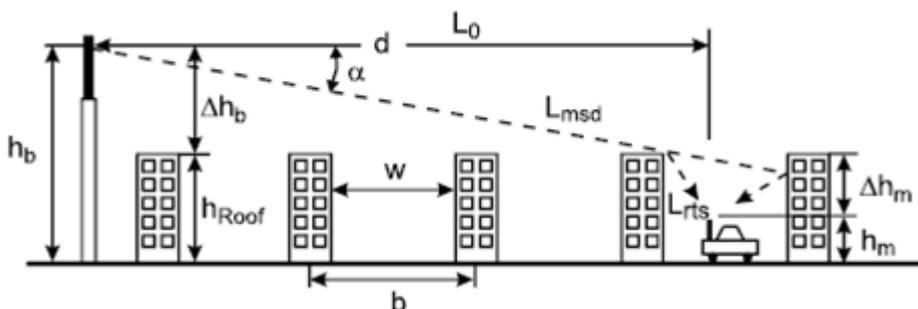
Τα μεγέθη των παραμέτρων του μοντέλου COST 231 – Hata ορίζονται με βάση τα μεγέθη της μεθόδου Okumura – Hata.

4.1.3 Μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami

Το μοντέλο αυτό δίνει αποτελέσματα με μικρή απόκλιση από τα πραγματικά μεγέθη, χωρίς να υπερεκτιμά ή υποεκτιμά τις απώλειες που προβλέπει. Τα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο αυτό είναι:

1. Τα ύψη των κτιρίων που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη.
2. Το πλάτος των δρόμων
3. Η απόσταση μεταξύ των κτιρίων.
4. Η κατεύθυνση των δρόμων αναφορικά με την ευθεία που συνδέει τον πομπό με το δέκτη.

Τα χαρακτηριστικά αυτά απεικονίζονται στο Σχ.4.1.



Σχήμα 4.1 Παράμετροι μοντέλου διάδοσης COST 231 - Walfisch-Ikegami

Το εύρος τιμών των παραμέτρων για το οποίο έχει νόημα εφαρμογής το μοντέλο είναι:

$$\begin{aligned}
 800 &\leq f_c \leq 2000 \text{ MHz} \\
 4 &\leq h_{BS} \leq 50 \text{ m} \\
 1 &\leq h_{MS} \leq 3 \text{ m} \\
 0.02 &\leq d \leq 5 \text{ km}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Από τις τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην (4.6) προκύπτει ότι το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή τόσο σε μακροκυψέλες όσο και σε μικροκυψέλες, σε

πυκνά δομημένες πόλεις με επίπεδο έδαφος. Η αξιοπιστία του μοντέλου είναι μεγάλη όταν η κεραία του σταθμού βάσης είναι τοποθετημένη σε ύψος υψηλότερο από αυτό των κτιρίων της προς κάλυψη περιοχής.

Σε περιβάλλον διάδοσης όπου υπάρχει οπτική επαφή πομπού και δέκτη (LOS), δηλαδή σε street-canyon, οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$L_{LOS}(dB) = 42.6 + 26 \log d_{km} + 20 \log f_{MHz} \quad (4.7)$$

Για ζεύξεις NLOS όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή πομπού και δέκτη, οι απώλειες διάδοσης υπολογίζονται ως το άθροισμα τριών όρων:

- I. Απώλειες ελεύθερου χώρου (FSL), L_{FS} .
- II. Απώλειες περίθλασης από πολλαπλά συνεχόμενα εμπόδια, L_{msd} . Αυτές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Walfisch-Bertoni.
- III. Απώλειες περίθλασης και σκέδασης από την κορυφή του κτιρίου στο δρόμο, L_{rts} . Αυτές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο των Ikegami-Yoshida-Umehira.

Διακρίνονται, λοιπόν, δύο περιπτώσεις για τον υπολογισμό των απωλειών εφαρμόζοντας τη σχέση:

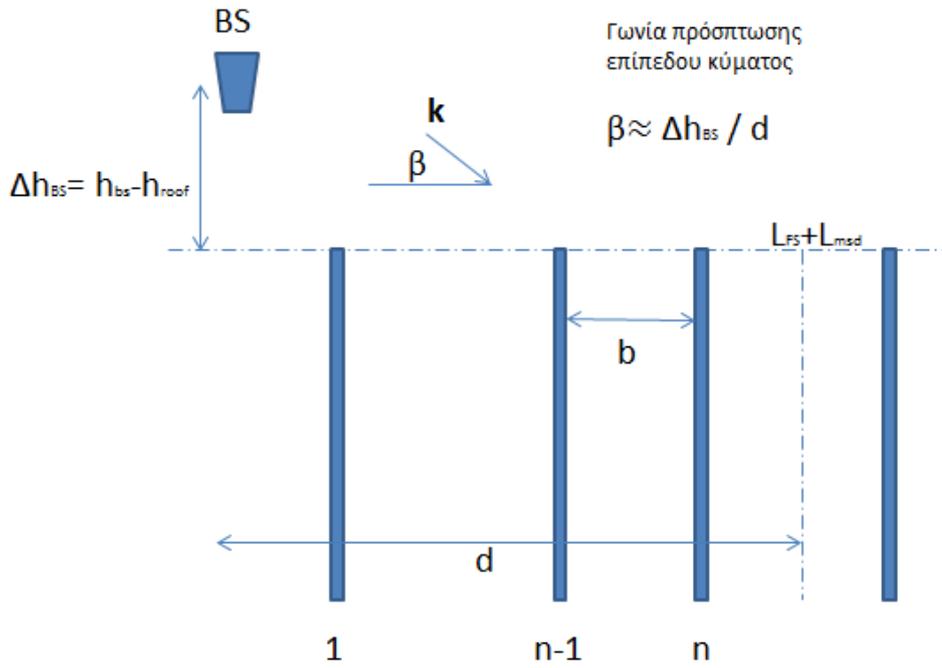
$$L_{NLOS}(dB) = \begin{cases} L_{FS} + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_{FS}, & L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Ο υπολογισμός των απωλειών διάδοσης ελεύθερου χώρου προκύπτει κατά τα γνωστά από τη σχέση:

$$L_{FS} = 32.45 + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) \quad (4.9)$$

Ο υπολογισμός των απωλειών από πολλαπλά συνεχόμενα εμπόδια, L_{msd} , πραγματοποιείται με βάση την θεώρηση των Walfisch-Bertoni, όπως αυτή αποτυπώνεται και στο Σχ.4.2.

Το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami δεν ισχύει για ύψη σταθμού βάσης μικρότερα της στέγης των κτιρίων. Για το λόγο αυτό έγιναν διορθώσεις με βάση το μοντέλο COST 231, οπότε προκύπτει η (4.10).



Τα κτίρια αντικαθίστανται από ημι-άπειρα παραπετάσματα αμελητέου πάχους

Σχήμα 4.2 Θεώρηση Walfisch - Bertoni

$$L_{msd}(dB) = L_{bsh} + k_a + k_d \log_{10} d + k_f + \log_{10} f_c - 9 \log_{10} b \quad (4.10)$$

όπου

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10} [1 + (h_{BS} - h_{roof})], & h_{BS} > h_{roof} \\ 0, & h_{BS} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (4.10)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_{BS} > h_{roof} \\ 54 - 0.8(h_{BS} - h_{roof}), & h_{BS} \leq h_{roof} \text{ και } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8(h_{BS} - h_{roof}) \frac{d}{0.5}, & h_{BS} \leq h_{roof} \text{ και } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (4.11)$$

Ο όρος k_a έχει εισαχθεί ώστε να προβλέψει την αύξηση των απωλειών διάδοσης όταν η κεραία του Σταθμού Βάσης είναι χαμηλότερα από τα γειτονικά κτίρια.

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_{BS} > h_{roof} \\ 18 - 15 \frac{h_{BS} - h_{roof}}{h_{roof}}, & h_{BS} \leq h_{roof} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{Μικρές πόλεις ή προαστιακές} \\ & \text{περιοχές με μικρή βλάστηση} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{Μητροπολιτικά κέντρα} \end{cases} \quad (4.13)$$

Οι όροι k_d και k_f , που εμφανίζονται στις (4.12) και (4.13) αντίστοιχα, αποδίδουν την εξάρτηση των απωλειών που οφείλονται σε πολλαπλά συνεχόμενα εμπόδια από την απόσταση και τη συχνότητα.

Οι απώλειες περίθλασης και σκέδασης από την κορυφή του κτιρίου στο δρόμο, L_{rts} , υπολογίζονται σύμφωνα με το μοντέλο Ikegami-Yoshida-Uhimeru, όπως απεικονίζεται και στο Σχ.4.3. Το σήμα λήψης από κινητό τερματικό είναι το άθροισμα του περιθλώμενου από τη στέγη σήματος και του περιθλώμενου, και στη συνέχεια, ανακλώμενου από το κτίριο σήματος. Οι απώλειες περίθλασης και σκέδασης L_{rts} δίνονται από τη σχέση:

$$L_{rts} = -8.2 - 10 \log_{10} w + 10 \log_{10} f_{MHz} + 20 \log_{10} (h_{roof} - h_{MS}) + L_{ori} \quad (4.14)$$

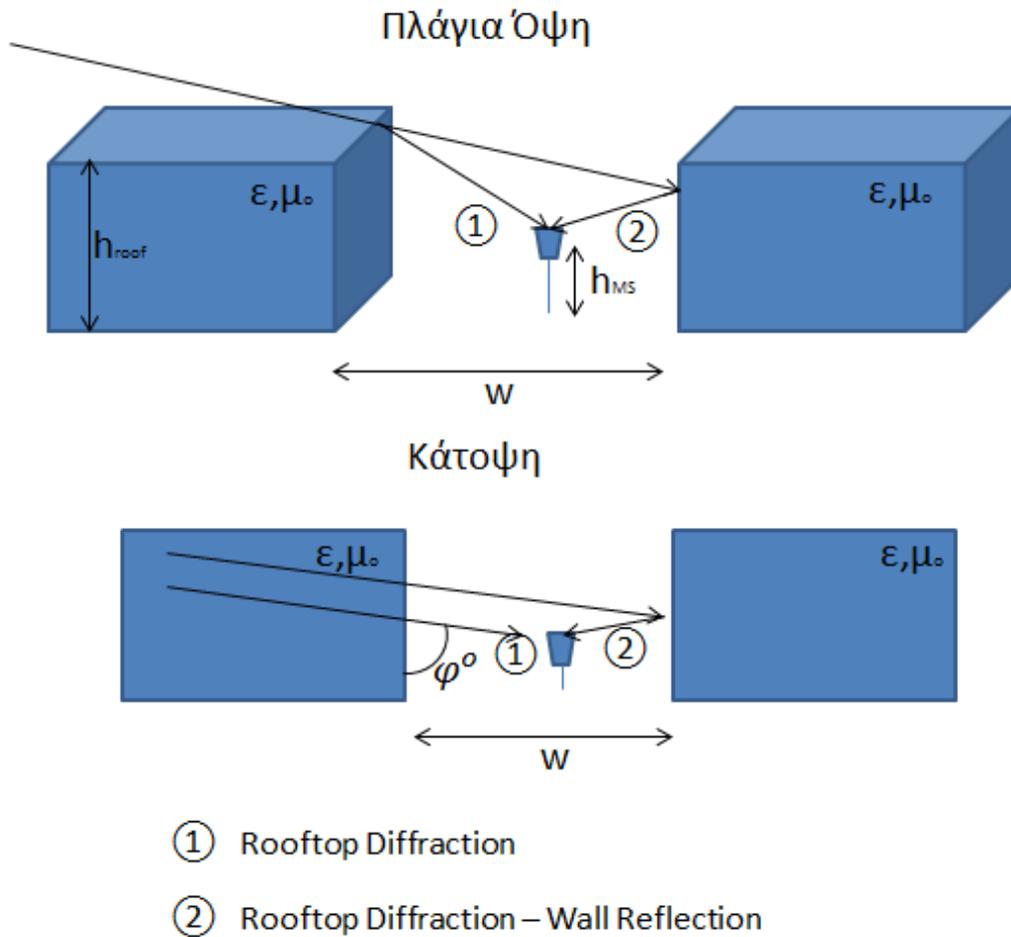
όπου L_{ori} ο παράγοντας προσανατολισμού που δίνεται από τη σχέση:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \varphi, & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35^\circ), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55^\circ), & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (4.15)$$

Στην περίπτωση όπου οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο δεν είναι γνωστές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τυπικές τιμές που περιλαμβάνονται στον Πίν.4.2.

| |
|--|
| $h_{BS} = 3m \times (\text{αριθμός ορόφων}) + \text{Ύψος στέγης κτιρίων}$ |
| $\text{Ύψος στέγης κτηρίων} = \begin{cases} 3m, & \text{για μή επίπεδη στέγη} \\ 0m, & \text{για επίπεδη στέγη} \end{cases}$ |
| $b = 20-50 m$ |
| $w = 0.5 \times b$ |
| $\varphi = 90^\circ$ |

Πίνακας 4.2 – Τυπικές τιμές παραμέτρων μοντέλου Ikegami-Yoshida-Umehira



Σχήμα 4.3 Τομή και κάτοψη της γεωμετρίας όταν θεωρείται το μοντέλο των Ikegami – Yoshida – Umehira

Το μέσο σφάλμα των απωλειών της μεθόδου είναι $\pm 3\text{dB}$ με τυπική απόκλιση 4-8dB. Για μικροκυψέλες το σφάλμα αυξάνεται. Η αξιοπιστία της μεθόδου μειώνεται όταν το έδαφος δεν είναι επίπεδο ή αν το περιβάλλον είναι ανομοιογενές.

Τέλος, το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami συμπεριφέρεται επαρκώς μόνο όταν $d_s < 1$, όπου:

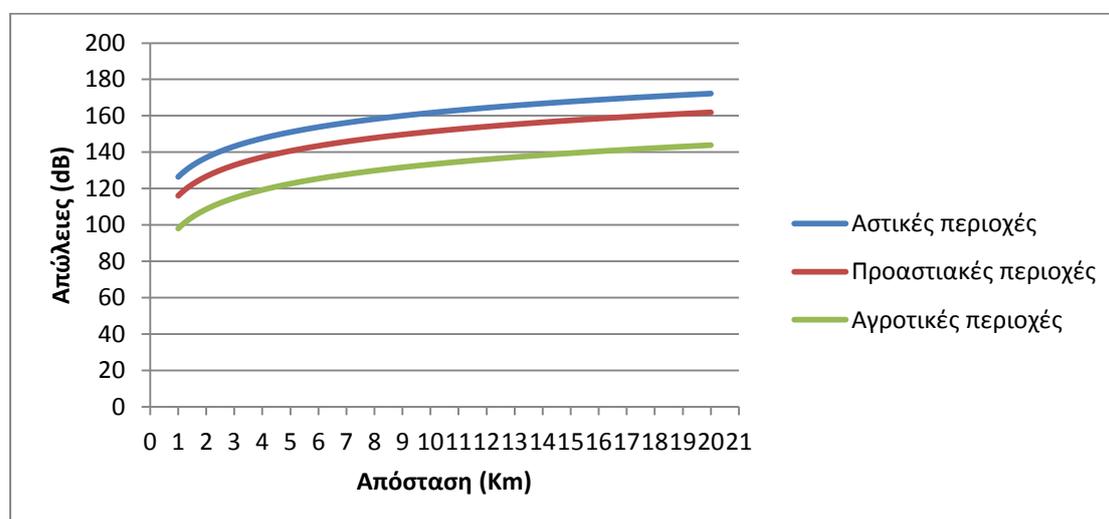
$$d_s = \frac{\lambda d^2}{(h_{BS} - h_{roof})^2} \quad (4.16)$$

Στην περίπτωση της σχεδόν εφαπτομενικής πρόσπτωσης του επίπεδου κύματος, δηλαδή όταν $d_s > 1$, το μοντέλο δεν ισχύει.

4.2 Μελέτη θεωρητικών μοντέλων

4.2.1 Μοντέλο Okumura - Hata

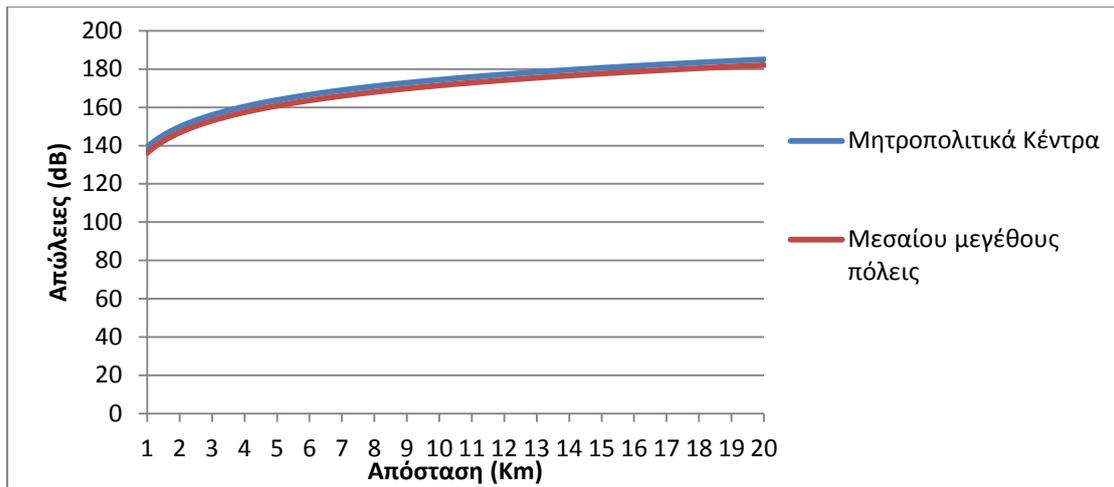
Λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους της (4.1), το μοντέλο Okumura-Hata μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για τη ζώνη συχνοτήτων περί τα 900MHz. Για τη ζώνη συχνοτήτων αυτή, οι απώλειες σε dB απεικονίζονται ως συνάρτηση της απόστασης στο Σχ.4.4 για αστικές, προαστιακές και αγροτικές περιοχές. Δεν έχει πραγματοποιηθεί διαχωρισμός ως προς το μέγεθος της αστικής περιοχής καθώς η διαφορά προκύπτει σταθερά 0.2dB.



Σχήμα 4.4 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο Okumura-Hata για μεσαίου μεγέθους πόλη και συχνότητα $f=900$ MHz

4.2.2 Μοντέλο Cost231 - Hata

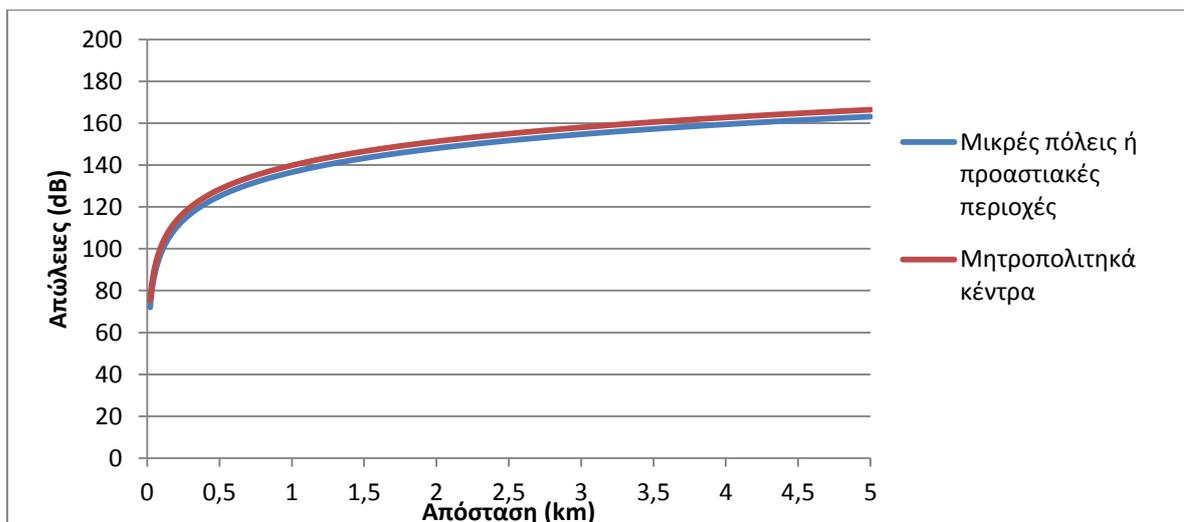
Όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 4.1.2, το μοντέλο COST231-Hata αποτελεί προέκταση του μοντέλου Okumura-Hata για συχνότητες από 1500MHz έως 2000MHz. Για τη ζώνη συχνοτήτων περί τα 1800MHz, οι απώλειες ως συνάρτηση της απόστασης απεικονίζονται στο Σχ.4.5, τόσο για μητροπολιτικές περιοχές όσο και για μεσαίου μεγέθους πόλεις.



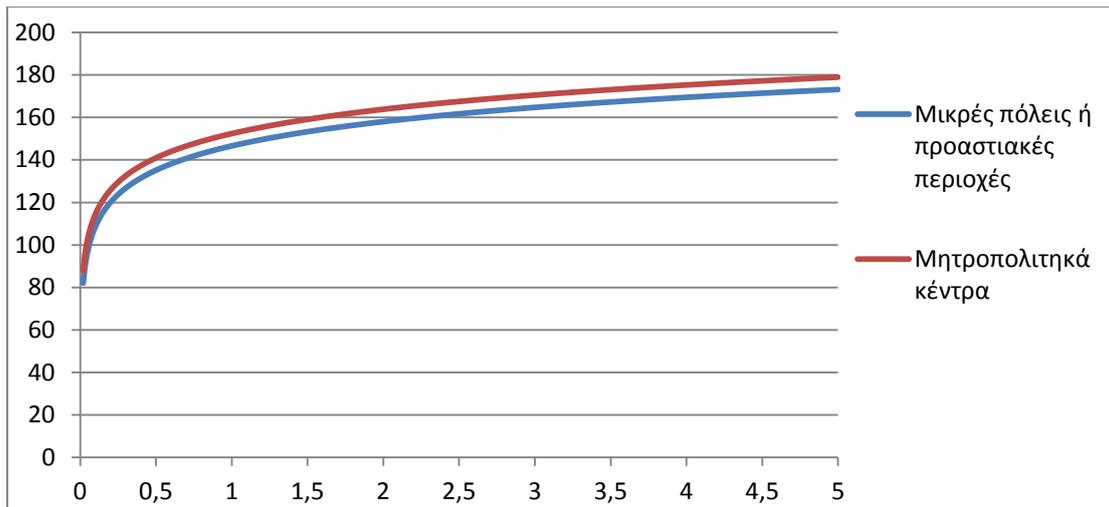
Σχήμα 4.5 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο Cost231-Hata για μητροπολιτικά κέντρα ή μεσαίου μεγέθους πόλεις και συχνότητα $f=1800\text{MHz}$

4.2.3 Μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami

Στα Σχ.4.6 και Σχ.4.7 απεικονίζονται οι απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami για περιβάλλον NLOS, για συχνότητες $f=900\text{MHz}$ και $f=1800\text{MHz}$, ύψος σταθμού βάσης 30m, μέσο ύψος στέγης κτιρίων 20m, ύψος κινητού τερματικού 1.5m, $\phi=90^\circ$. Τα Σχ.4.5 και Σχ.4.6 αφορούν τόσο μητροπολιτικά κέντρα ($b=20\text{m}$) όσο και μικρές πόλεις ή προαστιακά κέντρα ($b=30\text{m}$).



Σχήμα 4.6 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami για μητροπολιτικά κέντρα – μικρού μεγέθους πόλεις, και συχνότητα $f=900\text{MHz}$



Σχήμα 4.7 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST 231 - Walfisch-Ikegami για μητροπολιτικά κέντρα – μικρού μεγέθους πόλεις, και συχνότητα $f=1900\text{MHz}$

4.2.4 Συμπεράσματα της θεωρητικής μελέτης

Λαμβάνοντας υπόψη τις νέες εξελίξεις σχετικά με το LTE, όπως περιγράφονται στην έκδοση Release 13 στο εδάφιο 1.1.2.6 – με κυριότερο στοιχείο τη μέγιστη απώλεια διάδοσης στα 155.7dB – και ότι τα μοντέλα διάδοσης τις περισσότερες φορές αποκλίνουν από τα πραγματικά μεγέθη, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένας σταθμός LTE σε αστική-μητροπολιτική περιοχή μπορεί να καλύπτει γεωγραφική περιοχή μέγιστης ακτίνας 3km. Αναγκαία είναι, λοιπόν, η πύκνωση του δικτύου που πρέπει να πραγματοποιηθεί για τη βέλτιστη εξυπηρέτηση των τερματικών που χρησιμοποιούν δίκτυο LTE. Αντίθετα, σε αγροτικές περιοχές, η ακτίνα κάλυψης είναι μεγαλύτερη, οπότε δεν απαιτείται τόσο πυκνό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο LTE.

4.3 Προσομοίωση Γεωγραφικής Κάλυψης

Για την προσομοίωση της παρούσας εργασίας έχει χρησιμοποιηθεί το διαδικτυακό εργαλείο προσομοίωσης xirio-online. Λόγω της δοκιμαστικής έκδοσης της εφαρμογής xirio-online, δεν μπορεί να προσομοιωθεί μεγάλος αριθμός σταθμών βάσης ούτε να χρησιμοποιηθεί χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης. Οι θέσεις των σταθμών βάσης έχουν προκύψει από την ιστοσελίδα της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) καθώς και από την ιστοσελίδα opensignal.com. Η θέση των σταθμών βάσης στην εφαρμογή opensignal έχει προκύψει από δεδομένα που αποστέλλονται από τα έξυπνα κινητά τηλέφωνα smartphones που έχουν εγκατεστημένη την εφαρμογή.

Στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση της εξυπηρέτησης M2M υπηρεσιών μέσω του δικτύου LTE. Προς τούτο, το δίκτυο θα τροποποιηθεί, όσο το επιτρέπει η εφαρμογή, με βάση την έκδοση Release 13 για M2M (εδάφιο 1.1.2.6).

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι:

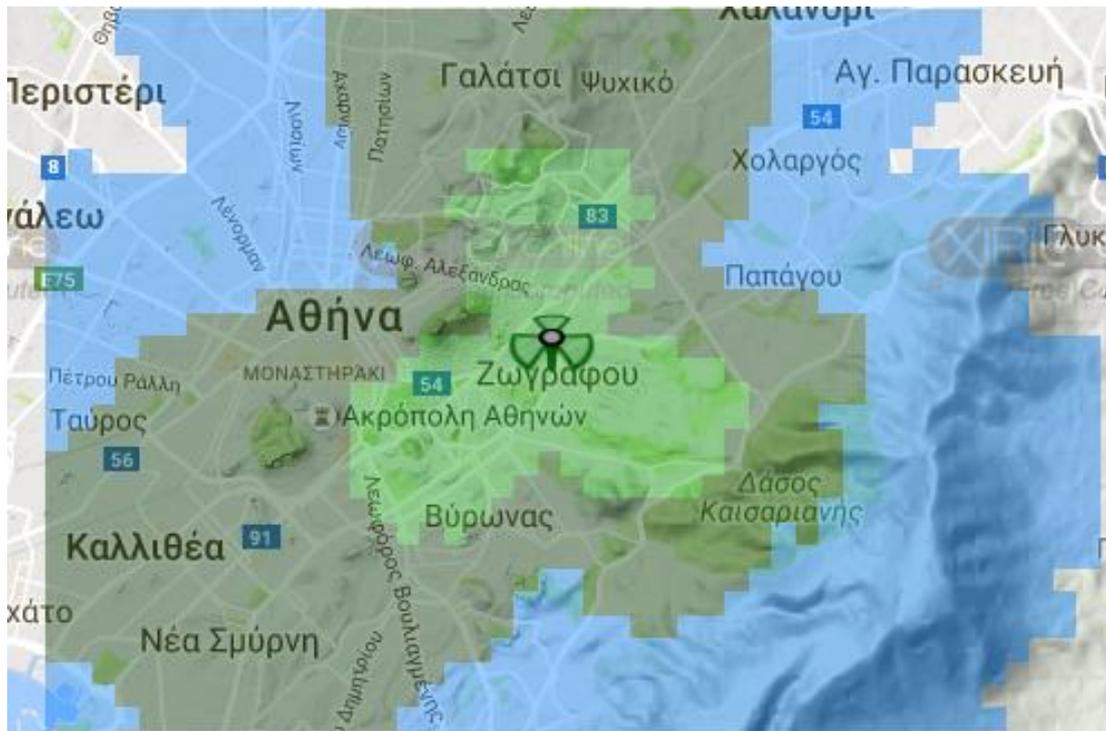
1. Χρήση LTE-A FDD
2. Εύρος ζώνης 1.4 MHz
3. Τομεοποίηση τριών τομέων
4. Μηδενική γωνία κλίσης των κεραιών των σταθμών βάσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους
5. Ύψος σταθμού βάσης 30m από το έδαφος
6. Δυναμική εκχώρηση συχνοτήτων με στόχο την αποφυγή παρεμβολών
7. Χωρική πολυπλεξία MIMO 4x4
8. Ύψος ως προς το οποίο μελετάται η γεωγραφική κάλυψη 1.5m
9. Ισχύς εκπομπής κινητού τερματικού 23dbm
10. Απώλειες εντός των κτιρίων 5dB/m για οριζόντια διάδοση μέσα στο κτίριο και 3dB/κατακόρυφο όροφο. Λόγω της ελλιπούς χαρτογράφησης, όπου η μέγιστη ανάλυση που παρέχεται δωρεάν είναι 100m, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες από τη διάδοση στο εσωτερικό του κτιρίου.

Τα επίπεδα ισχύος που αποτυπώνονται πάνω στα χαρτογραφικά δεδομένα ως αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συγκεκριμένου κεφαλαίου, ακολουθούν τα επίπεδα του Σχ.4.8. Η βέλτιστη περίπτωση για την απρόσκοπτη λειτουργία ενός κινητού τερματικού – στην υπό μελέτη περίπτωση μιας συσκευής M2M – είναι η ισχύς λήψης να είναι μεγαλύτερη των -92 dBm.

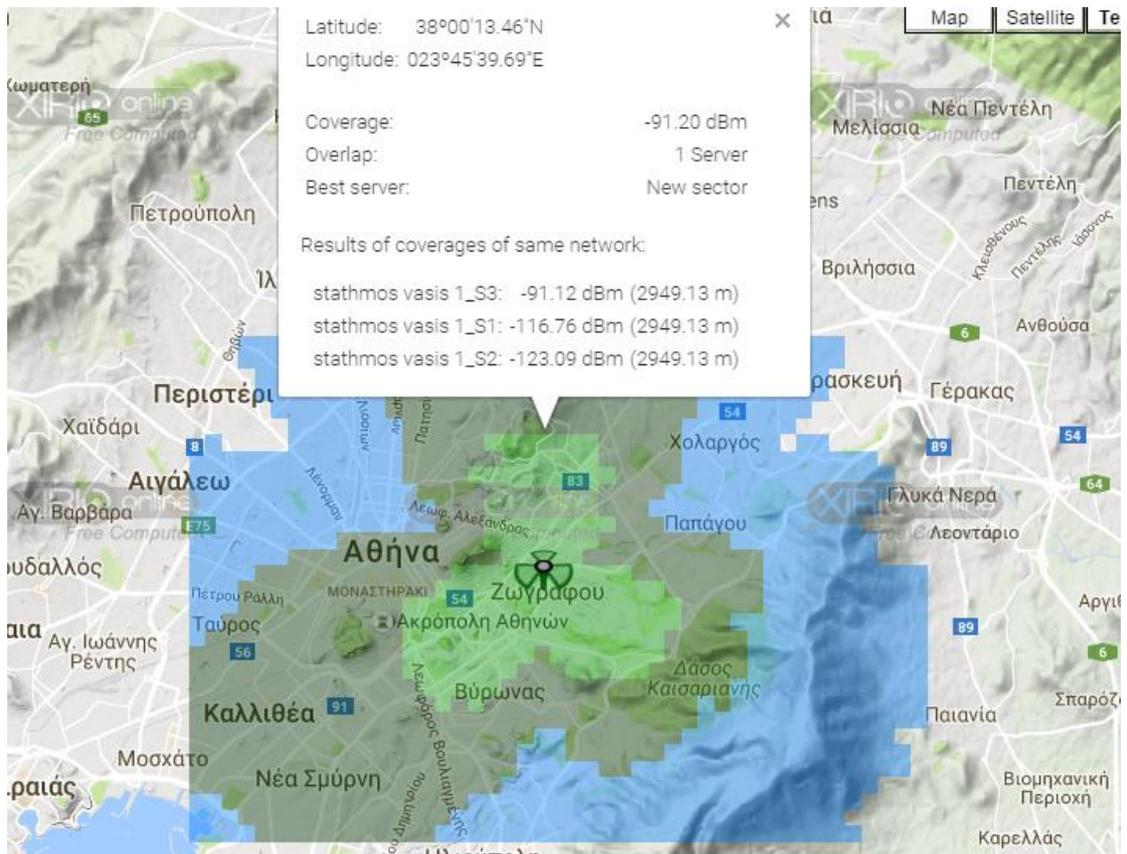
| Color | Signal ranges |
|---|-------------------------|
|  | [-112.00 , -102.00) dBm |
|  | [-102.00 , -92.00) dBm |
|  | [-92.00 , Infinity) dBm |

Σχήμα 4.8 Επίπεδα ισχύος προσομοιώσεων

Από τα αποτελέσματα του Σχ.4.9 προκύπτει ότι ένας σταθμός βάσης εγκατεστημένος σε μια αστική περιοχή μπορεί με χρήση κεραιών τριών τομέων να καλύψει γεωγραφικά μια περιοχή σε σχήμα που μπορεί να παρομοιαστεί με ελλειπτικό, με μέγιστη ακτίνα περίπου 2.5 έως 3km, όπως απεικονίζεται αναλυτικά στο Σχ.4.10.

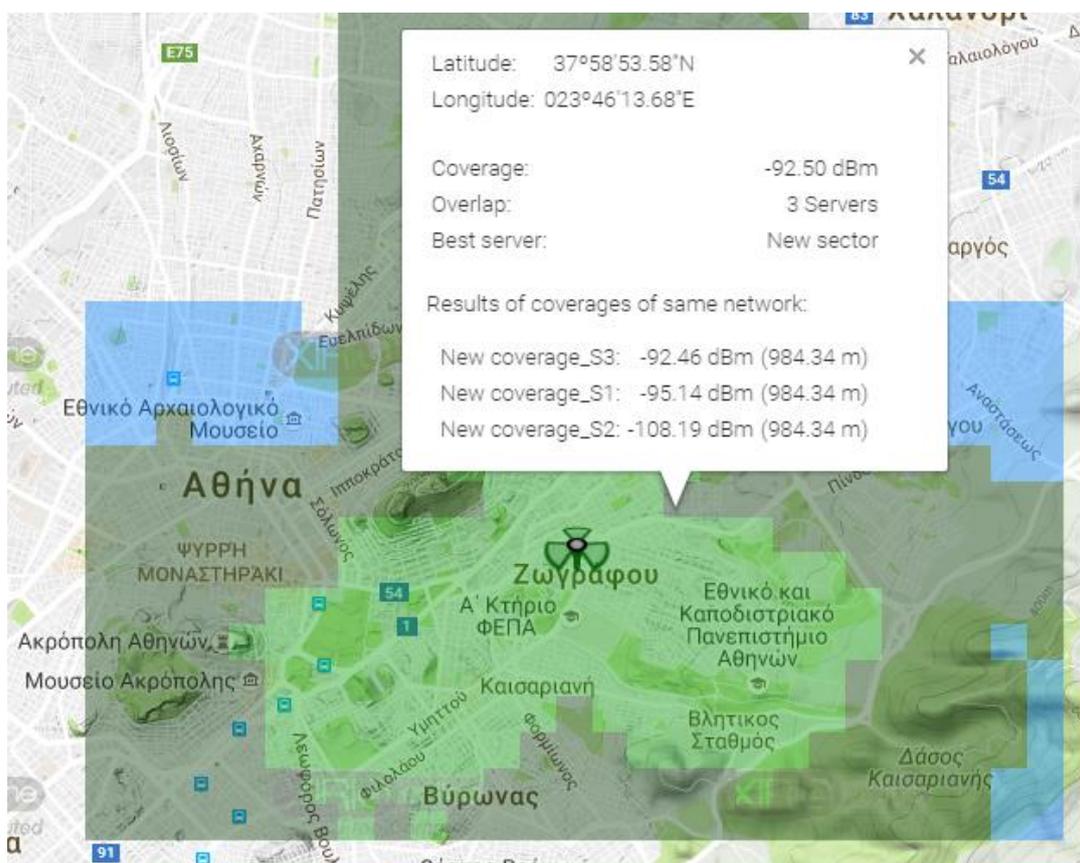


Σχήμα 4.9 Απεικόνιση γεωγραφικής κάλυψης σταθμού eNB



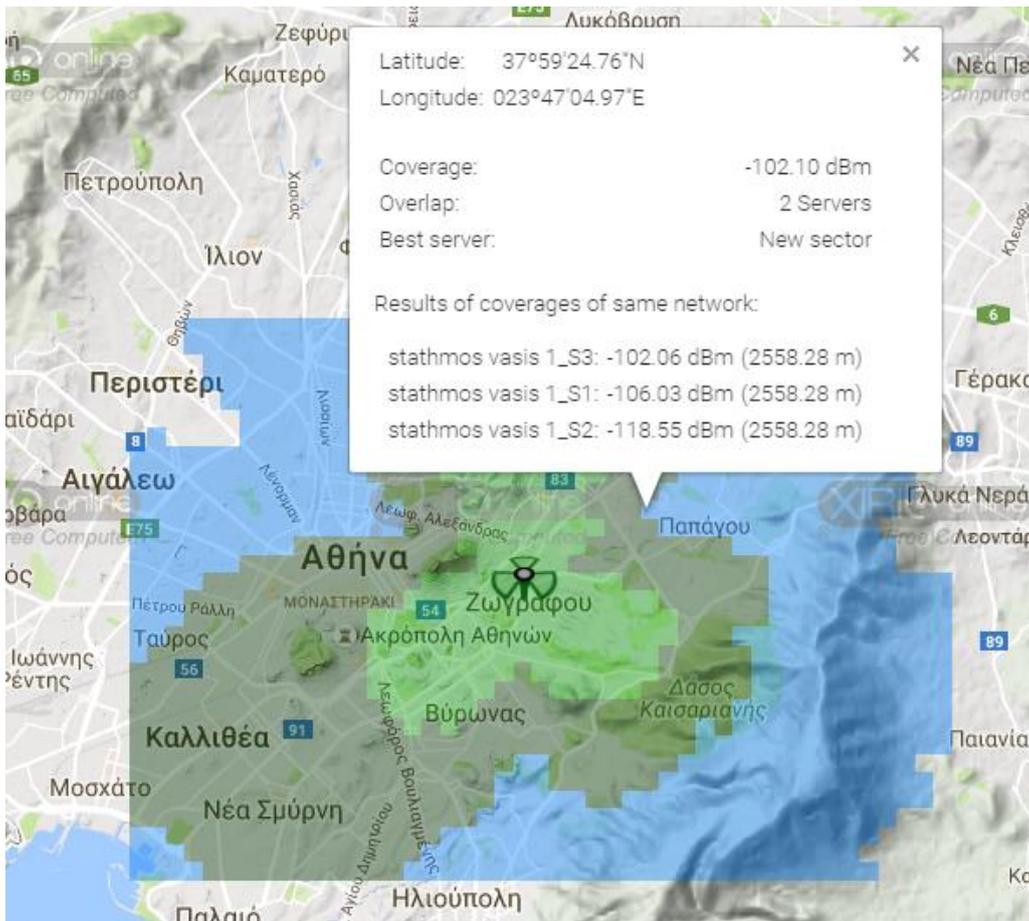
Σχήμα 4.10 Μέγιστη απόσταση βέλτιστης περίπτωσης ισχύος λήψης

Λόγω των τριών τομέων ενός σταθμού eNB - που είναι και η συνηθέστερη εφαρμογή στην πράξη - υπάρχουν γεωγραφικά τμήματα που λαμβάνουν χαμηλότερη ισχύ λήψης. Όπως φαίνεται από το Σχ.4.11 το σήμα λήψης σε απόσταση περίπου 1km από το σταθμό βάσης είναι χαμηλότερο των 92dBm, ενώ όπως απεικονίζεται και στο Σχ.4.12, σε απόσταση 2.5km ένα κινητό τερματικό λαμβάνει σήμα ισχύος χαμηλότερης των -102dB. Η ισχύς λήψης των -102dBm από μια M2M συσκευή είναι απαγορευτική για την ομαλή και αξιόπιστη λειτουργία της.

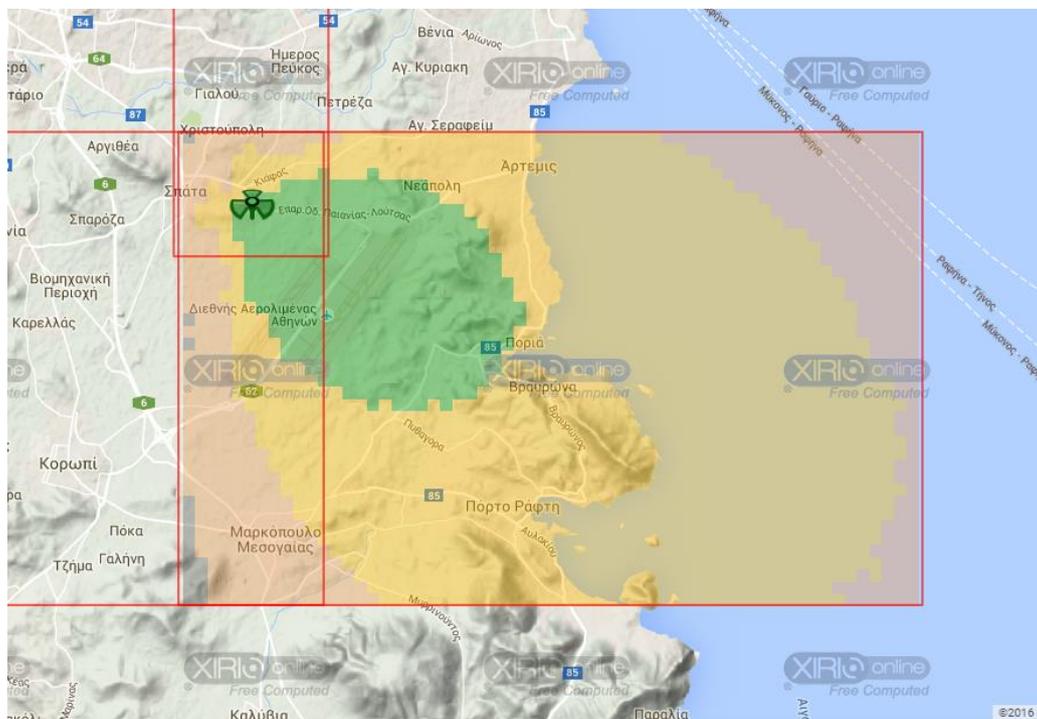


Σχήμα 4.11 Περιοχές χαμηλής γεωγραφικής κάλυψης λόγω χρήσης τριών τομέων

Όπως προκύπτει από το Σχ.4.13, σε αγροτικές περιοχές, η γεωγραφική κάλυψη ενός σταθμού βάσης LTE eNB είναι σαφώς διευρυμένη. Η απόσταση από τον σταθμό βάσης στην οποία η ισχύς λήψης είναι μικρότερη των -92dBm, από 3km που ήταν σε αστικές περιοχές αυξάνεται σε 6km, έχοντας χρησιμοποιήσει ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους προσομοίωσης. Η περιοχή βέλτιστης κάλυψης, στην οποία η ισχύς λήψης είναι μεγαλύτερη των -92dBm, από 1km σε αστική περιοχή αυξάνεται σε 3km για αγροτική περιοχή.



Σχήμα 4.12 Απόσταση μηδενικής κάλυψης από σταθμό eNB



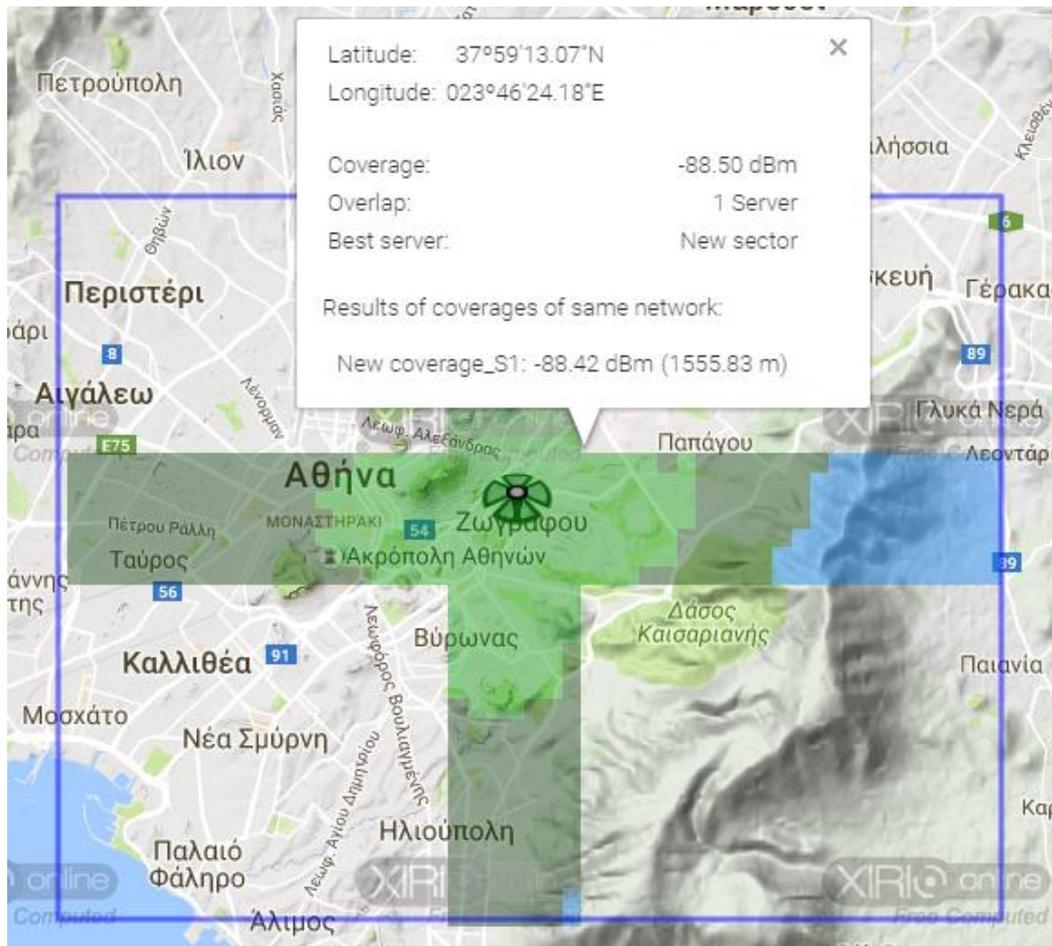
Σχήμα 4.13 Γεωγραφική κάλυψη αγροτικής περιοχής

Με βάση τις προσομοιώσεις με χρήση του xirio-online, η περιοχή επαρκούς κάλυψης για αστικές περιοχές έχει ακτίνα της τάξης των 2.5km. Για αγροτικές περιοχές η ακτίνα αυτή είναι της τάξης των 8km. Ο πάροχος του τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρέπει να μεριμνά κατάλληλα για τη βέλτιστη γεωγραφική κάλυψη, με την υιοθέτηση νέων εκδόσεων LTE και τη χρήση μεθόδων που παρουσιάζονται στο εδάφιο 4.4, ώστε να υπάρχει σωστή λειτουργία των M2M συσκευών.

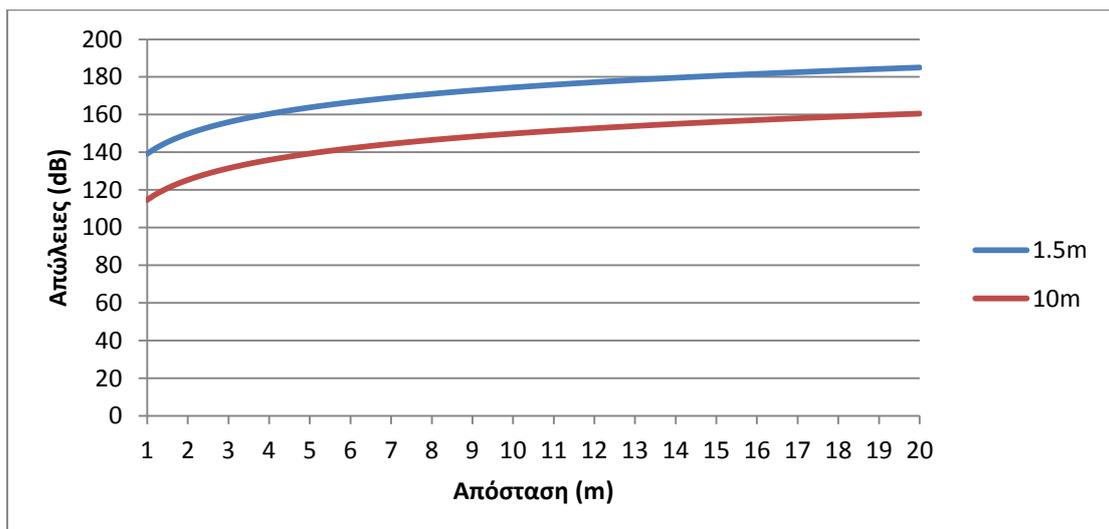
4.4 Μέθοδοι Βελτίωσης Γεωγραφικής Κάλυψης LTE δικτύου

Η βελτίωση της γεωγραφικής κάλυψης είναι αναγκαία για την πλήρη κάλυψη όλης της γεωγραφικής περιοχής όπου λειτουργούν συσκευές M2M. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η διεύρυνση της γεωγραφικής κάλυψης, χωρίς πύκνωση του δικτύου, δηλαδή χωρίς αύξηση των σταθμών βάσεων LTE, είναι οι ακόλουθοι:

1. Αύξηση της τομεοποίησης ενός σταθμού βάσης. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ.4.14 σε αντιδιαστολή με αυτά του Σχ.4.9. Η περιοχή ικανοποιητικής κάλυψης έχει ακτίνα που αυξάνει από τα 2.5km σε περίπου 5km.
2. Χρήση κόμβου αναμετάδοσης σε μεγαλύτερο ύψος, ώστε να αποφεύγονται οι απώλειες που δημιουργούνται εντός των κτιρίων και για μείωση της απαιτούμενης εμβέλειας του βασικού σταθμού βάσης. Για την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης μεθόδου, στο Σχ.4.15 παρουσιάζεται σύγκριση των απωλειών ζεύξης για ύψος κινητού τερματικού 1.5m και 10m μέσω του μοντέλου COST231 – Hata, το οποίο αποδίδει αποτελέσματα κοντά στις πραγματικές τιμές για μελέτη διάδοσης σε αστικά κέντρα. Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη πλέον μπορεί να φθάνει από τα 3km τα 17km – δεδομένου ότι οι απώλειες διάδοσης πρέπει να παραμένουν κάτω από 155.7dB.
3. Αύξηση του χρόνου μετάδοσης ενός πακέτου. Η αύξηση του χρόνου αποστολής σημαίνει είτε την χρήση χαμηλότερου σχήματος μετάδοσης είτε την επανειλημμένη αποστολή του ίδιου πακέτου. Η αύξηση αυτή συνεπάγεται την αύξηση της ενέργειας συμβόλου, και, κατ' επέκταση, τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές, SINR.
4. Εναλλαγή συχνοτήτων, η οποία επιτρέπει την αύξηση του κέρδους διαφορικής λήψης. Η εναλλαγή συχνοτήτων συμβάλλει θετικά στη βελτίωση του σήματος λήψης από σταθερές συσκευές M2M ή από συσκευές M2M με χαμηλή κινητικότητα



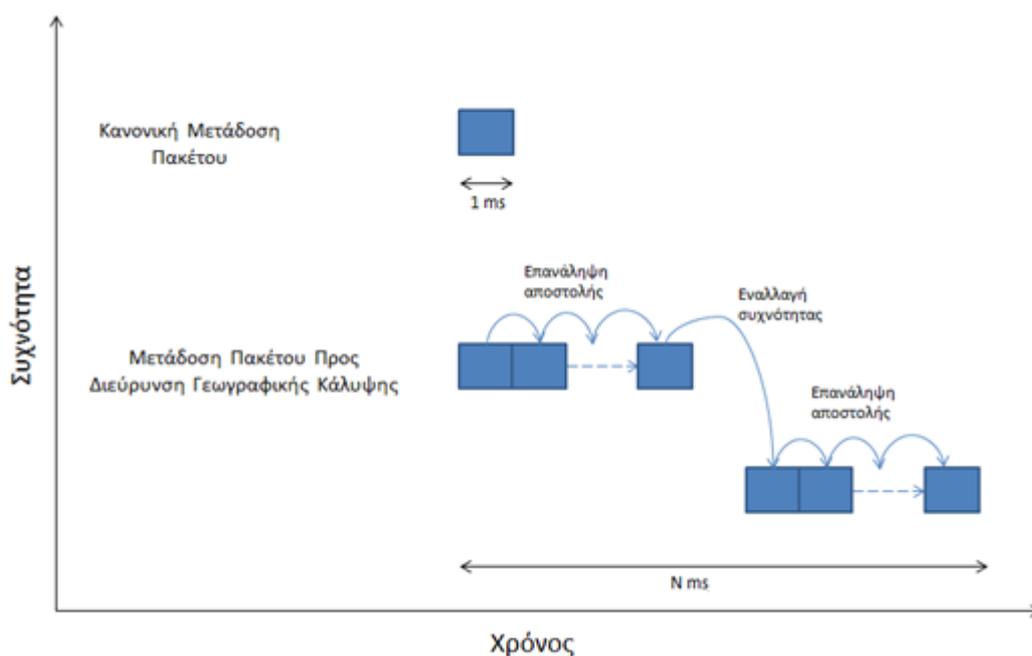
Σχήμα 4.14 Προσομοίωση με χρήση 4 τομέων



Σχήμα 4.15 Απώλειες διάδοσης με βάση το μοντέλο COST231-Hata για μητροπολιτικά κέντρα, συχνότητα $f=1800\text{MHz}$ για ύψη δέκτη 1.5m και 10m

5. Αύξηση της ισχύος εκπομπής από το σταθμό βάσης, όταν πρόκειται για επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και συσκευής M2M που βρίσκεται σε περιοχή οριακής κάλυψης από δίκτυο LTE.

Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν στην παρούσα παράγραφο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο αυτοτελώς όσο και συνδυαστικά. Η περίπτωση της ταυτόχρονης επανάληψης αποστολής πακέτων σε συνδυασμό με την εναλλαγή συχνότητας περιγράφεται σχηματικά στο Σχ.4.16.



Σχήμα 4.16 Συνδυαστική χρήση επανάληψης αποστολής με εναλλαγή συχνότητας

Κεφάλαιο 5

Μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της κίνησης M2M με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος δικτύου

5.1 Εισαγωγή

Μια πλήρης μελέτη για την ενσωμάτωση των M2M επικοινωνιών στο υφιστάμενο κυψελωτό δίκτυο LTE πρέπει να περιλαμβάνει και στοιχεία για το κατά πόσο το υπάρχον δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει την παραγόμενη από M2M συσκευές τηλεπικοινωνιακή κίνηση, χωρίς να οδηγεί σε υποβιβασμό της ποιότητας των υπηρεσιών που παρέχει σε Human Type Communications HTC. Τα χαρακτηριστικά του υπάρχοντος δικτύου σχετίζονται με τη συνολική χωρητικότητά του και το μέγιστο αριθμό ταυτόχρονων συνδέσεων. Κανένα έως τώρα γνωστό θεωρητικό μοντέλο ή κατανομή δεν είναι σε θέση να προβλέψει τη συμπεριφορά ενός δικτύου M2M λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Ενδεικτικά, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί η ευρέως χρησιμοποιούμενη στις τηλεπικοινωνίες κατανομή Poisson, αφού δεν είναι γνωστή η μέση τιμή του ρυθμού άφιξης νέων συνδέσεων προς το σταθμό βάσης eNB από συσκευές M2M. Η χρονικά προγραμματισμένη κίνηση που χαρακτηρίζει μεγάλο τμήμα της επικοινωνίας του δικτύου LTE με τις M2M συσκευές σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα μιας ημέρας, ο στατικός χαρακτήρας της πλειοψηφίας των M2M συσκευών καθώς και ο χαμηλός όγκος δεδομένων που παράγουν οι M2M συσκευές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι απαιτείται διαφορετικού είδους μελέτη από αυτή που πραγματοποιείται για τα δίκτυα υπηρεσιών φωνής και δεδομένων. Για την ικανοποίηση των αναγκών ενός δικτύου που εξυπηρετεί τόσο επικοινωνίες HTC όσο και επικοινωνίες MTC, η μελέτη που ακολουθεί περιλαμβάνει δύο τμήματα. Αρχικά, πραγματοποιείται μια εκτίμηση για το κατά πόσο το υφιστάμενο δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει την παραγόμενη από M2M συσκευές κίνηση από πλευράς διαθέσιμης χωρητικότητας. Στη συνέχεια, μελετάται το κατά πόσο το δίκτυο LTE μπορεί να εξυπηρετήσει τον αριθμό ταυτόχρονων συνδέσεων που ανακύπτουν σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

5.2 Μελέτη ως προς το ρυθμό μετάδοσης και τη χωρητικότητα του δικτύου LTE

Το δίκτυο κορμού κινητών τηλεπικοινωνιών (backhaul network) τέταρτης γενιάς LTE διαθέτει συγκεκριμένο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ή, άλλως, χωρητικότητα του δικτύου. Η χωρητικότητα κατανέμεται από το σταθμό βάσης eNB στα τερματικά που εξυπηρετεί. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε ρυθμούς δικτύου κορμού που φθάνουν τα 10Gbps. Η πρώτη προτεραιότητα ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι η εξυπηρέτηση των Human Type Communications HTC. Οι HTC υπηρεσίες που υποστηρίζει ένα δίκτυο LTE είναι η ομιλία Voice over LTE VoLTE, η αποστολή δεδομένων για χρήση εφαρμογών - όπως η περιήγηση στο Διαδίκτυο, η παρακολούθηση εικόνας video, η βίντεο κλήση που απαιτεί μετάδοση εικόνας πραγματικού χρόνου τόσο στη downlink όσο και στην uplink ζεύξη - και, τέλος, η παροχή στον τελικό χρήστη υπηρεσιών από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο του LTE δικτύου ειδικά προσαρμοσμένων στον τελικό χρήστη - όπως οι υπηρεσίες SMS ή άλλες εφαρμογές που αναπτύσσονται αποκλειστικά από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

Για τη downlink ζεύξη το μέρος της χωρητικότητας που αποδίδεται για επικοινωνίες HTC του δικτύου LTE είναι ίση προς:

$$x(t) = \sum_{n \text{ connections}} \text{VoLTE}_n^d(t) + \text{Data}_n^d(t) + \text{Dedicated.Services}_n^d(t) \quad (5.1)$$

Αντίστοιχα για τη uplink ζεύξη, η χωρητικότητα που αποδίδεται για επικοινωνίες HTC του δικτύου LTE είναι ίση προς:

$$y(t) = \sum_{n \text{ connections}} \text{VoLTE}_n^u(t) + \text{Data}_n^u(t) + \text{Dedicated.Services}_n^u(t) \quad (5.2)$$

όπου οι δείκτες d, u αναφέρονται στην περίπτωση downlink ή uplink αντίστοιχα και n ο αριθμός των συνδέσεων προς HTC τερματικά.

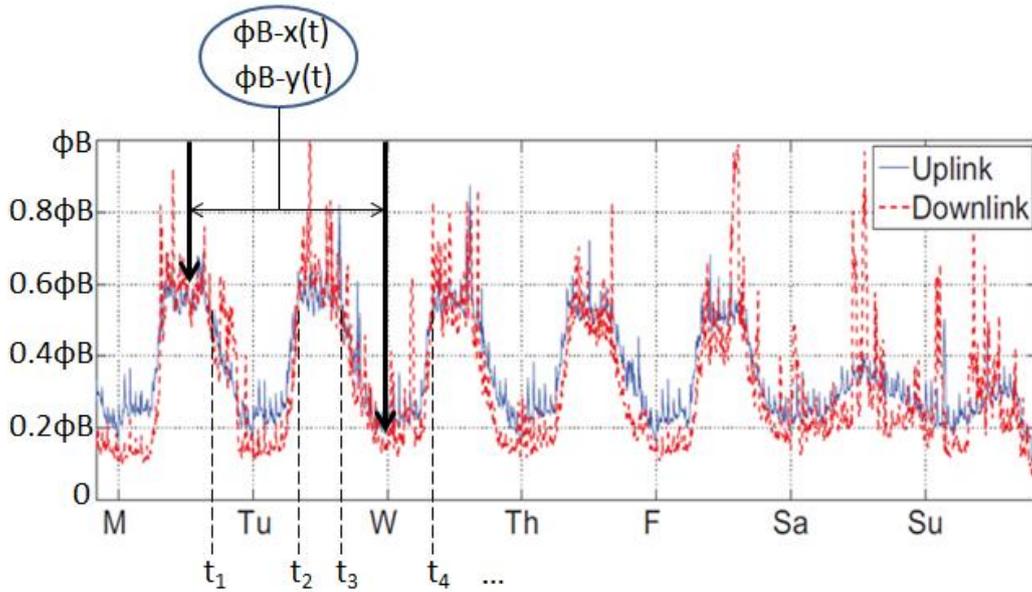
Έστω ότι ένα δίκτυο LTE έχει δημιουργηθεί με προδιαγραφές υποστήριξης μέγιστου ρυθμού μετάδοσης B. Στην πραγματικότητα, προς αποφυγή καταστάσεων υπερφόρτωσης, ποτέ δεν επιτρέπεται η λειτουργία στα όρια του δικτύου. Κατ'επέκταση, ο μέγιστος ρυθμός που μπορεί πραγματικά να υποστηρίξει ένας σταθμός βάσης eNB είναι ίσος με ϕB , όπου η παράμετρος ϕ λαμβάνεται στο διάστημα (0,1) και καθορίζεται από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο του δικτύου. Συνήθως, ο ρυθμός μετάδοσης αυτός είναι διαφορετικός για την κίνηση downlink

και uplink, οπότε ορίζονται τα μεγέθη B_d και B_u , αντίστοιχα, μέσω του καθορισμού των αντίστοιχων παραμέτρων ϕ_d και ϕ_u . Ως δεδομένο για τη χωρητικότητα του δικτύου LTE που παρέχεται σε HTC μπορεί να θεωρηθεί το διάγραμμα του Σχ.2.2, το οποίο απεικονίζεται κανονικοποιημένο ως προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Η μέγιστη τιμή, η οποία στο διάγραμμα αυτό είναι η τιμή 1, μπορεί να αντιστοιχιστεί στην πραγματική τιμή $\phi_d B_d$ και $\phi_u B_u$, αντίστοιχα για downlink και uplink κίνηση, όπως έχει γίνει στο Σχ.5.1. Στο Σχ.5.1, ως $x(t)$ ορίζεται η συνολική κίνηση downlink, και ως $y(t)$ η κίνηση uplink μεταξύ κινητών τηλεφώνων smartphone και ενός σταθμού βάσης eNB του κυψελωτού δικτύου LTE. Καθ'όλη τη διάρκεια μιας ημερολογιακής εβδομάδας, ο διαθέσιμος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να διατεθεί σε συσκευές M2M από κάποιο σταθμό βάσης eNB δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} M_d &= \phi_d B_d - x(t), \text{ για κίνηση downlink} \\ M_u &= \phi_u B_u - y(t), \text{ για κίνηση uplink} \end{aligned} \tag{5.3}$$

Κάθε χρονική στιγμή, υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι, που δεν χρησιμοποιούνται από χρήστες κινητών τηλεφώνων και μπορούν να διατεθούν στις τερματικές συσκευές M2M. Η επικοινωνία προς αποστολή δεδομένων μεταξύ των M2M συσκευών και του LTE δικτύου είναι επιθυμητό να διεξάγεται όταν το δίκτυο δεν χαρακτηρίζεται από υψηλό φόρτο HTC υπηρεσιών, ώστε να είναι αποδεκτή η ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνουν οι χρήστες κινητών τηλεφώνων στο δίκτυο LTE. Η κατάλληλη ομαδοποίηση των M2M εφαρμογών, η εισαγωγή προτεραιοτήτων με βάση το είδος των M2M εφαρμογών και η χρονικά προγραμματισμένη κίνηση μπορούν να οδηγήσουν στην ομαλή συνύπαρξη έξυπνων κινητών τηλεφώνων και συσκευών M2M στο ίδιο δίκτυο LTE. Ο κατάλληλος προγραμματισμός του σταθμού βάσης eNB και η μεταβίβαση της ευφυΐας του δικτύου από το τμήμα του δικτύου κορμού στους τοπικούς σταθμούς βάσης eNB μπορεί να διευκολύνει τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή του Internet of Things (IoT).

Κάθε χρονική στιγμή, η ολική κίνηση που παράγεται από τις συσκευές M2M πρέπει να μην υπερβαίνει τους συνολικούς πόρους που μπορεί να διαθέσει το δίκτυο, τόσο για την κίνηση downlink όσο και για την κίνηση uplink, όπως περιγράφεται από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:



Σχήμα 5.1 Ανάλυση ελεύθερων πόρων για M2M επικοινωνίες

$$\begin{aligned}
 x(t) + m_1(t) + m_2(t) + m_3(t) + \dots + m_\kappa(t) &\leq \phi_d B_d \Leftrightarrow \\
 x(t) + a_1(t) z_1(t) + a_2(t) z_2(t) + a_3(t) z_3(t) + \dots + a_\kappa(t) z_\kappa(t) &\leq \phi_d B_d \Leftrightarrow \\
 x(t) + \sum_{\kappa=0}^{\nu} \alpha_\kappa(t) z_\kappa(t) &\leq \phi_d B_d \Leftrightarrow \\
 \sum_{\kappa=0}^{\nu} \alpha_\kappa(t) z_\kappa(t) &\leq \phi_d B_d - x(t)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

όπου ν ο μέγιστος αριθμός κατηγοριών, $m_\kappa(t)$ η στιγμιαία downlink κίνηση δεδομένων από κάθε κατηγορία M2M, $a_\kappa(t)$ συντελεστής που ορίζεται από το σταθμό βάσης για τη downlink ζεύξη, $z_\kappa(t)$ ο μέγιστος προς μετάδοση όγκος κάθε κατηγορίας M2M συσκευών στη downlink ζεύξη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και

$$\begin{aligned}
 y(t) + n_1(t) + n_2(t) + n_3(t) + \dots + n_\kappa(t) &\leq \phi_u B_u \Leftrightarrow \\
 y(t) + b_1(t) w_1(t) + b_2(t) w_2(t) + b_3(t) w_3(t) + \dots + b_\kappa(t) w_\kappa(t) &\leq \phi_u B_u \Leftrightarrow \\
 y(t) + \sum_{\kappa=0}^{\nu} b_\kappa(t) w_\kappa(t) &\leq \phi_u B_u \Leftrightarrow \\
 \sum_{\kappa=0}^{\nu} b_\kappa(t) w_\kappa(t) &\leq \phi_u B_u - y(t)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

όπου ν ο μέγιστος αριθμός κατηγοριών, $n_\kappa(t)$ η στιγμιαία uplink κίνηση δεδομένων από κάθε κατηγορία M2M, $b_\kappa(t)$ συντελεστής που ορίζεται από το σταθμό βάσης για την uplink ζεύξη, $w_\kappa(t)$ ο μέγιστος προς μετάδοση όγκος κάθε κατηγορίας M2M συσκευών στην uplink ζεύξη σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα

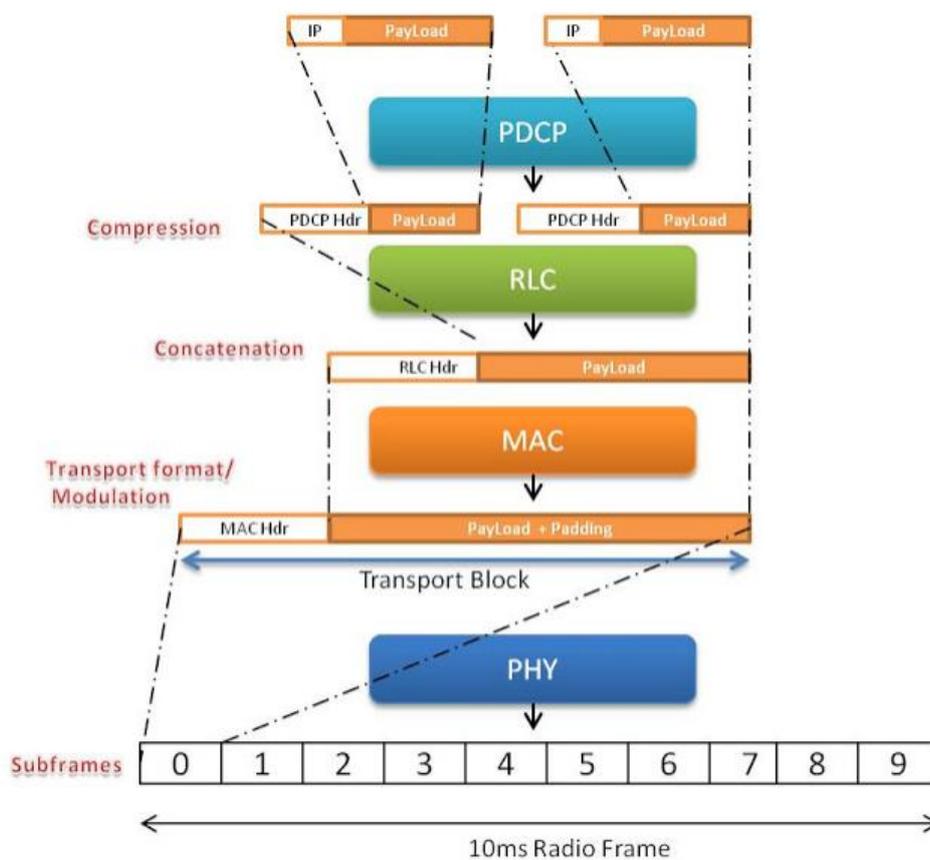
Ο διαχωρισμός των συσκευών M2M σε συγκεκριμένες κατηγορίες, που έχει πραγματοποιηθεί στο εδάφιο 2.2 με κριτήριο τα κοινά χαρακτηριστικά τους, μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη γνώση και ανάλυση της κίνησης που εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης eNB. Στη συνέχεια και με βάση την ανάλυση που πραγματοποιεί, ο σταθμός βάσης eNB αναλαμβάνει να εκτελέσει τις κατάλληλες ενέργειες ώστε να εξυπηρετούνται τόσο επικοινωνίες HTC όσο και επικοινωνίες M2M. Ο σταθμός βάσης eNB πρέπει να έχει ως πρώτη προτεραιότητα την εξυπηρέτηση των χρηστών κινητών τερματικών σύμφωνα με τις προδιαγραφές που του έχουν οριστεί για τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας QoS. Τους πόρους που απομένουν, ο eNB τους κατανέμει σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψης που διαθέτει με στόχο την ικανοποίηση όλων των κατηγοριών M2M.

Κατά τη διάρκεια μιας ημερολογιακής ημέρας, υπάρχουν χρονικά διαστήματα, κατά κύριο λόγο νυκτερινά, για παράδειγμα τα (t_1, t_2) , (t_3, t_4) κλπ του Σχ.5.1, κατά τη διάρκεια των οποίων το δίκτυο LTE χρησιμοποιεί λιγότερους πόρους (περίπου 0.2ΦB) για την εξυπηρέτηση των χρηστών HTC επικοινωνιών. Το ίδιο συμβαίνει και κατά τη διάρκεια του Σαββάτου και της Κυριακής, οπότε η κίνηση εντός του δικτύου LTE είναι πολύ χαμηλή συγκριτικά με τις υπόλοιπες ημέρες. Οι περισσότερες συσκευές M2M δεν απαιτούν μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου, οπότε μπορούν να επικοινωνούν με το δίκτυο LTE προς αποστολή δεδομένων κατά τη διάρκεια χρονικά προγραμματισμένων διαστημάτων, πρακτικά κατά τα χρονικά διαστήματα όπου υπάρχει χαμηλή αξιοποίηση του δικτύου LTE από χρήστες κινητών τηλεφώνων. Κατά συνέπεια, η γνώση του μοντέλου κίνησης των κινητών smartphone μπορεί να οδηγήσει στη διατύπωση κατάλληλων μοντέλων περιγραφής της κίνησης που μπορεί να παρέχει το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο τέταρτης γενιάς LTE στις συσκευές M2M.

5.2.1 Αντιστοίχιση ρυθμού μετάδοσης με φασματικούς πόρους

Η επικοινωνία στο LTE πραγματοποιείται σε πλαίσια (frames) διάρκειας 10ms. Κάθε frame περιλαμβάνει 10 υποπλαίσια (subframes). Ένα subframe χρονικά μπορεί να χωριστεί σε δύο ίσης διάρκειας χρονοσχισμές (slots) των 0.5ms, όπου slot είναι η ελάχιστη χρονική διάρκεια στο δίκτυο LTE που μπορεί να διατεθεί αποκλειστικά σε ένα τερματικό. Συνολικά σε ένα frame περιέχονται 10 subframes ή, άλλως, 20 slots. Κάθε subframe διαιρείται σε Resource Blocks (RBs), ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται. Κατά κανόνα, οι επικοινωνίες M2M απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Εξαιρέση αποτελεί η M2M Gateway η οποία, όταν χρησιμοποιείται, απαιτεί υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης καθώς μεταδίδει συγκεντρωτικά την πληροφορία όλων των M2M συσκευών τις οποίες ελέγχει. Το πρωτόκολλο LTE-M αναμένεται να χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 1.4MHz.

Με βάση τη δομή του LTE, τα 1.4MHz αντιστοιχούν σε 6 Resource Blocks των 180KHz, όπως φαίνεται και από Σχ.5.3. Το εύρος ζώνης που απομένει, αφαιρουμένων των 6RBs από το συνολικό εύρος ζώνης των 1.4 MHz, χρησιμοποιείται για επικεφαλίδες και χρήση μηχανισμών προστασίας των δεδομένων. Το ποσοστό, δηλαδή, που χρησιμοποιείται για επικεφαλίδες και χρήση μηχανισμών προστασίας των δεδομένων ανέρχεται σε 23%. Σε περιπτώσεις όπου το εύρος ζώνης της ζεύξης LTE είναι διάφορο του 1.4MHz, δηλαδή λαμβάνει μια από τις διακριτές τιμές 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz το ποσοστό αυτό είναι 10%.

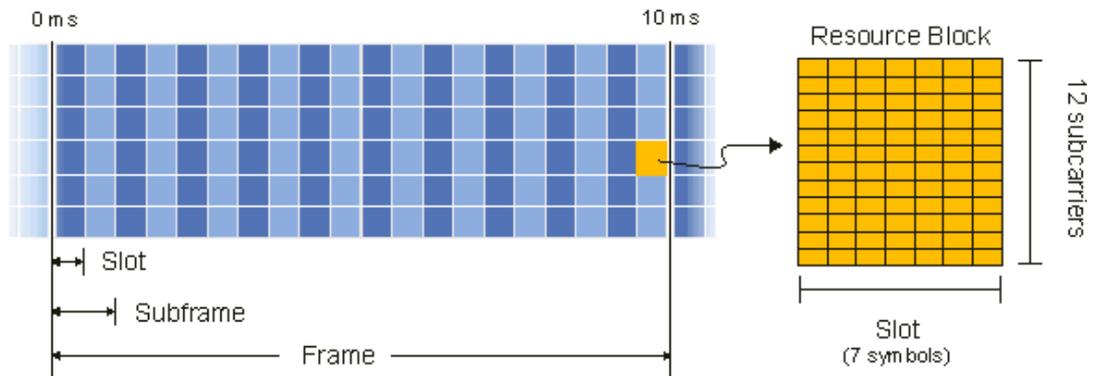


Σχήμα 5.2 Στρώματα LTE

| Channel bandwidth [MHz] | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|--|-----|----|----|----|----|-----|
| Number of resource blocks (N_{RB}) | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |

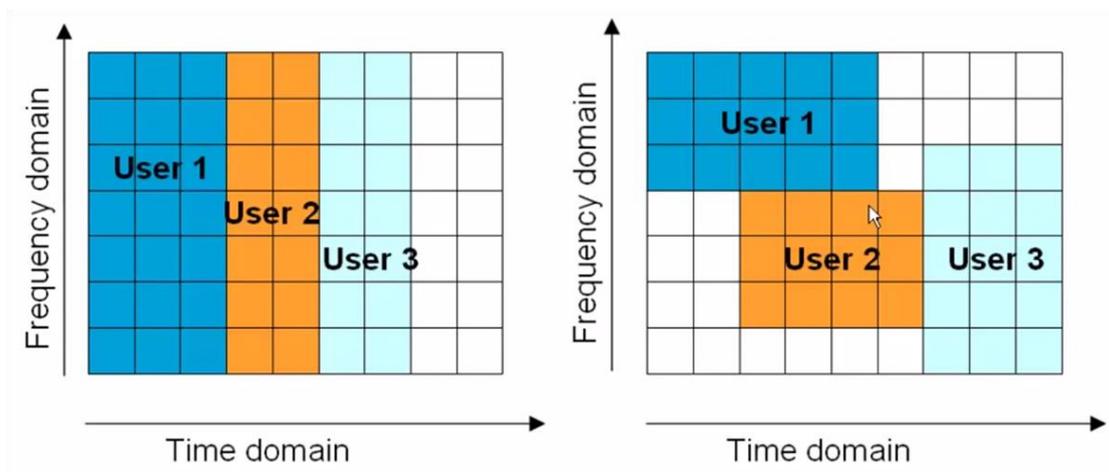
Σχήμα 5.3 Resource Blocks ανάλογα με το εύρος ζώνης

LTE FDD Frame
1.4 MHz, Normal CP

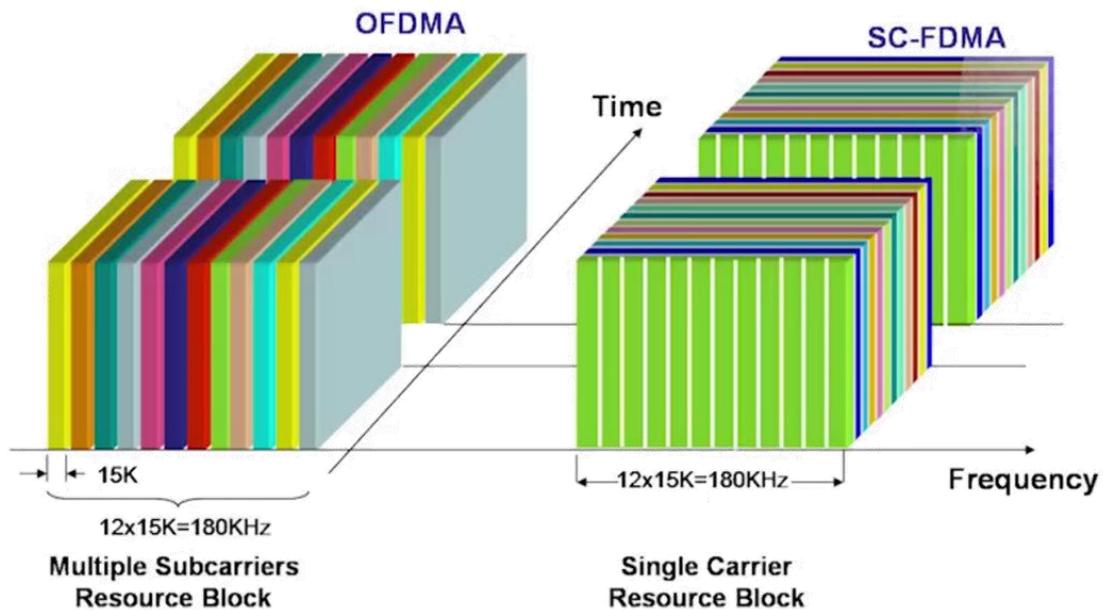


Σχήμα 5.4 Απεικόνιση Resource block, Slot, Subframe, Frame στο LTE

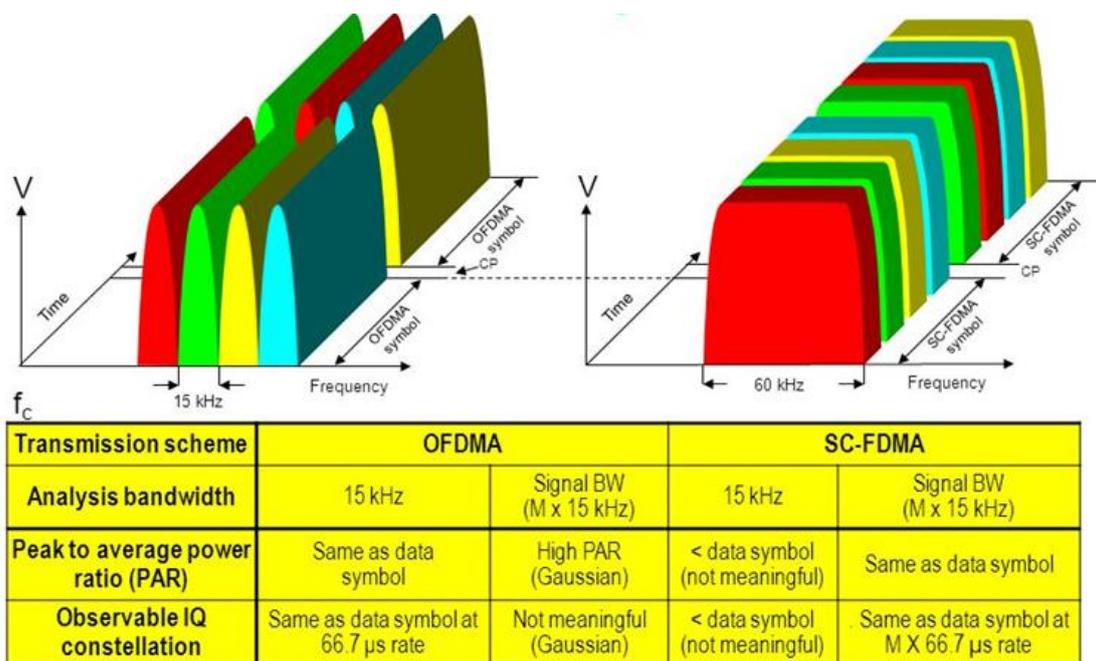
Οι περισσότερες M2M συσκευές χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο Single Carrier FDMA(SC-FDMA) για την uplink ζεύξη. Για HTC υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, χρησιμοποιείται συνήθως σχήμα πρόσβασης OFDMA, που αποτελεί εξέλιξη του FDMA όπως απεικονίζεται και στο Σχ.5.5. Το σχήμα πρόσβασης FDMA διαθέτει κάθε slot αποκλειστικά σε ένα χρήστη, για όλο το εύρος ζώνης της συχνότητας που διαθέτει. Αντίθετα με το FDMA, το σχήμα πρόσβασης OFDMA δεν υπόκειται σε περιορισμούς, χρονικούς ή φασματικούς. Ο μοναδικός περιορισμός που διαθέτει το σχήμα πρόσβασης OFDMA είναι ότι ο ελάχιστος αριθμός slot που μπορεί να αποδοθεί σε ένα χρήστη είναι 1slot. Τέλος, στα Σχ.5.6 και Σχ.5.7, φαίνεται η σύγκριση του OFDMA και του Single Carrier-FDMA (SC-FDMA). Το SC-FDMA αποτελεί εξέλιξη του σχήματος πρόσβασης FDMA.



Σχήμα 5.5 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης FDMA(αριστερά) και OFDMA(δεξιά)



Σχήμα 5.6 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης OFDMA(αριστερά)και SC-FDMA(δεξιά)



Σχήμα 5.7 Σύγκριση σχημάτων πρόσβασης OFDMA (αριστερά) και SC-FDMA (δεξιά)

Σε περίπτωση όπου δεν χρησιμοποιείται θύρα M2M Gateway και με βάση τα χαρακτηριστικά των M2M επικοινωνιών, από τη βιβλιογραφία προτείνεται η χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz. Κύριος παράγοντας της επιλογής του χαμηλού εύρους ζώνης αποτελεί ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης που απαιτείται στην πλειοψηφία των MTC επικοινωνιών. Επίσης, το χαμηλό εύρος ζώνης 1.4MHz είναι ευκολότερο να βρεθεί στο συνολικό φάσμα συχνοτήτων. Στη μετάδοση μέσω LTE, στη διάρκεια ενός slot,

δηλαδή μισού subframe ή, άλλως, 0.5ms, η χρονοσχισημή αποτελεί την ελάχιστη χρονική διάρκεια που μπορεί να διατεθεί αποκλειστικά σε ένα χρήστη. Κάθε slot περιλαμβάνει 7 σύμβολα μετάδοσης με χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος CP, ενώ με χρήση επεκταμένου CP τα σύμβολα μετάδοσης είναι 6. Στην παρούσα μελέτη, θεωρείται ότι δεν υπάρχει χρήση επεκταμένου κυκλικού προθέματος CP. Κάθε slot διαιρείται σε Resource Elements (REs). Ανεξάρτητα από το εύρος ζώνης που διατίθεται από το σταθμό βάσης eNB, το RE ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$RE = \text{subcarriers} \cdot \text{symbols} = 12 \cdot 7 = 84 \quad (5.6)$$

Τα προς μετάδοση bit ανά RB δίνονται από την σχέση:

$$\text{bits/RB} = \text{REs/RB} \cdot \text{bits/RE} = 84 \cdot \text{bit/RE} \quad (5.7)$$

Ο λόγος bits/RE εξαρτάται από το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση χρήσης 16QAM, τα προς μετάδοση bit ανά RB προκύπτουν:

$$\text{bits/RB} = \text{REs/RB} \cdot \text{bits/RE} = 84 \cdot \text{bits/RE} = 84 \cdot 4 = 336\text{bits} \quad (5.8)$$

Ο αριθμός των συνολικών RBs στη διάρκεια ενός frame για εύρος ζώνης 1.4MHz είναι ίσος προς:

$$\text{TotalRBs} = N_{RB} \cdot \text{slots} = 6 \cdot 20 = 120 \quad (5.9)$$

Επομένως, ο ρυθμός μετάδοσης R στο LTE δίνεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$R = \text{TotalRBs} \cdot (\text{bits/RB})/\text{time} \quad (5.10)$$

Αντίστοιχα με το σχήμα διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, οι ρυθμοί μετάδοσης για χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz αναγράφονται στον Πιν.5.1.

Σε περίπτωση σύνδεσης θύρας M2M Gateway σε δίκτυο LTE, απαιτούνται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, επομένως και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Το υπάρχον δίκτυο LTE, χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο ζεύξεις εύρους ζώνης 5MHz και 10MHz. Με χρήση της ίδιας ακριβώς μεθόδου και των ίδιων σχέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση εύρους ζώνης 1.4MHz, οι ρυθμοί μετάδοσης που αντιστοιχούν σε εύρη ζώνης 5MHz και 10MHz δίδονται στον Πιν.5.2.

| Modulation | bits per RE | Mbps για 1.4MHz |
|------------|-------------|-----------------|
| BPSK | 1 | 1,008 |
| QPSK | 2 | 2,016 |
| 8PSK | 3 | 3,024 |
| 16QAM | 4 | 4,032 |
| 32QAM | 5 | 5,04 |
| 64QAM | 6 | 6,048 |
| 128QAM | 7 | 7,056 |
| 256QAM | 8 | 8,064 |

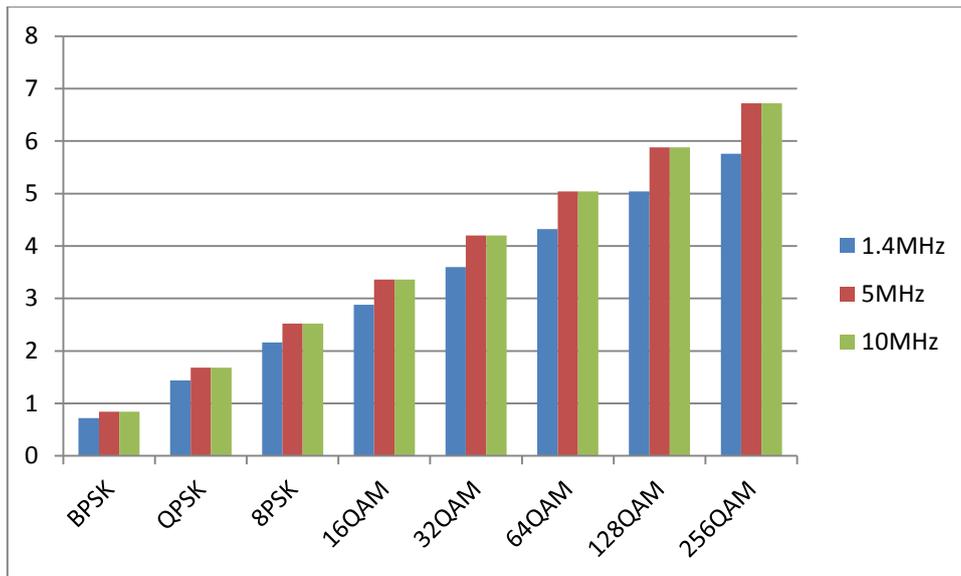
Πίνακας 5.1 Ρυθμοί μετάδοσης σε αντιστοιχία με το σχήμα διαμόρφωσης για χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz

| Modulation | Mbps για 5MHz | Mbps για 10MHz |
|------------|---------------|----------------|
| BPSK | 4.2 | 8.4 |
| QPSK | 8.4 | 16.8 |
| 8PSK | 12.6 | 25.2 |
| 16QAM | 16.8 | 33.6 |
| 32QAM | 21 | 42 |
| 64QAM | 25.2 | 50.4 |
| 128QAM | 29.4 | 58.8 |
| 256QAM | 33.6 | 67.2 |

Πίνακας 5.2 Ρυθμοί μετάδοσης σε αντιστοιχία με το σχήμα διαμόρφωση για εύρη ζώνης 5MHz και 10MHz

Η φασματική απόδοση του διαύλου σε bit/Hz για εύρος ζώνης 1.4MHz, 5MHz και 10MHz απεικονίζεται στο Σχ.5.7.

Η χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη φασματική απόδοση σε σχέση με την περίπτωση χρήσης εύρους ζώνης 5MHz ή 10MHz. Για το λόγο αυτό, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι αποφεύγουν τη χρήση εύρους ζώνης 1.4MHz καθώς η ενοικίαση φασματικών πόρων αποτελεί μεγάλη δαπάνη.



Σχήμα 5.8 Φασματική απόδοση bit/Hz σε αντιστοιχία με το εύρος ζώνης και τη διαμόρφωση

Τέλος, όπως φαίνεται και από το Σχ.5.2 όπου απεικονίζονται τα στρώματα του LTE, για την υλοποίηση του LTE δικτύου χρησιμοποιείται πρωτόκολλο IP. Η χρήση θύρας M2M Gateway προσφέρει τη δυνατότητα ενοποίησης των πακέτων για την αποστολή των δεδομένων από τις M2M συσκευές στο Διαδίκτυο και, στη συνέχεια, στο M2M Server που πρέπει να λάβει τα δεδομένα. Σε σύγκριση με την αποστολή πλήθους πακέτων μικρού μεγέθους, η αποστολή ενός πακέτου φυσιολογικού μεγέθους, δηλαδή παρόμοιου μεγέθους με τα πακέτα που μεταδίδονται για HTC υπηρεσίες, οδηγεί σε καλύτερη φασματική αξιοποίηση του διαύλου, αφού η πληροφορία που μεταδίδεται μέσω του αέρα είναι σε μεγαλύτερο βαθμό πραγματική, και δεν περιλαμβάνει μεγάλο ποσοστό από επικεφαλίδες IP.

5.3 Μελέτη μέγιστου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων προς τον ίδιο σταθμό βάσης

Η μελέτη του μέγιστου αριθμού ταυτόχρονων συνδέσεων περιλαμβάνει αρχικά τον υπολογισμό των χρηστών και των M2M συσκευών που εξυπηρετεί κάθε σταθμό βάσης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση για την υποστήριξη του αριθμού αυτού από δίκτυα LTE με χρήση και χωρίς χρήση θύρας M2M Gateway.

5.3.1 Υπολογισμός του πλήθους χρηστών και M2M συσκευών υπό τον ίδιο σταθμό βάσης

Ένας σταθμός βάσης μπορεί να υποστηρίξει πεπερασμένο πλήθος τερματικών συσκευών, το οποίο εξαρτάται από το πλήθος των τομέων που διαθέτει κάθε κεραία, από τον αριθμό κυψελών ανά τομέα και από το αν γίνεται χρήση της τεχνικής συνάθροισης φάσματος. Ο σταθμός βάσης, όμως, καλείται να καλύψει συγκεκριμένο πλήθος τερματικών συσκευών, είτε πρόκειται για συσκευές M2M είτε για κινητά τερματικά που εξυπηρετούν HTC. Το πλήθος των συσκευών που καλείται να καλύψει ένας σταθμός βάσης εξαρτάται από: την ακτίνα κάλυψης, το είδος της περιοχής κάλυψης, το μέσο αριθμό κατοίκων ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, και το μερίδιο αγοράς που καταλαμβάνει ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος στον οποίο ανήκει ο σταθμός βάσης.

Ο πληθυσμός που εξυπηρετεί ο σταθμός βάσης δίνεται από τη σχέση:

$$S = Pe(r,n) \cdot \mu \quad (5.11)$$

όπου $Pe(r,n)$ ο αριθμός των κατοίκων ως συνάρτηση της ακτίνας κάλυψης και μ το ποσοστό εισχώρησης του τηλεπικοινωνιακού παρόχου στην αγορά

Ο στατικός χαρακτήρας του μεγαλύτερου ποσοστού των M2M συσκευών καθώς και το ότι οι περισσότερες M2M συσκευές είναι εγκατεστημένες σε κατοικίες οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν ενδιαφέρει το πού βρίσκεται σε πραγματικό χρόνο κάποιος χρήστης αλλά στο πού βρίσκεται η κατοικία του, καθώς εκεί λειτουργούν οι M2M συσκευές που κατέχει.

Ο υπολογισμός του πληθυσμού μιας περιοχής $Pe(r,n)$ που καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης ως συνάρτηση της απόστασης από τον σταθμό βάσης και του αριθμού των τομέων του σταθμού βάσης δίνεται από τη σχέση:

$$Pe(r,n) = \begin{cases} 0.45\pi r^2 \lambda, & \text{χρήση τριών τομέων } (n = 3) \\ \pi r^2 \lambda, & \text{χρήση περισσότερων των τριών τομέων } (n > 3) \end{cases} \quad (5.12)$$

όπου r η ακτίνα κάλυψης του σταθμού βάσης και λ ο πληθυσμός ανά τετραγωνικό μέτρο (ενδεικτικές τιμές πληθυσμού περιέχονται στον Πιν.5.3)

Όπως προκύπτει και από την (5.12) και με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του Κεφ.4, το εμβαδόν της περιοχής που καλύπτει ένας σταθμός

βάσης μπορεί να προσεγγιστεί από το άθροισμα τριών κυκλικών τόξων όταν υπάρχουν τρεις τομείς, ενώ για περισσότερους από τρεις τομείς, μπορεί να θεωρηθεί εμβαδόν κύκλου.

| Αστική περιοχή | Προαστιακή περιοχή | Αγροτική περιοχή |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| 1000 per/km ² | 300per/km ² | 50per/km ² |

Πίνακας 5.3. Ενδεικτικές τιμές πυκνότητας κατοίκων ανά τύπο περιοχής

Σε κάθε κάτοικο αντιστοιχούν $z(\mu)$ συσκευές M2M, όπου μ ο τύπος περιοχής όπου κατοικεί κάθε κάτοικος. Η χρήση M2M διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και, κατά κύριο λόγο, οφείλεται στο είδος της περιοχής ανάπτυξης του δικτύου M2M (αστική, προαστιακή, αγροτική). Με βάση τις προβλέψεις του Κεφ.2, σε κάθε άτομο αντιστοιχούν περίπου από 10 μέχρι 20 συσκευές M2M.

5.3.2 Δίκτυο χωρίς χρήση θύρας M2M Gateway

Αγνοώντας προς το παρόν την περίπτωση χρήσης θυρών M2M Gateway, όλες οι M2M συσκευές επικοινωνούν απευθείας με τον σταθμό βάσης. Οι M2M συσκευές που καλείται να εξυπηρετεί ο σταθμός βάσης είναι $S \cdot z(\mu)$. Ο αριθμός των συνολικών συσκευών T που πρέπει να εξυπηρετεί ο σταθμός βάσης προκύπτει από την (5.11) ενώ ο αριθμός των συνδέσεων που μπορούν να διατεθούν για M2M συσκευές από την (5.12).

$$T = S \cdot z(\mu) + C(t) \quad (5.13)$$

$$T = S \cdot z(\mu) + C(t) \leq \text{Threshold δικτύου} \Leftrightarrow \quad (5.14)$$

$$S \cdot z(\mu) \leq \text{Threshold δικτύου} - C(t)$$

όπου $C(t)$ ο αριθμός των συνδέσεων κινητών τηλεφώνων για κάθε χρονική στιγμή

Με βάση τις προβλέψεις πλήθους εταιριών για την εξέλιξη των M2M υπηρεσιών και το ότι σε κάθε άτομο αντιστοιχούν από 10 έως 20 συσκευές M2M ο αριθμός των M2M συσκευών αναμένεται να είναι πολύ μεγάλος, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να υποστηριχτεί από ένα δίκτυο το οποίο, στην παρούσα κατάσταση, υποστηρίζει μέχρι 256 ταυτόχρονες συνδέσεις. Επιπλέον, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η πλειοψηφία των συσκευών M2M θα προσπαθεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο LTE ταυτόχρονα με τα κινητά τηλέφωνα, με αποτέλεσμα να προκληθεί

συμφόρηση στο δίκτυο. Η υποστήριξη M2M συσκευών μπορεί να γίνει απευθείας από το δίκτυο LTE μόνο στην περίπτωση χρονοπρογραμματισμένης επικοινωνίας, όπου ο σταθμός βάσης eNB εκκινεί την επικοινωνία σε χρονικά διαστήματα κατά τα οποία γνωρίζει ότι ο αριθμός των συνδέσεων που αφορούν HTC είναι χαμηλός. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται στο εδάφιο 5.4.

5.3.3 LTE δίκτυο όπου χρησιμοποιούνται θύρες M2M Gateway

Η χρήση θυρών M2M Gateway μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή συμφόρησης στο δίκτυο. Μέχρι την εισαγωγή του LTE-M, ο μέγιστος αριθμός συνδέσεων ανά σταθμό βάσης θα αποτελεί στενωπό του δικτύου. Μία θύρα M2M Gateway, μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα μεγάλο πλήθος M2M συσκευών. Ενδεικτικό του αριθμού των συνδέσεων είναι ότι ένας οικιακός δρομολογητής (router), που θα μπορούσε να λειτουργήσει και ως M2M-Gateway, μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερες από 100 συσκευές.

Μέσω της χρήσης θυρών M2M Gateway, το συνολικό πλήθος συνδέσεων που θα απαιτείται να εξυπηρετήσει ένας σταθμός βάσης δίνεται από τη σχέση:

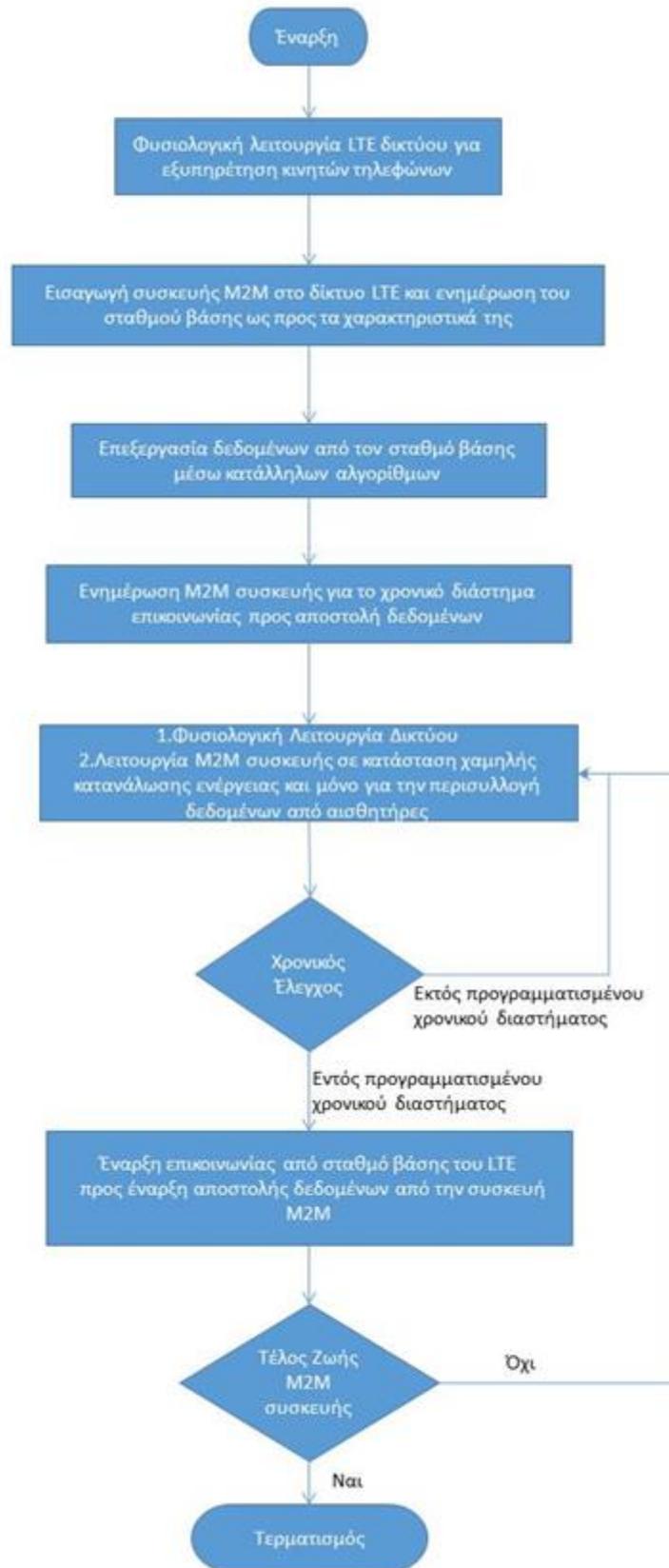
$$T = S \cdot z(\mu) / N + C(t) \quad (5.15)$$

όπου $T, S, z(\mu), C(t)$ έχουν οριστεί στο εδάφιο 5.3.1 και N ο αριθμός συνδέσεων που μπορεί να εξυπηρετήσει μια θύρα M2M Gateway

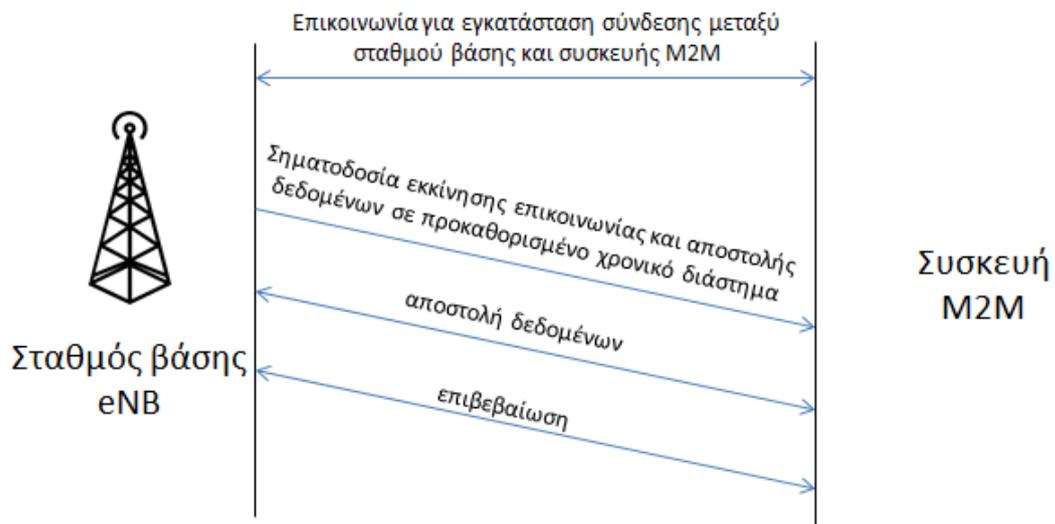
Ο αριθμός των συνδέσεων που καλείται να εξυπηρετήσει ένας σταθμός βάσης είναι σαφώς μικρότερος όταν χρησιμοποιούνται θύρες M2M Gateway, οπότε διευκολύνεται η λειτουργία του δικτύου και μειώνεται ο κίνδυνος συμφόρησης που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας υπηρεσίας που απολαμβάνουν οι χρήστες κινητών τηλεφώνων.

5.4 Υποστήριξη από το υπάρχον LTE δίκτυο M2M συσκευών με χρονοπρογραμματισμένη κίνηση

Η πρόταση της παρούσας εργασίας για υποστήριξη M2M συσκευών με χρονοπρογραμματισμένη κίνηση από το δίκτυο LTE, μπορεί να υλοποιηθεί υπό την προϋπόθεση ότι θα αναπτυχθεί κατάλληλος αλγόριθμος που προβλέπει τη συμπεριφορά του δικτύου επί κάποιο μελλοντικό χρονικό διάστημα. Η κατάλληλη επεξεργασία δεδομένων προϋποθέτει την εισαγωγή ευφυΐας στο σταθμό βάσης eNB, κάτι που ήδη εφαρμόζεται αλλά σε μικρό βαθμό. Στο Σχ.5.9, παρουσιάζεται η πρόταση επικοινωνίας του σταθμού βάσης eNB και του M2M τερματικού υπό τη μορφή διαγράμματος χρονικής εξέλιξης, ενώ, στο Σχ.5.8, υπό τη μορφή διαγράμματος ροής. Συγκεκριμένα, όταν μια συσκευή M2M εισέρχεται στην περιοχή γεωγραφικής κάλυψης ενός σταθμού βάσης eNB, επικοινωνεί ο σταθμός βάσης eNB με τη συσκευή M2M, ώστε να πληροφορηθεί ο σταθμός βάσης eNB τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά της M2M συσκευής. Εφόσον η συσκευή M2M ανήκει σε κατηγορία που υποστηρίζεται από χρονικά προγραμματισμένη κίνηση, ο σταθμός βάσης eNB επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει και καθορίζει το χρονικό διάστημα της ημέρας κατά το οποίο θα πραγματοποιηθεί η αποστολή δεδομένων από τη συσκευή M2M στο σταθμό βάσης eNB και, στη συνέχεια, ο τελευταίος να τα προωθήσει στον αντίστοιχο M2M Server. Η συσκευή M2M παραμένει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ενόσω δεν βρίσκεται εντός του προγραμματισμένου χρονικού διαστήματος. Η μόνη λειτουργία που επιτελεί είναι η συλλογή και αποθήκευση δεδομένων. Κατά το διάστημα όπου έχει προκαθοριστεί για την επικοινωνία, ο σταθμός βάσης εκκινεί τη σύνδεση με τη συσκευή M2M ώστε να του μεταδώσει τα δεδομένα που έχει αποθηκεύσει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται μέχρι το τέλος της ζωής της συσκευής M2M, δηλαδή είτε μέχρι να εξαντληθεί η μπαταρία που χρησιμοποιεί είτε να μην υπάρχει πρακτικός λόγος να πραγματοποιείται πλέον η συγκεκριμένη λειτουργία.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα Ροής για την εξυπηρέτηση M2M συσκευών από το σταθμό βάσης eNB που λειτουργούν με χρονοπρογραμματισμό



Σχήμα 5.10 Χρονική εξέλιξη πρότασης επικοινωνίας M2M συσκευών με δίκτυο LTE

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Η εξέλιξη των Machine to Machine M2M επικοινωνιών καθώς και η εισαγωγή του Internet of Things IoT στην καθημερινότητα οδηγούν στην ανάγκη χρήσης του υπάρχοντος Long Term Evolution LTE δικτύου προς εξυπηρέτηση των M2M συσκευών. Το δίκτυο LTE πραγματοποιεί βέλτιστο συνδυασμό γεωγραφικής κάλυψης και χωρητικότητας. Ταυτόχρονα, το δίκτυο LTE αποτελεί τεχνολογία αιχμής.

Το δίκτυο LTE κρίνεται ως κατάλληλο για τη χρήση των πόρων που διαθέτει, τόσο γεωγραφικών όσο και φασματικών, με κριτήριο την ταυτόχρονη υποστήριξη επικοινωνιών Human Type Communications HTC και M2M επικοινωνιών, χωρίς να οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας QoS που παρέχεται στους χρήστες των HTC. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- I. Πύκνωση του δικτύου LTE ώστε κάθε σταθμός βάσης evolved NodeB eNB του LTE δικτύου να υποστηρίζει ικανό αριθμό τερματικών συσκευών.
- II. Αύξηση της γεωγραφικής κάλυψης του δικτύου LTE με τις μεθόδους που αναφέρονται στο εδάφιο 4.4.
- III. Χρήση θυρών M2M Gateway M2M-G, με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση του δικτύου LTE τόσο γεωγραφικά όσο και φασματικά.
- IV. Όταν δεν χρησιμοποιούνται θύρες M2M-G, πρέπει να γίνεται χρήση χρονοπρογραμματισμένης κίνησης με τη μέθοδο που παρουσιάζεται στο εδάφιο 5.4.
- V. Εισαγωγή αλγορίθμων πρόβλεψης στο σταθμό βάσης eNB.
- VI. Σταδιακή εφαρμογή του LTE-M, ώστε να καθιερωθεί κοινό πρότυπο για όλες τις M2M επικοινωνίες.

Επεκτάσεις της παρούσας εργασίας που μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων με στόχο την αξιοποίηση του υπάρχοντος LTE δικτύου για M2M επικοινωνίες είναι:

- I. Διατύπωση ευφύων αλγορίθμων για σταθμούς βάσης eNB.
- II. Εφαρμογή σεναρίων προσομοίωσης στη θεωρητική μελέτη της χωρητικότητας και του ρυθμού μετάδοσης μέσω του ανοικτού λογισμικού Omnet++.

- III. Εφαρμογή σεναρίων προσομοίωσης της γεωγραφικής κάλυψης που θα χρησιμοποιούν μοντέλα εκτεταμένης γεωγραφικής κάλυψης (όπως αναφέρεται στο Κεφ. 4).
- IV. Επαλήθευση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων γεωγραφικής κάλυψης.

Κεφάλαιο 7

Βιβλιογραφία

1. Π. Κωττής, Π. Αράπογλου. "Ασύρματες Επικοινωνίες." Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα (2011)
2. Κανάτας Αθανάσιος, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος. "Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών." Εκδόσεις Παπασωτηρίου (2008)
3. Rumney, Moray, ed. *LTE and the evolution to 4G wireless: Design and measurement challenges*. John Wiley & Sons, 2013
4. De la Roche, Guillaume, Andrés Alayón-Glazunov, and Ben Allen. *LTE-advanced and next generation wireless networks: channel modelling and propagation*. John Wiley & Sons, 2012
5. Wu, Geng, et al. "M2M: From mobile to embedded internet." *IEEE Communications Magazine* 49.4 (2011): 36-43
6. Zhang, Yan, et al. "Home M2M networks: architectures, standards, and QoS improvement." *IEEE Communications Magazine* 49.4 (2011): 44-52
7. Zheng, Kan, et al. "Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications." *IEEE Communications Magazine* 50.7 (2012): 184-192
8. Chen, Min, et al. "A survey of recent developments in home M2M networks." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16.1 (2014): 98-114
9. Starsinic, Michael. "System architecture challenges in the home M2M network." *Applications and Technology Conference (LISAT), 2010 Long Island Systems*. IEEE, 2010
10. Gotsis Antonis G., Athanasios S. Lioumpas, and Angeliki Alexiou. "M2M scheduling over LTE: Challenges and new perspectives." *IEEE Vehicular Technology Magazine* 7.3 (2012): 34-39
11. Lee, Ki-Dong, Sang Kim, and Byung Yi. "Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks." *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 2011
12. Doppler, Klaus, et al. "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks." *IEEE Communications Magazine* 47.12 (2009): 42-49

13. Laya, Andres, Luis Alonso, and Jesus Alonso-Zarate. "Is the random access channel of LTE and LTE-A suitable for M2M communications? A survey of alternatives." *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16.1 (2014): 4-16
14. Yeh, Shu-Ping, et al. "Capacity and coverage enhancement in heterogeneous networks." *IEEE Wireless Communications* 18.3 (2011): 32-38
15. Ratasuk, Rapeepat, Jun Tan, and Amitava Ghosh. "Coverage and capacity analysis for machine type communications in LTE." *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2012 IEEE 75th*. IEEE, 2012
16. Ratasuk, Rapeepat, Nitin Mangalvedhe, and Amitava Ghosh. "Overview of LTE enhancements for cellular IoT." *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on*. IEEE, 2015
17. Shafiq, Muhammad Zubair, et al. "A first look at cellular machine-to-machine traffic: large scale measurement and characterization." *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review* 40.1 (2012): 65-76
18. Liu, Rongduo, et al. "M2M-oriented QoS categorization in cellular network." *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011 7th International Conference on*. IEEE, 2011
19. Singh, Shubhranshu, and Kuei-Li Huang. "A robust M2M gateway for effective integration of capillary and 3GPP networks." *2011 Fifth IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks (ANTS)*. IEEE, 2011
20. Ratasuk, Rapeepat, et al. "Narrowband LTE-M system for M2M communication." *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*. IEEE, 2014
21. Chen¹², Min, Jiafu Wan, and Fang Li. "Machine-to-machine communications: architectures, standards and applications." (2012)
22. D. Thomas, J. Irvine, "Connection and resource allocation of IoT sensors to cellular technology-LTE", PRIME 2015, Glasgow, June 29 2015-July 2 2015