



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλγόριθμοι ομαδοποιημένης πρόσβασης στο κανάλι τυχαίας πρόσβασης σε περιβάλλοντα επικοινωνίας μηχανών

Μάριος Α. Γαβριήλ

Επιβλέποντες: **Αθανασία Αλωνιστιώτη, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**
Κωνσταντίνος Χατζηκοκολάκης, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ

Σεπτέμβριος 2015

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλγόριθμοι ομαδοποιημένης πρόσβασης στο κανάλι τυχαίας πρόσβασης σε περιβάλλοντα επικοινωνίας μηχανων

Μάριος Α. Γαβριήλ

A.M.: 1115200900232

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: **Αθανασία Αλωνιστιώτη**, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΚΠΑ
Κωνσταντίνος Χατζηκοκολάκης, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΚΠΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βασική ανάγκη που πρέπει να καλύπτεται στα 5G συστήματα είναι η υποστήριξη μεγάλου αριθμού απλών συσκευών, οι οποίες μεταδίδουν ασύγχρονα μικρό αριθμό δεδομένων. Η επικοινωνία των συσκευών αυτών με το δίκτυο ορίζεται ως επικοινωνία μηχανών (Machine Type Communication, MTC ή Machine-to-Machine, M2M). Κάθε συσκευή επικοινωνεί με το δίκτυο μέσω του RACH (Random Access CHannel) καναλιού, ώστε να ζητήσει πόρους για να μεταδώσει τα δεδομένα. Το κανάλι αυτό όμως είναι σχεδιασμένο για να καλύπτει τις ανάγκες επικοινωνίας ανθρώπων (H2H) κι όχι μηχανών, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγκρούσεις των αιτήσεων και καθυστέρηση στην επικοινωνία.

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη, τη σχεδίαση και την ανάπτυξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης πρόσβασης ομάδων (Clusters) μηχανών, ώστε να μειωθούν οι συγκρούσεις αυτές. Στα πρώτα δύο κεφάλαια αναλύονται το κινητό δίκτυο επικοινωνίας (Cellular Network Communication), τα δίκτυα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς (3G and 4G Networks), όπως επίσης και τα νεότερα 5^{ης} γενιάς δίκτυα (5G Networks). Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machine Type Communication), ενώ στα επόμενα δύο (4,5) αναλύεται το περιβάλλον ανάπτυξης και προσομοίωσης, τα modules τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι επεκτάσεις που έγιναν στον υπάρχοντα προσομοιωτή. Το έκτο κεφάλαιο αποτελείται από τα πειράματα τα οποία έχουν εκπονηθεί, πάνω στον προσομοιωτή με τις επεκτάσεις καθώς και τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει. Τέλος το έβδομο κεφάλαιο αποτελεί μια σύνοψη της όλης εργασίας και επιπλέον παρατίθενται σε αυτό τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ασύρματες επικοινωνίες

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Long Term Evolution, 5G, Machine Type Communication , Machine-2-Machine

Amat Victoria Curam ...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες, Επίκουρο κ. Αθανασία Αλωνιστιώτη και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Χατζηκοκολάκη, για την εμπιστοσύνη, τη συνεργασία, την επιμονή και την πολύτιμη βοήθειά τους στην ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2. CELLULAR COMMUNICATION NETWORKS	13
2.1. 3G – 4G Networks [1]	13
2.1.1. 3G First Standardization	14
2.1.2. International Telecommunication Union (ITU).....	14
2.1.2.1. IMT-2000 and IMT- Advanced.....	14
2.1.2.2. IMT Systems Spectrum	15
2.1.3. The Road to 4G	15
2.1.4. LTE Standardization.....	16
2.1.4.1. Standardization Process.....	16
2.1.4.2. Evolving 3G to 4G	17
2.2. 5G Networks [2]	17
2.2.1. General View of 5G.....	17
2.2.1.1. Driving to 5G.....	17
2.2.1.2. Engineering Requirements for 5G	18
2.2.2. How to achieve 1000x Data Rate.....	19
2.2.2.1. Extreme Densification and Offloading	19
2.2.2.2. Millimeter Wave	20
2.2.2.3. Massive MIMO.....	22
2.2.3. Issues for 5G	23
3. MACHINE TYPE COMMUNICATION	26
3.1. The Embedded Internet [5]	28
3.1.1. Motivations for M2M, their essential Elements and the IOT.....	28
3.1.2. M2M Models	29
3.1.2.1. Smart Grid	29
3.1.2.2. Vehicular Telematics	29
3.1.2.3. Healthcare	30

3.1.3.	Architecture and Connectivity	30
3.1.3.1.	Scalable Connectivity	30
3.1.3.2.	High Capacity	30
3.1.4.	Air Interface Optimizations	31
3.2.	Home M2M Networks [6]	31
3.2.1.	Home Network Architecture	31
3.2.1.1.	Body area subnetworks	32
3.2.1.2.	Personal Area subnetworks.....	32
3.2.1.3.	Local Area subnetworks	32
3.2.2.	Resource sharing in Home M2M	33
3.2.2.1.	UPnP	33
3.2.2.2.	DLNA	34
3.2.2.3.	IGRS	34
3.3.	M2M Communications in Smart Grid [7].....	34
3.3.1.	Smart Grid Architecture	35
3.3.1.1.	Neighbourhood Area Network	35
3.3.1.2.	Building Area Network	36
3.3.1.3.	Home Area Network	36
3.3.2.	Smart Grid Requirements.....	36
3.3.3.	Topologies for HAN	36
3.4.	Different Types of Convergences [8]	37
3.4.1.	Network Convergence	37
3.4.2.	Air-Interface Convergence	38
3.4.3.	Protocol Convergence	39
3.5.	MTC Subscription, Congestion, Overload Control [9].....	39
3.5.1.	MTC Subscription Control	39
3.5.2.	Congestion and Overload Control.....	40
3.6.	M2M Resource Allocation [10]	41
3.6.1.	Orthogonal Allocation for eNB-to-MTCG link.....	42
3.6.2.	Scheduling between eNB-to-UE and eNB-to-MTCD links.....	42

3.6.3.	Allocation between MTCD-to-MTCD links	42
3.7.	M2M Device Management [11].....	43
3.7.1.	OMA-DM	43
3.7.2.	Wake up and Paging	43
3.7.3.	Constrained Application Protocol (CoAP).....	44
3.7.4.	Message Formats for OMA DM.....	44
4.	NS-3 SIMULATOR [13].....	45
4.1.	Εισαγωγή.....	45
4.2.	About NS-3	45
4.3.	Differences from NS-2	45
4.4.	Ways of usage of NS-3	46
4.5.	NS-3 Tracing.....	47
5.	NS-3 LTE MODULE AND EXTENSIONS.....	47
5.1.	Εισαγωγή [13].....	47
5.2.	LTE Design Criteria [13]	48
5.3.	Αρχιτεκτονική LTE μοντέλου [13].....	49
5.4.	RRC model [13].....	54
5.5.	RRC model Extensions	57
6.	VALIDATION EXPERIMENTS.....	59
6.1.	Scenarios.....	59
6.2.	Scenario Outputs	62
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	66
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Βασική M2M αρχιτεκτονική [4]	27
Εικόνα 2: Ericsson's 50B programme [4]	28
Εικόνα 3 : Home M2M Network Architecture [6]	33
Εικόνα 4 : Smart Grid Architecture [7].....	35
Εικόνα 5 : Network Convergence [8].....	37
Εικόνα 6 : Air - Interface Convergence [8]	38
Εικόνα 7 : Protocol Convergence [8]	39
Εικόνα 8: NS-3 build output	47
Εικόνα 9: LTE-EPC model[13]	48
Εικόνα 10: UE data plane[13]	51
Εικόνα 11: UE control plane[13]	52
Εικόνα 12: eNB data plane[13]	53
Εικόνα 13: eNB control plane [13]	54
Εικόνα 14: eNB state transition[13].....	55
Εικόνα 15: UE state transformation [13]	56
Εικόνα 16: Scenario 1 topology	60
Εικόνα 17: Scenario 2 topology	61
Εικόνα 18: Scenario 3 topology	62
Εικόνα 19: First scenario output.....	63
Εικόνα 20: Second scenario output	63
Εικόνα 21: Third scenario output	64

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι οι αλγόριθμοι ομαδοποιημένης πρόσβασης στο κανάλι τυχαίας πρόσβασης σε περιβάλλοντα επικοινωνίας μηχανών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η συνεχής πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες έχει δημιουργήσει νέα πεδία στο χώρο των δικτύων, με στόχο να επεκτείνουν την συνδεσιμότητα με περιβάλλοντα όπου οι τεχνολογίες του παρελθόντος, κυρίως οι ενσύρματες, δεν επαρκούσαν. Η ασύρματη σύνδεση σε διαδικτυακές υπηρεσίες έχει αποκτήσει το τελευταίο διάστημα μεγάλο εμπορικό, αλλά και ερευνητικό ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της αλλαγής των συνηθειών του χρήστη. Πλέον κάθεντας έχει στην κατοχή του μια συσκευή τελευταίας γενιάς (Smartphone, tablet) από την οποία μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και κυρίως από εξωτερικούς χώρους ή εν-κινήσει. Αποτέλεσμα της αλλαγής αυτής είναι η εξασθένιση του ενσύρματου τρόπου σύνδεσης στο διαδίκτυο και η ανάπτυξη του ασύρματου, ο οποίος έφερε μαζί του και σωρεία νέων πρωτοκόλλων.

Ένα από αυτά τα πρωτόκολλα είναι το LTE (Long-Term Evolution). Το LTE χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και τη δικτύωση των κινητών συσκευών. Είναι βασισμένο στο GSM/EDGE (Groupe Spécial Mobile/Enhanced Data for GSM Evolution) και στο UMTS/HSPA (Universal Mobile Telecommunication System/High Speed Packet Access), αυξάνοντας τη χωρητικότητα και την ταχύτητα του δικτύου. Υποστηρίζει downlink της τάξης των 300Mbps και Uplink της τάξης των 75Mbps. Το εύρος ζώνης του φέροντος σήματος κυμαίνεται από 1.4 έως 20MHz και υποστηρίζονται τόσο η διπλεξία διαίρεσης συχνότητας, όσο και η διπλεξία διαίρεσης χρόνου. Βασίζεται επιπλέον σε μια απλοποιημένη μορφή αρχιτεκτονικής IP (Internet Protocol), το EPC (Evolved Packet Core) και υποστηρίζει τη μετάδοση τόσο δεδομένων, όσο και φωνής. Παρότι αναφέρεται ως σύστημα 4^{ης} γενιάς, δεν αποτελεί στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο, καθώς δεν πληροί της προϋποθέσεις που έχει ο διεθνής οργανισμός ITU-R.

Από τη στιγμή βέβαια που το LTE αποτελεί τη δεσπόζουσα τεχνολογία διασύνδεσης, τομείς όπως το IoT (Internet of Things) και ιδιαίτερα η υποκατηγορία του που αφορά το Machine to Machine παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το M2M αναφέρεται σε όλες τις τεχνολογίες που επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών ίδιου τύπου με αρκετά πλεονεκτήματα κυρίως στη βιομηχανία και στις επιχειρήσεις. Στην αρχή η χρήση του περιοριζόταν σε αυτοματισμούς και εντοπισμό, αλλά πλέον χρησιμοποιείται και για την αναφορά σε εφαρμογές τηλεματικής.

Στην παρούσα πτυχιακή αναλύονται τα ασύρματα δίκτυα 3^{ης}, 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς (Κεφάλαιο 2). Έπειτα αναλύουμε σε βάθος το Machine Type Communication (MTC), δίνοντας έμφαση στο πως το LTE βοηθάει την εξέλιξή του (Κεφάλαιο 3), ενώ στα επόμενα 2 κεφάλαια (Κεφάλαια 4, 5) αναφερόμαστε και παρουσιάζουμε τον προσομοιωτή που χρησιμοποιήσαμε, τα τεχνικά του χαρακτηριστικά και τις προσθήκες τις οποίες κάναμε. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6) παρουσιάζουμε αναλυτικά τα «σενάρια» τα οποία δημιουργήσαμε, ώστε να επικυρωποιήσουμε τις νέες και τις υφιστάμενες λειτουργίες του προσομοιωτή μας και εν τέλη παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που πήραμε. Τέλος στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζουμε και αναλύουμε εκτενώς τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε, αν πετύχαμε τους στόχους που είχαμε θέσει εξ' αρχής κ.ά..

2. CELLULAR COMMUNICATION NETWORKS

Οι κινητές επικοινωνίες έχουν γίνει πλέον ένα προϊόν καθημερινής χρήσης, με αποτέλεσμα και ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται να έχει αλλάξει από το παρελθόν. Έχει πια ξεφύγει από τα εθνικά και τοπικά πλαίσια και μετατρέπεται σε μία πολύπλοκη διεργασία, η οποία αναλαμβάνεται από διεθνείς οργανισμούς, όπως το 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Η 1η (1G) γενιά αποτελούνταν από αναλογικά κινητά ραδιοσυστήματα του 1980, η 2η (2G) από τα πρώτα ψηφιακά συστήματα και η 3η (3G) από τα πρώτα συστήματα που διαχειρίζονταν ευρυζωνικά δεδομένα. Το LTE συχνά αποκαλείται συχνά και 4η γενιά (4G), παρότι πολλοί πιστεύουν ότι το LTE release 10 ή διαφορετικά LTE-Advanced αποτελεί την 4η γενιά.

2.1. 3G – 4G Networks [1]

Η αρχή έγινε το 1946 όταν εγκρίθηκε από την FCC (Federal Communication Commission) η πρώτη υπηρεσία τηλεφώνου στο αυτοκίνητο, η οποία λειτουργούσε από την AT&T, ενώ ένα χρόνο αργότερα η ίδια εταιρία εισήγαγε την κυβελωτή έννοια των επαναχρησιμοποιούμενων ραδιοσυχνοτήτων.

Τα πρώτα διεθνή κινητά συστήματα επικοινωνιών ξεκίνησαν περίπου το 1980, με τα πιο διάσημα να είναι το NMT στις σκανδιναβικές χώρες, το AMPS στην Αμερική, το TACS στην Ευρώπη και το J-TACS στην Ιαπωνία. Ο εξοπλισμός παρέμεινε ογκώδης, ωστόσο μέσω του NMT αναπτύχθηκε η ιδέα του “roaming”. Η πρώτη γενιά υποστήριζε τα POTS (Plain Old Telephony Services), δηλαδή μετάδοση φωνής και κάποιες επιπλέον υπηρεσίες. Με την έλευση όμως της ψηφιακής τεχνολογίας, δόθηκε η ευκαιρία για αύξηση της χωρητικότητας των συστημάτων, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των υπηρεσιών και εν τέλει να γίνουν πιο ελκυστικές και πραγματικά κινητές οι συσκευές. Στην Ευρώπη μέσω του προτύπου του GSM αναπτύχθηκε ένα πανευρωπαϊκό σύστημα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο διαχειριζόταν από το CEPT (European Conference for Postal and Telecommunication services) και στη συνέχεια από το ETSI (European Telecommunication Standards Institute). Το πρότυπο αυτό βασιζόταν στην τεχνική TDMA (Time Division Multiple Access), όπως και το αντίστοιχο πρότυπο στην Αμερική (US-TDMA), αλλά και στην Ιαπωνία (PDC), ενώ μερικά χρόνια αργότερα αναπτύχθηκε στην Αμερική και το πρότυπο CDMA (Code Division Multiple Access).

Όλα αυτά τα πρότυπα περιορίστηκαν στο να προσφέρουν «low bandwidth» υπηρεσίες, όπως η μετάδοση φωνής. Με την έλευση της 2^{ης} γενιάς ψηφιακών κινητών τηλεπικοινωνιών, δόθηκε η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών δεδομένων, μέσω των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η κυριότερη υπηρεσία δεδομένων που εισήχθη τότε είναι το γνωστό σε όλους μήνυμα κειμένου ή αλλιώς SMS (Short Message Services). Εισήχθησαν επίσης κι άλλες υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (circuit-switched), όπως το e-mail με μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων τα 9.6 Kbit/s. Ωστόσο η μεταφορά πακέτων δεδομένων έγινε πραγματικότητα, κυρίως μετά την εισαγωγή του GPRS (General Packet Radio Services) στο πρότυπο του GSM, ενώ με την έλευση του 3G και των υψηλού εύρους ραδιοσυχνοτήτων του UTRA (Universal Terrestrial Radio Access), άνοιξε διάπλατα ο δρόμος για νέες υπηρεσίες, οι οποίες είχαν μόνο αναφερθεί στα συστήματα 2^{ης} γενιάς.

2.1.1. 3G First Standardization

Η τρίτη γενιά κινητών επικοινωνιών ξεκίνησε το 1980 στην ITU με την ταμπέλα του FPLMTS (Future Landing Public Mobile Telecommunications), η οποία αντικαταστάθηκε στη συνέχεια από τον όρο IMT-2000. Το Διεθνές Συνέδριο Διαχείρισης Ραδιοσυχνοτήτων (World Administrative Telecommunications Systems) WARC-92 αναγνώρισε 230 MHz φάσματος για το IMT-2000 σε παγκόσμια κλίμακα. Από τα 230 αυτά MHz, 2 x 60 MHz αναγνωρίστηκαν ως ζευγαροποιημένο φάσμα για FDD (Frequency Division Duplex) και 35 MHz ως μη ζευγαροποιημένο φάσμα για το TDD (Time Division Duplex).

Στην Ευρώπη ένας αριθμός από μερικώς χρηματοδοτούμενα έργα (projects) από την Ευρωπαϊκή Ένωση οδήγησαν στη δημιουργία μιας ιδέας που περιλάμβανε ένα ευρείας ζώνης (Wideband) CDMA συστατικό, το οποίο εισήχθη στον ETSI το 1996. Την ίδια περίοδο στην Ιαπωνία ο ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) όριζε κι αυτός τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών τρίτης γενιάς βασισμένη στο Wideband CDMA, όπως και οι ΗΠΑ και η Νότια Κορέα. Στις αρχές του 1998 οι προτάσεις από την Ευρώπη και την Ιαπωνία συγχωνεύτηκαν κάτω από το όνομα UMTS που αποτέλεσε το ευρωπαϊκό όνομα για το 3G, ενώ στα τέλη του 1998 συστάθηκε η 3GPP από τις ARIB(Japan), CCSA (China), ETSI (Europe), ATIS (USA), TTA (South Korea) και TTC (Japan), με σκοπό να λύσει το πρόβλημα της παράλληλης ανάπτυξης ευθυγραμμισμένων προδιαγραφών του σε διαφορετικές περιοχές.

2.1.2. International Telecommunication Union (ITU)

2.1.2.1. IMT-2000 and IMT- Advanced

Το ITU-R WP5D είναι υπεύθυνο για τον ορισμό και τη διατήρηση των συστάσεων για τα συστήματα IMT-2000 και IMT- Advanced, τα οποία αποτελούν κωδικές ονομασίες για τα συστήματα 3G και 4G αντίστοιχα. Η κύρια σύσταση του IMT-2000 είναι το ITU-R M.1457, το οποίο ορίζει τις προδιαγραφές των ραδιοσυχνοτήτων (radio interface specification) RSPC του IMT-2000 και περιλαμβάνει μια οικογένεια ραδιοσυχνοτήτων όλες σε ίση βάση. Η συνεχής του ανάπτυξη συμπεριλαμβανομένης και της εξέλιξης του UTRA σε E-UTRA (Evolved UTRA), ανάγκασε την ITU να αναβαθμίσει τις συστάσεις της, φτάνοντας αισίως αυτή τη στιγμή στην 9η έκδοση, στα πλαίσια της οποίας εντάχθηκε το LTE στην οικογένεια της 3GPP.

Εκτός από τη συντήρηση του IMT-2000 το ITU-R WP5D είναι αρμόδιο και για τη διερεύνηση συστημάτων πέρα του IMT-2000, γνωστά πλέον και ως IMT – Advanced, τα οποία περιλαμβάνουν νέες ραδιοσυχνότητες, με αποτέλεσμα να υποστηρίζουν και νέες λειτουργίες. Αρχικά η ITU διεξήγαγε έρευνες αναφορικά με τις υπηρεσίες και τις τεχνολογίες, τις αρχές προτυποποίησης, το απαιτούμενο φάσμα κ.ά., ώστε να δημιουργήσει τις ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις και στη συνέχεια κάλεσε όλα τα μέλη της και άλλους οργανισμούς για να τις αξιολογήσουν. Μία από τις υποψήφιες προτάσεις ήταν η εξέλιξη του LTE από τη 3GPP, το οποίο ονομάστηκε LTE – Advanced.

Σκοπός της ITU είναι ο εναρμονισμός όλων των υποψηφίων μέσα από μια ομόφωνη κατασκευή. Για τον λόγο αυτό οι τεχνολογίες που συμπεριλήφθηκαν στην πρώτη έκδοση του IMT – Advanced ήταν το LTE release 10 (LTE - Advanced) και το WirelessMAN – Advanced.

2.1.2.2. IMT Systems Spectrum

Μια άλλη διαδικασία της ITU-R αφορά την αναγνώριση σε παγκόσμιο επίπεδο του διαθέσιμου φάσματος που είναι κατάλληλο για IMT συστήματα. Επαρκή διαθεσιμότητα φάσματος και το παγκόσμια εναρμονισμένο φάσμα αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για το IMT-Advanced.

Το φάσμα για το 3G ορίστηκε, όπως αναφέραμε και προηγουμένως στα 230 MHz για χρήση από τους εθνικούς διαχειριστές που ήθελαν να χρησιμοποιήσουν το IMT-2000. Τα 2 GHz του γνωστού IMT-2000 “core band” βρίσκονται μέσα σε αυτό το εύρος συχνοτήτων και αποτελούν την πρώτη ζώνη μέσα στην οποία αναπτύχθηκαν 3G συστήματα. Επιπλέον φάσμα δόθηκε στην WRC-2000 στις ήδη υπάρχουσες 2G ζώνες στα 800/900 MHz και στα 1800/1900 MHz και επιπλέον 190 MHz φάσματος στα 2.6 GHz. Ακόμα περισσότερο φάσμα για το IMT-2000 αναγνωρίστηκε στην WRC’07 η ζώνη των 450 MHz, η γνωστή “ψηφιακά διαιρούμενη” (digital divided) στα 698-806 MHz και επιπλέον 300 MHz φάσματος σε υψηλότερες συχνότητες.

2.1.3. The Road to 4G

Η εξέλιξη των 3G συστημάτων σε 4G πηγάζει από τη δημιουργία και την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών για τις κινητές συσκευές, αλλά και από την εξέλιξη του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο οι κινητές αυτές συσκευές λειτουργούν. Η ταχεία αύξηση της χρήσης του Διαδικτύου (Internet) συνέπεσε την ίδια χρονική στιγμή, κατά την οποία τα 2G και 3G συστήματα βρίσκονταν σε ευρεία χρήση, με αποτέλεσμα οι υπηρεσίες που ήταν βασισμένες στο Internet (Internet based services) να μεταφερθούν και στις κινητές συσκευές, δημιουργώντας αυτό που λέμε σήμερα Mobile Broadband.

Τα POTS και οι πρώτες γενιές κινητής τεχνολογίας δημιουργήθηκαν για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, κυρίως φωνής. Οι πρώτες υπηρεσίες δεδομένων πάνω σε GSM βασίζονταν στη μεταγωγή κυκλώματος, με το βασισμένο σε πακέτα (packet-based) GPRS να έρχεται ως μεταγενέστερη προσθήκη. Αυτό επηρέασε και την υλοποίηση της πρώτης γενιάς του 3G, η οποία βασιζόταν στη μεταγωγή κυκλώματος, με τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων (packet-switched) ως επιπλέον προσθήκη. Ωστόσο οι υπηρεσίες αυτές έγιναν ο κύριος σχεδιαστικός στόχος μετά την εξέλιξη του 3G σε HSPA και αργότερα LTE/LTE-Advanced.

Από την άλλη πλευρά όμως το IP ενεργοποιεί ένα εύρος από υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις. Όμως οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι που υποστηρίζουν πληθώρα υπηρεσιών είναι :

Ρυθμός Δεδομένων (Data rate) : Πολλές υπηρεσίες με χαμηλό ρυθμό δεδομένων, όπως οι υπηρεσίες φωνής είναι ακόμα πολύ σημαντικές, ωστόσο οι υπηρεσίες με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων είναι αυτές που οδηγούν τη σχεδίαση των ραδιοσυχνοτήτων και σπρώχνουν τους κορυφαίους ρυθμούς δεδομένων (peak data rates) από τα Kbit/s του 2G, στα Mbit/s του 3G και πλέον στα Gbit/s του 4G.

Καθυστέρηση (Delay) : Διαδραστικές υπηρεσίες όπως τα παιχνίδια και η μεταφορά αρχείων σε πραγματικό χρόνο απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση, ενώ υπηρεσίες όπως το e-mail και η τηλεόραση δεν έχουν τέτοιες απαιτήσεις.

Χωρητικότητα (Capacity) : Για τους παρόχους δεν υπάρχουν μόνο τα peak data rates, τα οποία παρέχουν στους τελικούς χρήστες αλλά και το συνολικό data rate που μπορεί να προσφερθεί κατά μέσο όρο από κάθε αναπτυγμένο base station, αλλά και τα ανά hertz του αδειοδοτούμενου φάσματος. Αυτό ονομάζεται φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency). Σε περίπτωση συρρίκνωσης της χωρητικότητας

η ποιότητα της υπηρεσίας (Quality-of-Service, QoS) για τον τελικό χρήστη υποβαθμίζεται.

Υπάρχει επίσης η απαίτηση για περισσότερους φασματικούς πόρους, προκειμένου να διευρυνθούν τα συστήματα, με αποτέλεσμα η απαίτηση αυτή να οδηγεί σε περισσότερο ανταγωνισμό μεταξύ του αυξανόμενου αριθμού των κινητών παρόχων και των εναλλακτικών τεχνολογιών που παρέχουν κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες. Με την παροχή όμως περισσότερου φάσματος, δημιουργείται η ανάγκη να λειτουργούν τα κινητά συστήματα σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας, να δεσμεύουν φάσμα διαφορετικών μεγεθών και πολλές και κατακερματισμένο. Αυτό απαιτεί μεγάλη φασματική ευελιξία με την πιθανότητα ενός πολυτοίκιου ευρυζωνικού καναλιού.

Η απαίτηση για νέες υπηρεσίες και η εξέλιξη των ραδιοσυχνοτήτων για το LTE οδήγησε στην εξέλιξη του core network. Το core network στην αρχή αναπτύχθηκε για το GSM, στη συνέχεια επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίξει τα GPRS, EDGE και WCDMA, αλλά η κατασκευή του βασιζόταν ακόμα στη μεταγωγή κυκλώματος. Με την έναρξη της ανάπτυξης του LTE δημιουργήθηκε η SAE (System Architecture Evolution), η οποία είχε σαν αποτέλεσμα το EPC, το οποίο αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τα HSPA και LTE/LTE-Advanced.

2.1.4. LTE Standardization

Ο ορισμός του LTE συστήματος, ώστε να πληροί τους σχεδιαστικούς στόχους επιβάρυνε τη 3GPP, εφόσον ήταν η ίδια που έγραψε και τις προδιαγραφές για τα 2G, 3G και 4G συστήματα και οι τεχνολογίες της είναι οι πιο ευρέως αναπτυγμένες στον κόσμο.

2.1.4.1. Standardization Process

Το να θέτεις πρότυπα δεν είναι μια απλή διαδικασία. Οι κοινότητες που ασχολούνται με αυτά (standardization forums) συνεχώς εξελίσσουν τα πρότυπα προσπαθώντας να καλύψουν νέες απαιτήσεις σε υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Η διαδικασία της προτυποποίησης είναι διαφορετική σε κάθε κοινότητα, ωστόσο υπάρχουν 4 φάσεις κοινές σε όλες :

- **Απαιτήσεις (Requirements)**, δηλαδή τι θα επιτευχθεί με το συγκεκριμένο πρότυπο.
- **Αρχιτεκτονική (Architecture)**, όπου αποφασίζονται οι κύριοι κατασκευαστικοί άξονες και διεπαφές του προτύπου.
- **Λεπτομερείς προδιαγραφές (Detailed specifications)**, όπου αναλύονται λεπτομερώς όλες οι διεπαφές.
- **Έλεγχος και Επικύρωση (Testing and Verification)**, όπου ελέγχεται αν λειτουργεί στην πραγματική ζωή.

Οι φάσεις είναι επαναληπτικές και επικαλυπτόμενες, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτήσεις μπορούν να προστεθούν, αφαιρεθούν ή και να αλλάξουν σε μεταγενέστερα στάδια.

Η προτυποποίηση ξεκινάει με τη φάση των *απαιτήσεων*, στην οποία αποφασίζεται τι θα επιτευχθεί με το πρότυπο αυτό και διαρκεί σύντομο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της αρχιτεκτονικής, στην οποία περιλαμβάνονται οι αποφάσεις σχετικά με τα σημεία αναφοράς και τις διεπαφές που θα προτυποποιηθούν. Η φάση αυτή διαρκεί αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα και

ενδέχεται να αλλάξουν κατά τη διάρκειά της και οι προδιαγραφές. Ακολουθεί η φάση των λεπτομερών προδιαγραφών κατά την οποία καθορίζονται όλες οι λεπτομέρειες για κάθε μία από τις αναγνωρισμένες διεπαφές. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, μπορεί να χρειαστεί να αναθεωρηθούν αποφάσεις που λήφθηκαν κατά το στάδιο της αρχιτεκτονικής ή και των απαιτήσεων. Τέλος ακολουθεί η φάση του ελέγχου και της επικύρωσης, η οποία αποτελεί την τελική απόδειξη του προτύπου. Υπάρχει η πιθανότητα κατά τη διάρκειά της να ανακαλυφθούν λάθη, τα οποία θα οδηγήσουν σε αναθεώρηση ορισμένων αποφάσεων που λήφθηκαν στο προηγούμενο στάδιο και σπανιότερα στα δύο πρώτα. Η φάση αυτή τελειώνει όταν υπάρχουν σταθερά τεστ προδιαγραφών, τα οποία επιβεβαιώνουν ότι ο εξοπλισμός πληροί το πρότυπο. Συνήθως η όλη αυτή διαδικασία παίρνει 1 με 2 χρόνια, εκτός κι αν το πρότυπο ξεκινήσει από το μηδέν οπότε χρειάζεται σαφέστερα αρκετά περισσότερος χρόνος.

2.1.4.2. Evolving 3G to 4G

Η πρώτη έκδοση του WCDMA Radio Access ονομάστηκε release 99 και περιλάμβανε όλα τα χαρακτηριστικά που χρειαζόταν ώστε να πληροί τις προδιαγραφές του IMT-2000, δηλαδή τη μεταγωγή κυκλώματος για φωνή και υπηρεσίες βίντεο και υπηρεσίες δεδομένων τόσο βασισμένες στη μεταγωγή κυκλώματος όσο και στη μεταγωγή πακέτων. Η πρώτη ωστόσο σημαντική προσθήκη είναι το HSPA το οποίο προστέθηκε στην έκδοση 5 με το HSDPA και στην έκδοση 6 με το Enhanced Uplink.

Η εξέλιξη του 3G συνεχίστηκε, όταν διοργανώθηκε ένα workshop για να εισάγει το project της 3GPP που αφορούσε το LTE. Οι πρώτοι 6 μήνες δαπανήθηκαν στον ορισμό των απαιτήσεων ή των σχεδιαστικών στόχων του LTE. Πιο αξιοσημείωτες είναι οι απαιτήσεις για υψηλό ρυθμό δεδομένων στην άκρη του κελιού, όπως και η χαμηλή καθυστέρηση σε αντίθεση με τη χωρητικότητα και τις απαιτήσεις για κορυφαίο ρυθμό δεδομένων. Επιπλέον προτάθηκαν και λύσεις αναφορικά με τη φασματική ευκαμψία (spectrum flexibility) και τα περισσότερα κοινά στοιχεία ανάμεσα στο FDD και το TDD. Το φθινόπωρο του 2005 αποφασίστηκε ότι το downlink του LTE θα πρέπει να βασίζεται στο OFDM και το uplink στο DFT-precoded OFDM.

Εντός της 3GPP το LTE-Advanced θεωρούταν ως ένα κύριο βήμα στην εξέλιξη του LTE κι όχι σαν μια νέα τεχνολογία. Μεγαλύτερο εύρος μέσω της άθροισης των πολλαπλών παρόχων και εξελιγμένη χρήση των προηγμένων τεχνικών κεραιών τόσο για το uplink όσο και για το downlink, είναι τα κύρια χαρακτηριστικά που προστέθηκαν στο LTE release 10, ώστε να φτάσει τους στόχους του IMT-Advanced.

2.2. 5G Networks [2]

2.2.1. General View of 5G

2.2.1.1. Driving to 5G

Σύμφωνα με τα VNI reports υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι η έκρηξη των δεδομένων υφίσταται και θα συνεχίσει. Κινητά τελευταίας γενιάς, tablets και video streaming κάνουν σαφές ότι μια σταδιακή προσέγγιση δε θα πλησιάσει ούτε στο ελάχιστο τις απαιτήσεις των δικτύων μέχρι το 2020, καθώς τα IP δεδομένα που διαχειρίζονται από τα ασύρματα δίκτυα θα έχουν αυξηθεί κατά πολύ πάνω από 100

exabytes, ενώ εκθετικά θα αυξάνεται και ο αριθμός των συσκευών και του ρυθμού των δεδομένων.

Για το λόγο αυτό η ακαδημαϊκή κοινότητα εργάζεται επάνω σε μεγάλα συνεργατικά projects, όπως το METIS και το 5GNOW, την ίδια στιγμή που η βιομηχανία οδηγεί κάποιες προκαταρκτικές δραστηριότητες προτυποποίησης του 5G. Σε αντίθεση όμως με αυτά το 5G παρουσιάζει ενδιαφέρον και για άλλους λόγους συμπεριλαμβανομένης της πιθανής μετακίνησης στο mmWave (millimeter WAVE) φάσμα, νέους τρόπου δέσμησης και επαναδέσμησης bandwidth, μια εν εξελίξει οπτικοποίηση του core network με προοπτικές επέκτασης προς τις άκρες, την πιθανότητα το “Internet of Things” να αποτελείται από δισεκατομμύρια διαφορετικές συσκευές και τη συνεχώς αυξανόμενη ενσωμάτωση των παλαιών και νέων κυψελών και των προτύπων WiFi, ώστε να παρέχεται μια πανταχού παρών high-rate και low-latency εμπειρία στους χρήστες. Με άλλα λόγια οι 3 πιο σημαντικές 5G τεχνολογίες είναι :

- Ultra-densification
- mmWave
- Massive multiple-input multiple-output (MIMO)

2.2.1.2. Engineering Requirements for 5G

Σε γενικές γραμμές διαφορετικές εφαρμογές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις, ωστόσο οι ακόλουθες δείχνουν την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθούν χωρίς να χρειάζεται να ικανοποιούνται όλες ταυτόχρονα. Έχουμε λοιπόν :

- **Data Rate** : Αφορά την ανάγκη για υποστήριξη της κίνησης των κινητών δεδομένων και μετριέται με τους εξής τρόπους :
 - **Aggregate data rate** αναφέρεται στο συνολικό πλήθος δεδομένων που μπορεί να υπηρετήσει το δίκτυο και μετριέται σε bits/s/area, ενώ για τη μετάβαση από το 4G στο 5G πρέπει να αυξηθεί κατά 1000x .
 - **Edge rate, or 5% rate** αφορά το χειρότερο δυνατό data rate που περιμένει να λάβει ο χρήστης. Στόχος του 5G είναι να το αυξήσει από το τα 100 Mbps στο 1 Gbps. Αυτό προϋποθέτει μία αύξηση κατά 100x, καθώς τα συστήματα 4G έχουν ένα τυπικό 5% rate του 1 Mbps, ωστόσο ο αριθμός αυτός ποικίλλει ανάλογα με τον φόρτο, το μέγεθος της κυψέλης κ.ά..
 - **Peak rate** αφορά το καλύτερο δυνατό data rate που περιμένει να λάβει ο χρήστης και αποτελεί έναν αριθμό που αφορά κυρίως τους σκοπούς του marketing.
- **Latency** : Παρότι στο 4G οι roundtrip latencies διαρκούν 15 ms, χρόνος αρκετός για τις περισσότερες εφαρμογές, στο 5G ο χρόνος αυτός απαιτείται να μειωθεί στο 1 ms, ώστε να είναι γρηγορότερο από το 4G. Βέβαια τέτοιες αλλαγές στο latency πιθανότατα θα έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις σχεδιαστικές επιλογές στα διάφορα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλου και του core network.
- **Energy and Cost** : Προχωρώντας προς το 5G το κόστος και η κατανάλωση ενέργειας θα μειωθούν, εφόσον τα per-link data θα αυξηθούν κατά 100x, αυτό συνεπάγεται με τα Joule per bit και το cost per bit θα μειωθούν τουλάχιστον κατά 100x . Για παράδειγμα το mmWave φάσμα θα είναι 10-100x φθηνότερο ανά Hz από το φάσμα του 3G και του 4G κάτω από τα 3

GHz, όπως και οι μικρές κυψέλες θα είναι 10-100x φθηνότερες και πιο αποδοτικές ενεργειακά από τα macrocells.

Τέλος θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το 5G πρέπει να υποστηρίζει αρκετά μεγαλύτερο αριθμό συσκευών με αρκετές διαφορές μεταξύ τους. Για παράδειγμα ένα macrocell μπορεί να χρειαστεί να υποστηρίζει ακόμα και περισσότερες από 10000 low-rate συσκευές ταυτόχρονα με τους παραδοσιακούς χρήστες.

2.2.2. How to achieve 1000x Data Rate

Προκειμένου να επιτευχθεί η αύξηση αυτή της τάξης των 1000x πρέπει να ρυθμιστούν 3 κατηγορίες :

- Extreme densification και offloading
- Millimeter Wave
- Massive MIMO

2.2.2.1. Extreme Densification and Offloading

Μια πρόσφορη και αρκετά αποδοτική μέθοδος για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου είναι να κάνουμε τα κελιά μικρότερα. Αυτή δεν είναι μια νέα τεχνική, αλλά έχει δοκιμαστεί σε πολλές γενιές κυψελών, ώστε να φτάσουμε στη σημερινή και να χρησιμοποιούμε κελιά τόσο μικρά όπως τα picocells και τα femtocells. Η μείωση του μεγέθους των κελιών έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος σε μια γεωγραφική περιοχή και η μείωση των χρηστών που ανταγωνίζονται για πόρους σε κάθε BS (Base Station). Από τη στιγμή μάλιστα που και τα power-law pathloss μοντέλα που κρατούν το σήμα προς παρεμβολή (SIR) διατηρούνται ενώ το δίκτυο πυκνώνει, τα κελιά μπορούν να συρρικνωθούν σχεδόν απεριόριστα χωρίς θυσίες στο SIR (Signal to Interference Ratio) μέχρι κάθε BS να εξυπηρετεί το πολύ ένα χρήστη. Αυτό επιτρέπει στο BS να αφιερώνει του πόρους του και την backhaul σύνδεσή του σε ακόμα μικρότερο αριθμό χρηστών.

Με τη πυκνωση όμως να γίνεται μεγάλη, βγαίνουν στο προσκήνιο και ορισμένες προκλήσεις, όπως η διατήρηση του αναμενόμενου cell-splitting σε κάθε BS, ο προσδιορισμός των κατάλληλων συσχετισμών μεταξύ των χρηστών και των BS αναφορικά με τα RATs (Radio Access Technology), η υποστήριξη της κινητικότητας μέσα σε ετερογενή δίκτυα και η παροχή του αυξανόμενου κόστους για την εγκατάσταση, τη συντήρηση και το backhaul. Έτσι λοιπόν έχουμε :

- Base Station Densification Gains : Ορίζουμε το BS densification gain $\rho > 0$ ως την αποτελεσματική αύξηση του ρυθμού δεδομένων αναφορικά με την αύξηση της πυκνότητας του δικτύου. Εάν ο συντελεστής $\rho = 1$, αυτό σημαίνει ότι αύξηση της πυκνότητας του BS έχει μια αναλογική πληρωμή στα πλαίσια των ρυθμών που έχουν επιτευχθεί.

Σε ένα δίκτυο περιορισμένων παρεμβολών γεμάτο με buffers το SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) είναι ίσο με το SIR, καθώς το SIR παραμένει σχεδόν σταθερό όσο το δίκτυο πυκνώνει, με αποτέλεσμα η καλύτερη δυνατή τιμή για το ρ να είναι πολύ κοντά στο 1. Στην πραγματικότητα οι buffers δεν είναι πάντα γεμάτοι και πολλά μικρά κελιά τείνουν να γίνουν περισσότερο lightly loaded από τα macrocells. Έτσι το SINR αυξάνει την πυκνότητά του, αυξάνοντας την απολαβούσα ενέργεια σήματος στα δίκτυα περιορισμένου θορύβου και στα δίκτυα με περιορισμένες

παρεμβολές επειδή τα lightly loaded μικρά κελιά δημιουργούν λιγότερες παρεμβολές. Παρόλα αυτά στις μικροκυματικές συχνότητες η απολαβή του SINR δεν είναι αρκετή για να συμβαδίσει με τη μειωμένη χρησιμοποίηση μικρών κελιών κι έτσι $\rho < 1$.

Γενικότερα παρατηρούμε ότι το ρ μπορεί να βελτιωθεί και να πλησιάσει το 1 κάνοντας χρήση του macro-BS muting, αντί τα macrocells να εκπέμπουν όλη την ώρα και έτσι να παρεμβάλλονται με τα μικρά κελιά όλη την ώρα. Μια άλλη προοπτική των mmWave συχνοτήτων είναι ότι είναι πιθανή η απολαβή πύκνωσης $\rho \gg 1$, καθώς σε αυτές τις συχνότητες είναι μεγαλύτερος ο περιορισμός του θορύβου και η αύξηση της πυκνότητας, που όχι μόνο διαιρεί τους πόρους των κελιών και ελαφραίνει το φορτίο, αλλά αυξάνει δραματικά και το SINR.

- **Multi-Rat Association:** Όσο πλησιάζουμε προς το 5G τα δίκτυα γίνονται όλο και περισσότερο ετερογενή μεταξύ τους. Η λύση σε αυτό είναι η αυξημένη ενσωμάτωση διαφορετικών RATs με μια τυπική 5G-enabled συσκευή να έχει ραδιοσυχνότητες που να υποστηρίζουν όχι μόνο τα ενδεχόμενα νέα 5G πρότυπα, αλλά και το 3G, διάφορες εκδόσεις του 4G LTE, ορισμένους τύπους WiFi και πιθανότατα απευθείας διασύνδεση συσκευών (D2D).
- **Mobility Support:** Παρότι ένας μεγάλος όγκος δεδομένων αφορά τους στατικούς χρήστες, η υποστήριξη της κινητικότητας και της always-on συνδεσιμότητας είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό στα κινητά δίκτυα που είναι σχετικά με το WiFi. Για το λόγο αυτό αναμένουμε να δούμε ad-hoc λύσεις όπως αυτή του LTE release 11, όπου ορίζονται εικονικά κελιά τα οποία χωρίζουν το φυσικό κελί από τη γύρω περιοχή στην οποία ο χρήστης μπορεί να περιπλανιέται χωρίς την ανάγκη του handoff επικοινωνώντας με οποιοδήποτε BS ή subset of BSs στη συγκεκριμένη περιοχή. Μιά άλλη λύση αφορά το mmWave, το οποίο θα περιορίζει τους highly mobile χρήστες σε macrocells και μικροκυματικές συχνότητες πιέζοντάς τους να ανέχονται χαμηλότερους ρυθμούς, ενώ τα handoffs θα αποτελούν μια πρόκληση, καθώς η εκπομπή και η λήψη ακτινών πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη να επικοινωνούν.
- **Cost:** Μικρότερα κελιά χρειάζονται μικρότερα, ενεργειακά χαμηλότερα και φθηνότερα BSs, συνεπώς δε χρειάζεται το κόστος των BSs να ξεπερνά αυτό του εξοπλισμού των χρηστών. Έτσι λοιπόν τα end-user-deployed femtocells και τα WiFi access points είναι σίγουρα πιο οικονομικά αποδοτικά. Ωστόσο υπάρχουν κι εδώ εμπόδια, με κύριο από αυτά την οργάνωση και τη διαχείριση του δικτύου για να παρέχει επιχειρηματικού επιπέδου υπηρεσίες. Επιπλέον εμπόδιο προκαλεί η εμμονή ορισμένων χρηστών να μη μοιράζονται τη σύνδεσή τους, με αποτέλεσμα το όλο αυτό κλειστό status quo να λειτουργεί ανασταλτικά στη μείωση του κόστους του 5G.

2.2.2.2. Millimeter Wave

Όλες οι επίγειες ασύρματες επικοινωνίες λειτουργούν σε συχνότητες από μερικές εκατοντάδες MHz έως μερικά GHz. Το φασματικό αυτό διάστημα συχνά αποκαλείται και "beachfront-spectrum" και μπορεί να γίνει πιο αποδοτικό εκσυγχρονίζοντας τους κανόνες και τις διαδικασίες δέσμευσής του. Μεγάλα ποσά σχετικά αδρανούς φάσματος φαίνεται να υπάρχουν στο mmWave εύρος από τα 30 έως τα 300 GHz, όπου τα μήκη κύματος κυμαίνονται από 1-10mm, ενώ υπάρχουν και ορισμένα στο διάστημα 20 έως 30 GHz. Ο λόγος που το mmWave φάσμα παραμένει αδρανές, ανάγεται στο γεγονός ότι έχει χαρακτηριστεί

ακατάλληλο για κινητές επικοινωνίες, λόγω της χαμηλής ποιότητας διάδοσης, την απορρόφηση από ατμοσφαιρικούς παράγοντες, τη χαμηλή διάθλαση κ.ά. Αναλυτικότερα οι λόγοι είναι οι εξής :

- Propagation Issues :
 - **Pathloss.** Όσο οι κεραιές συρρικνώνονται με συχνότητα, προοδευτικά όλο και περισσότερες από αυτές θα προστίθενται στην αρχική περιοχή. Η πρόκληση ωστόσο είναι το πώς αυτές οι κεραιές θα μπορούν να κατευθύνονται ώστε να συλλέγουν την ενέργεια παραγωγικά, ειδικά όταν το κανάλι αλλάζει ταχύτητα.
 - **Blocking.** Τα mmWave σήματα μειωμένη περίθλαση και περισσότερη κατοπτρική διάδοση από τα αντίστοιχα μικροκυματικά με αποτέλεσμα να είναι πιο επιδεκτικά στα μπλοκαρίσματα. Η ευαισθησία αυτή μπορεί να μετατρέψει ταχύτητα ένα link από usable σε unusable και δυστυχώς τα small-scale fading και large-scale obstructions δεν μπορούν να καταστρατηγηθούν με πρότυπα μικρής κλίμακας αντίμετρα.
 - **Atmospheric and rain absorption.** Η απορρόφηση από τον αέρα και τη βροχή είναι αξιοσημείωτη, ασήμαντη για τις αστικές υλοποιήσεις, αρκετά ωφέλιμη, καθώς μετριάζει περαιτέρω τις παρεμβολές στον φόντο από τους πιο απομακρυσμένους BSs.
- Large arrays, narrow beams : Οι ακτίνες του mmWave φάσματος είναι εξαιρετικά εύκολο να κατευθυνθούν, πράγμα που αλλάζει άρδην την συμπεριφορά των παρεμβολών και την ευαισθησία σε μη ευθυγραμμισμένες ακτίνες. Οι παρεμβολές υιοθετούν μια on/off συμπεριφορά, όπου οι περισσότερες ακτίνες δεν παρεμβάλλονται και η βαριά παρεμβολή συμβαίνει διακοπτόμενα.
 - **Link Acquisition** : Πρόκληση αποτελεί το γεγονός ότι οι στενές ακτίνες δημιουργούν εμπόδιο στη δημιουργία συσχετισμών μεταξύ των χρηστών και των BSs.
 - **Leveraging the legacy 4G network** : Μια ταυτόχρονη χρησιμοποίηση τόσο των μικροκυμάτων , όσο και του mmWave θα έπαιρνε χρόνο για να ξεπεράσει τα προαναφερθέντα εμπόδια. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό είναι τα “phantom cells” όπου οι mmWave συχνότητες θα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση του ωφέλιμου φορτίου από τα BSs με μικρά κελιά, ενώ το επίπεδο ελέγχου θα λειτουργεί με μικροκυματικές συχνότητες από τα macro BSs. Αυτό συνεπάγεται με σταθερές και αξιόπιστες συνδέσεις, στις οποίες οι σποραδικές διακοπές από τα mmWave links θα παραμένουν στη θέση τους και τα χαμένα δεδομένα θα ανακτώνται από τις επανεκπομπές.
 - **Novel transceiver architectures** : Παρά τις προόδους που έχουν γίνει στα WiFi mmWave συστήματα, υπάρχουν ακόμα προβλήματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν ευθέως τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται οι επικοινωνίες. Το κύριο πρόβλημα εστιάζεται στους ενεργειακά υπερκαταναλωτικούς analog-to-digital (A/D) και digital-to-analog (D/A) μετατροπείς, με άμεση συνέπεια ότι, παρότι μεγάλες κεραιές και υψηλής ευαισθησίας αποδέκτες χρησιμοποιούνται για το pathloss, το να χρησιμοποιούνται custom πλήρως ψηφιακοί beamformers για κάθε κεραιάς είναι ανέφικτο. Από την άλλη όμως

πλευρά προσφέρουν αραιότερα κανάλια κι έτσι διευκολύνεται η απόκτηση των channel-stated πληροφοριών.

2.2.2.3. Massive MIMO

Το MIMO αναφέρεται στη χωρική διάσταση της επικοινωνίας που ανατέλλει όταν πολλαπλές κεραιές είναι διαθέσιμες στους BS και στις κινητές συσκευές. Υπάρχουν 2 είδη MIMO, το single-user (SU-MIMO), του οποίου οι διαστάσεις είναι περιορισμένες ανάλογα με το πόσες κεραιές μπορεί να φέρει μια κινητή συσκευή και το multi-user (MU-MIMO), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλές κεραιές και να ξεπεράσει το πρόβλημα του bottleneck.

Με την ανάπτυξη του LTE το MIMO έγινε το κύριο συστατικό του χρησιμοποιώντας 2 έως 4 κεραιές ανά κινητή συσκευή και το πολύ μέχρι 8 για κάθε BS. Για το λόγο αυτό υπάρχει μια πρόταση, σύμφωνα με την οποία οι BS πρέπει να εφοδιαστούν με κεραιές πολύ περισσότερες από τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούν ανά μονάδα χρόνου-συχνότητας. Έτσι δημιουργούνται μεγάλα συστήματα κεραιών (large-scale antenna systems), γνωστά ως Massive MIMO, τα οποία προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως μεγάλες αυξήσεις στη φασματική αποδοτικότητα χωρίς την ανάγκη για αυξημένη πυκνωση στους BSs, ομαλοποιημένες απαντήσεις καναλιού εξαιτίας της μεγάλης χωρικής ποικιλομορφίας και απλές δομές εκπομπής και λήψης. Για να γίνουν όμως τα Massive MIMO πραγματικότητα πρέπει να υπερκεραστούν ορισμένα εμπόδια που αναλύονται παρακάτω.

- A. Pilot Contamination and Overhead Reduction: Οι πιλοτικές μεταδόσεις γίνονται μέσα στα ίδια κελιά χρηστών για τη διευκόλυνση της καλύτερης εκτίμησης του πιο καθαρού καναλιού. Ωστόσο όμως τα κελιά πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται, διαφορετικά όλοι οι πόροι θα καταναλωθούν από τους πιλότους. Η παρεμβολή που διαφορετικά ονομάζεται και «pilot contamination» δεν εξαλείφεται με την αύξηση του μεγέθους των κεραιών. Επιπλέον ποικίλες μέθοδοι έχουν διατυπωθεί σχετικά με τον περιορισμό ή και την εξάλειψη του pilot contamination, μέσω του χαμηλής έντασης συντονισμού των BSs, αν και ακόμα χρειάζεται προσεκτικός σχεδιασμός για να αποφευχθεί η έκρηξη του overhead. Μερικές από τις ιδέες αυτές είναι η αξιοποίηση των χωρικών συσχετίσεων και ο διαχωρισμός των πιλότων σε κλάσεις.
- B. Architectural Challenges: Η αρχιτεκτονική αποτελεί την πιο σοβαρή πρόκληση στην κατανόηση του οράματος του massive MIMO. Αυτό απαιτεί εντελώς διαφορετικές BS δομές, όπου αντί για λίγους υψηλής-ενέργειας ενισχυτές να τροφοδοτούν ένα τομέα κεραιών, θα έχουμε πολλούς μικρούς χαμηλής ενέργειας ενισχυτές που θα τροφοδοτούν μικρές κεραιές.
- C. Full-Dimension MIMO and Elevation Beamforming: Οι σημερινοί BS και ειδικά αυτοί που βρίσκονται σε δομές πύργου μπορούν να στεγάσουν έναν περιορισμένο αριθμό κεραιών. Υιοθετώντας όμως το μοντέλο του FD-MIMO (Full-Dimension MIMO) και αυξάνοντας και τη γωνία ανύψωσης, μπορούν να στεγάσουν αρκετές περισσότερες με τον ίδιο παράγοντα μορφής. Πλεονέκτημα από την όλη διαδικασία είναι η αύξηση της δύναμης του σήματος και η μείωση των παρεμβολών από χρήστες γειτονικών κελιών.
- D. Channel Models: Οι συσχετισμοί των κεραιών και οι σύνδεσμοι για τις μαζικές συστοιχίες με σχετικές τοποθεσίες πρέπει να καθοριστούν και να καθιερωθεί ένα μοντέλο για την επίδρασή τους και πιο συγκεκριμένα πρέπει

να πιστοποιηθεί ο βαθμός ορθογωνοποίησης του κανονικού καναλιού στο πρόσωπο μη ιδεατών οντοτήτων.

- E. **Coexistence with Small Cells** : Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι massive MIMO BSs πιθανότατα θα πρέπει να συνυπάρχουν με μικρότερα κελιά τα οποία δε θα είναι εφοδιασμένα με MIMO λόγω του μικρού παράγοντα μορφής. Ο μεγάλος αριθμός κεραιών στα massive MIMO BSs προσφέρει την ευκαιρία αποφυγής παρεμβολών με σχετική απλότητα και χαμηλό κόστος.
- F. **Coexistence with mmWave** : Το mmWave χρειάζεται αρκετές κεραιές για την κατεύθυνση των ακτινών. Στις συχνότητες αυτές όμως οι κεραιές είναι αρκετά μικρές και έτσι ένας μεγάλος αριθμός από αυτές μπορεί να χωρέσει σε μια κινητή συσκευή με αποτέλεσμα οι κεραιές αυτές να μπορούν πραγματικά να παρέχουν σχηματισμούς δέσμης και ευκαιρίες για MIMO.

2.2.3. Issues for 5G

Για να επιτευχθεί η 1000x αύξηση που αναφέραμε πιο πάνω το 5G χρειάζεται να μειώσει τα latencies, το κόστος, την ενεργειακή κατανάλωση και υποστηρίζει πολλές χαμηλού ρυθμού συνδέσεις. Πιο κάτω αναλύουμε ορισμένες ερευνητικές περιοχές που υποστηρίζουν τις απαιτήσεις αυτές.

- A. **Signaling and Multiple Access** : Η σηματοδότηση και η πολλαπλή πρόσβαση έχει αλλάξει σημαντικά. Από την αναλογική συχνότητα βασισμένη στο FDMA του 1G, πήγαμε στο ψηφιακό 2G βασισμένο τόσο σε FDMA (Frequency Division Multiple Access), όσο και σε TDMA (Time Division Multiple Access) και στη συνέχεια ακολούθησε το CDMA του 3G για να φτάσουμε στο σημερινό OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) σε συνδυασμό με FDMA/TDMA που υιοθετείται από το 4G, έτσι λοιπόν βάσιμα πιστεύουμε ότι με την έλευση του 5G θα υπάρξει ακόμα μία αλλαγή τη σηματοδότηση και την πολλαπλή πρόσβαση.
 - a. **OFDM and OFDMA** : Το OFDM έχει γίνει το κυρίαρχο φορμάτ σηματοδότησης για υψηλών ταχυτήτων ασύρματες επικοινωνίες, αφού παρέχει ένα φυσικό τρόπο για αντιμετώπιση της επιλεκτικότητας της συχνότητας, υπολογιστικά αποδοτική εκτέλεση μέσω των FFT/IFFT μπλοκ απλών ισοροπιστών συχνότητας και αποτελεί και ένα εξαιρετικό ζευγάρι για το MIMO. Από την άλλη πλευρά το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) είναι επιφορτισμένο με το να υποδηλώνει την πολλαπλή πρόσβαση στο επίπεδο του subcarrier. Σε συνδυασμό δε με το TDMA μπορεί εύκολα να διαχωρίζει τα resource blocks μέσω του ψηφιακού φιλτραρίσματος
 - b. **Μειονεκτήματα OFDM** : Αρχικά στο OFDM το PARP (Peak to Average Power Ratio) είναι υψηλότερο απ' ότι σε άλλα format, με αποτέλεσμα να εγκαθιδρύει ένα μη ελκυστικό tradeoff ανάμεσα στη γραμμικότητα του εκπεμπόμενου σήματος και στο κόστος του ενισχυτή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να διορθωθεί με κάνοντας precoding τα σήματα του OFDM όπως στο LTE Uplink. Δεύτερο πρόβλημα αποτελεί η αποδοτικότητα του φάσματος, η οποία ναι μεν είναι ικανοποιητική, αλλά χρήζει περαιτέρω βελτίωση. Γενικά αυτό που προκαλεί περισσότερο προβληματισμό είναι το αν μπορεί να εφαρμοστεί το OFDM στο mmWave δίνοντας τεράστια εύρη ζωνών

και η δυσκολία για τη δημιουργία αποδοτικών ενισχυτών ενέργειας γι' αυτές τις συχνότητες.

c. Εναλλακτικές του OFDM :

- i. Time-frequency packing. Το time-frequency packing προτείνεται για την καταστράγγιση των περιορισμών από την αυστηρή ορθογωνιότητα και το CP (Cyclic Prefix).
- ii. Nonorthogonal signals. Μη ορθογωνοποιημένα σήματα, όπως το UFMC (Universal Filtered Multicarrier), τα οποία δε χρειάζονται πρότερο συγχρονισμό των διανεμημένων εκπομπών.
- iii. Filterbank multicarrier. Επιτρέπουν την εκτίμηση μεγάλων καθυστερήσεων στη διάδοση και στα offsets των υψηλών συχνοτήτων του φορέα, πράγματα που για να τα κάνει το OFDM θα χρειαζόταν πολύ μακριά CPs.
- iv. Generalized frequency division multiplexing. Υιοθετεί μικρότερα CPs και ταιριάζει απόλυτα σε noncontiguous μπάντες συχνοτήτων.
- v. Single carrier. Η εκπομπή του single carrier κεντρίζει το ενδιαφέρον εξαιτίας της ανάπτυξης χαμηλής πολυπλοκότητας μη γραμμικών ισοσταθμιστών.
- vi. Tunable OFDM. Το OFDM πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του 5G. Αυτό απαιτεί κάποιες από τις παραμέτρους του να είναι προσαρμοζόμενες αντί να είναι σχεδιασμένες για το χειρότερο δυνατό σενάριο.

B. Cloud-based Networking :

- a. Network Function Virtualization : Το NFV ενεργοποιεί τις συναρτήσεις του δικτύου που είναι δεμένες με συσκευές για να τρέχουν σε cloud computing υποδομή στο data center. Αυτό δε συνεπάγεται ότι η υποδομή του NFV είναι ίδια με το εμπορικό ή επιχειρησιακό cloud. Είναι φυσικό ορισμένες απαιτήσεις των κινητών δικτύων, όπως ο διαχωρισμός του data plane να μην είναι εφαρμόσιμες στο εμπορικό cloud. Παρόλα αυτά όμως ο διαχωρισμός των λειτουργιών του δικτύου από το υλικό θα αποτελεί την αιχμή του δόρατος για τις μελλοντικές αρχιτεκτονικές.
- b. Software Defined Networking : Το SDN αποτελεί ένα αρχιτεκτονικό framework για τη δημιουργία έξυπνων δικτύων. Αποτελείται από μια ανοικτή διεπαφή ανάμεσα στις οντότητες των control και data planes και προσφέρει τη δυνατότητα προγραμματισμού των οντοτήτων από εξωτερικές εφαρμογές. Τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η λογική της αποσύνδεσης από την ευφυία του δικτύου, ώστε να διαχωριστούν οι software-based ελεγκτές, εκθέτοντας τις δυνατότητες του δικτύου μέσω μιας εφαρμογής και επιτρέποντας στην εφαρμογή να ζητά και να διαχειρίζεται υπηρεσίες που παρέχονται από το δίκτυο.

C. Energy Efficiency :

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η ενεργειακή αποδοτικότητα στο 5G πρέπει να βελτιωθεί περίπου στον ίδιο βαθμό με το ρυθμό δεδομένων ώστε να

διατηρηθεί η ενεργειακή κατανάλωση στα ίδια επίπεδα. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να γίνουν ορισμένες αλλαγές στους ακόλουθους τομείς :

- a. Resource allocation : Υιοθετώντας μια μέτρια μείωση των data rates που μπορεί να επιτευχθεί και διαφορετικά, μπορούν να εξοικονομηθούν μεγάλα αποθέματα ενέργειας.
- b. Network planning : Ενεργειακά αποδοτικό network planning περιλαμβάνει τακτικές που αφορούν τη μείωση του αριθμού των BSs για την κάλυψη ενός στόχου, και το σχεδιασμό προσαρμοσμένων BS sleep/wake αλγορίθμων για την εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι η ενέργεια θα εξοικονομείται κλείνοντας το BS όταν δεν έχει κανέναν ενεργό χρήστη ή απλά πολύ χαμηλή κίνηση.
- c. Renewable Energy : Μια άλλη πιθανότητα είναι ότι οι BS θα πρέπει να «κερδίζουν» την ενέργειά τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή.
- d. Hardware solutions : Τέλος θα πρέπει και οι μηχανικοί να βελτιώσουν το υλικό χρησιμοποιώντας low-loss κεραίες, σίγαση κεραιών και προσαρμοσμένο διαχωρισμό τομέων ανάλογα με τις κυκλοφοριακές απαιτήσεις.

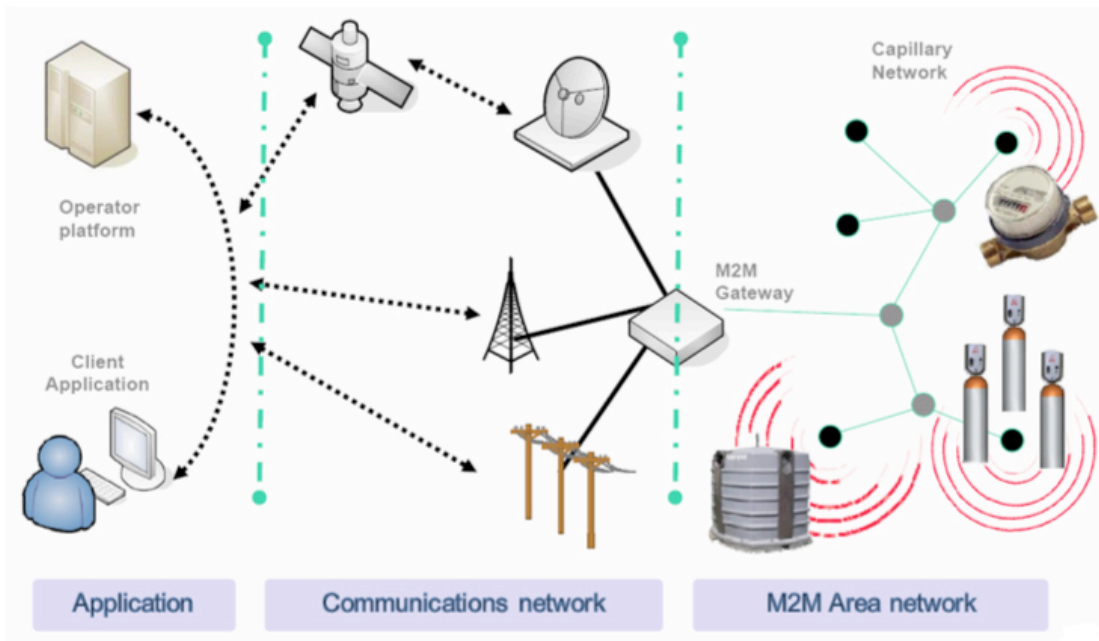
Η ραγδαία αυτή εξέλιξη των δικτύων και ιδιαίτερα οι υψηλές ταχύτητες που προσφέρουν, ανοίγουν διάπλατα το δρόμο για νέες εφαρμογές και υπηρεσίες. Μια από αυτές που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς έχει όλα τα εχέγγυα για να πρωταγωνιστήσει στο μέλλον είναι η επικοινωνία μηχανή με μηχανή (M2M/MTC) χωρίς την παρεμβολή του ανθρώπινου παράγοντα.

3. Machine Type Communication

Αρχικά με τον όρο M2M Communication αναφερόμαστε στην επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών, ενσωματωμένων επεξεργαστών, έξυπνων αισθητήρων και κινητών συσκευών με ελάχιστη έως καθόλου ανθρώπινη παρεμβολή. Το M2M αποτελεί ένα σύγχρονο επιχειρησιακό μοντέλο, το οποίο είναι βασισμένο στην τεχνολογία της τηλεμετρίας, δηλαδή στη συγκέντρωση διαφόρων πληροφοριών και στην αυτόματη μετάδοσή τους. Η διαφορά του M2M από τις τηλεμετρικές λύσεις είναι ότι οι δεύτερες χρησιμοποιούσαν τυχαίο ραδιοσήμα, ενώ οι M2M υπάρχουν δίκτυα. Κάτω από τον όρο των M2M συγκλίνουν πολλές τεχνολογίες, όπως το πρωτόκολλο IP, το RFID, οικιακά δίκτυα κ.ά., με αποτέλεσμα οι M2M να βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως στην ασφάλεια, στις μεταφορές, στην ηλεκτρονική υγεία (e-Health), στη βιομηχανία, στη διαχείριση εγκαταστάσεων και στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας.

Έχουν επίσης συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες αφορούν κυρίως την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών ανα κελί, όπως και διαφορετικών χαρακτηριστικών κίνησης των M2M επικοινωνιών, τη χαμηλή latency και την υψηλή αξιοπιστία, τη χαμηλή και πολύ χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, την υποστήριξη διαφορετικών προφίλ κινητικότητας και εν τέλει τη μη υποβάθμιση των human-to-human επικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά θέτουν και κάποιες αναφορικά με το κυψελωτό RAN (Radio Access Network), οι οποίες πρέπει να υπερκεραστούν και συνοψίζονται κυρίως στη συμφόρηση του καναλιού τυχαίας πρόσβασης, στη συνολική διαχείριση και διευθυνσιοδότηση των συσκευών, στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω των μακρών χρόνων αναμονής, στη διαχείριση της κινητικότητας και στους ελαφρούς και low-overhead μηχανισμούς ασφαλείας.

Ακολουθούν επιπλέον μια βασική αρχιτεκτονική, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 1. Οι M2M συσκευές μπορεί να αποτελούνται από αισθητήρες κίνησης, μετρητές θερμοκρασίας και άλλα, οι οποίοι δέχονται ερεθίσματα και μεταδίδουν δεδομένα μέσω του M2M gateway. Το επικοινωνιακό δίκτυο λειτουργεί ως υποδομή για τη διασύνδεση του M2M gateway και της εφαρμογής του τελικού χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω τηλεφωνικών γραμμών, είτε μέσω κυψελωτών δικτύων, είτε μέσω επικοινωνιακών δορυφόρων. Την κούρσα φαίνεται να την κερδίζουν ωστόσο τα κυψελωτά δίκτυα καθώς η ευρεία καλυψή τους, το συνεχώς μειωμένο κόστος τους, αλλά και η δυνατότητα να αποστέλλουν μεγάλο όγκο δεδομένων τακτικά, είναι ο λόγος που τα M2M γίνονται όλο και πιο διαδεδομένα.

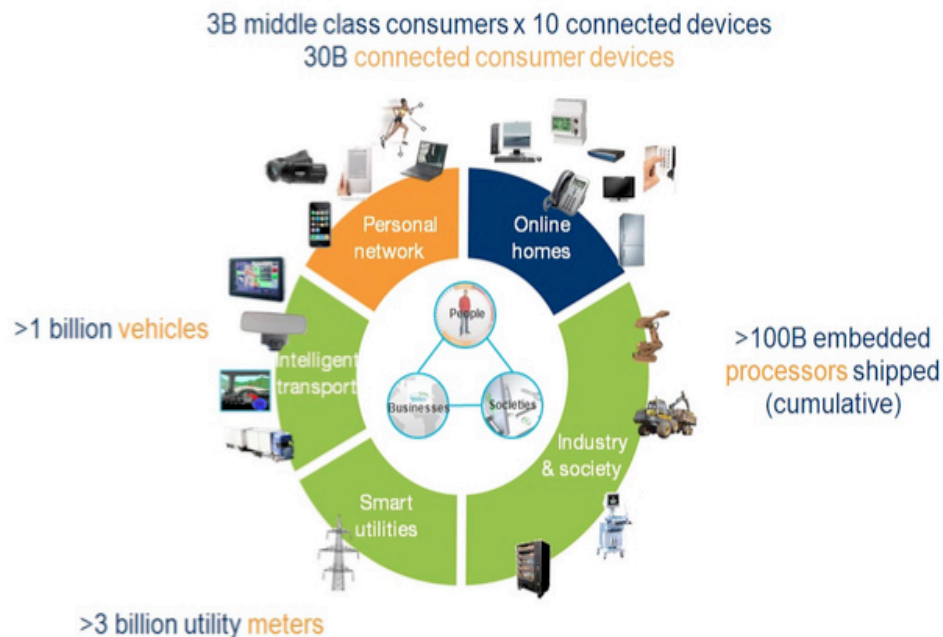


Εικόνα 1: Βασική M2M αρχιτεκτονική [4]

Αρκετοί οργανισμοί ενδιαφέρθηκαν επίσης για την προτυποποίηση των M2M, όπως η 3GPP, η 3GPP2, το WiMax Forum, ο IEEE, ο ETSI και η TTA. Αρχικά η 3GPP ασχολήθηκε κυρίως με την επικοινωνία των MTC συσκευών μεταξύ τους και την επικοινωνία αυτών με έναν ή περισσότερους MTC servers. Από την άλλη πλευρά η 3GPP2 ασχολήθηκε κυρίως με την επίδραση των υπάρχοντων αριθμημένων συστημάτων που χρησιμοποιούνται ως ταυτότητες εγγραφής για M2M συσκευές στο CDMA δίκτυο και σε βελτιώσεις για τις μελλοντικές M2M συσκευές. Ο IEEE επικεντρώθηκε στην επικοινωνία 802.16 M2M συσκευών μεταξύ τους και με έναν 802.16 M2M server και στην point-to-multipoint επικοινωνία μεταξύ 802.16 M2M συσκευών και 802.16 broadband προτύπου. Το WiMax Forum προσπάθησε να προωθήσει την υιοθεσία WiMax προϊόντων και υπηρεσιών στην κατεύθυνση των M2M, ενώ ο ETSI ασχολήθηκε με το μεσαίο στρώμα και η TTA ασχολήθηκε με τη δημιουργία και τη συντήρηση access-agnostic προτύπων για την παρακολούθηση και την αμφίπλευρη επικοινωνία μεταξύ έξυπνων συσκευών και άλλων συσκευών, εφαρμογών και δικτύων.

Η τεράστια απήχηση των M2M κέντρισε το ενδιαφέρον μεγάλων τεχνολογικών κολοσσών, όπως η Ericsson, η Siemens, η Nokia και η Motorola, οι οποίες έχουν επενδύσει πακτωλό χρημάτων σε projects στην κατεύθυνση των M2M. Αναλυτικότερα η Ericsson με το project «Ericsson's 50B programme» που επικοινωνείται στην Εικόνα 2, φιλοδοξεί μέχρι το 2020 να υπάρχουν περίπου 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές. Επιπλέον, η Ericsson με το πρόγραμμα SENSEI φιλοδοξούσε να διανείμει ένα πλήρως επεκτάσιμο αρχιτεκτονικό framework, το οποίο θα επέτρεπε την plug'n'play ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού παγκόσμια διανεμημένων WS&AN. Από την άλλη πλευρά, η ίδια εταιρία με το πρόγραμμα RUNES στόχευε στη δημιουργία μεγάλης κλίμακας ευρέως διαδεδομένων ετερογενών ενσωματωμένων συστημάτων, τα οποία λειτουργούν και προσαρμόζονται στο περιβάλλον. Στόχος ήταν η δημιουργία μιας μεσάζουσας πλατφόρμας με εργαλεία προγραμματιστών, η οποία θα επέτρεπε στους προγραμματιστές να επέμβουν στο περιβάλλον όπου χρειάζεται. Τέλος η Ericsson

με το πρόγραμμα CoCar, εκμεταλλεζόμενη τα 3G+ δίκτυα κινήθηκε στην κατεύθυνση της μεταφοράς τηλεματικών δεδομένων στον τομέα της αυτοκίνησης, συνδέοντας μεταξύ τους κυκλοφοριακές και αυτοκινητιστικές οντότητες στα πλαίσια μιας ασφαλέστερης μετακίνησης. Στον αντίποδα η Nokia εργάστηκε πάνω στα projects «Nokia M2M Gateway» και «Nokia GSM connectivity terminals» από τα οποία το πρώτο αναφερόταν σε ένα ενδιάμεσο στρώμα και το δεύτερο αναφερόταν σε M2M συσκευές με προηγμένες λειτουργίες. Η Siemens με το AyOne, δημιούργησε μια συσκευή M2M για ελεγκτικούς σκοπούς ενώ η Motorola προσέφερε πολλές και ποικίλες ασύρματες M2M οντότητες που επιτρέπουν την ασύρματη M2M επικοινωνία με διάφορες απομακρυσμένες συσκευές.



Εικόνα 2: Ericsson's 50B programme [4]

3.1. The Embedded Internet [5]

3.1.1. Motivations for M2M, their essential Elements and the IOT

Η τεχνολογία αποτελεί κύριο οδηγό των M2M. Τα WiFi δίκτυα, τα μικρά κελιά και τα δίκτυα peer-to-peer επεκτείνουν την κάλυψη των ασύρματων δικτύων μειώνοντας συνάμα και το κόστος για κάθε μεταφερόμενο bit. Επιπλέον, οι πάροχοι βρίσκονται κάτω από πρωτοφανή πίεση, προκειμένου να εισάγουν νέες υπηρεσίες που θα γεφυρώσουν το κενό που δημιουργεί η νέα αυτή τεχνολογία.

Δημιουργείται έτσι μία νέα τάση η οποία ακούει στο όνομα IOT και τα 3 χαρακτηριστικά της είναι τα εξής :

- Μια συνέχεια από low-cost/low-power μέχρι compute-rich/high-performance συσκευές.
- Εξαιρετικά επεκτάσιμη συνδεσιμότητα.
- Cloud-based μαζική διαχείριση συσκευών και υπηρεσιών.

Η ασφάλεια αποτελεί προτεραιότητα για τα M2M, καθώς ένα κενό στο δίκτυο που ενώνει δισεκατομμύρια συσκευές είναι αδιανόητη. Για το λόγο αυτό αναμένεται να δημιουργηθούν «security-on-chip» λύσεις. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των M2M είναι η «zero-touch» διαχείριση και η υπερφόρτωση πληροφοριών, ενώ από την άλλη υπάρχει η εξέλιξη των M2M στη βέλτιστη διανομή της νοημοσύνης σε συσκευές και cloud. Εν τέλει χρειάζεται να γίνει ένας συγκερασμός της παλιάς και της νέας τεχνολογίας αναφορικά με τα M2M, στον οποίο τα M2M gateways και τα aggregation points θα παίζουν κομβικό ρόλο στο να φέρουν τους αισθητήρες μικρού εύρους online και να εξασφαλίσουν διασυνδεσιμότητα με διαφορετικά είδη ασύρματων τεχνολογιών.

Διαφαίνεται πως το οικοσύστημα των M2M θα είναι πολύ πολύπλοκο στο μέλλον και θα επεκτείνεται σε πολλές βιομηχανίες. Οι αγορές θα χρειάζεται να στηριχθούν σε ορισμένα βιομηχανικά πρότυπα, ώστε να επιτύχουν μεγάλη ανάπτυξη, ενώ από την άλλη πλευρά η βιομηχανία θα πρέπει να βελτιστοποιήσει την air interface, τη διαχειρισσιμότητα των συσκευών, την αρχιτεκτονική δικτύου και την ασφάλεια.

3.1.2. M2M Models

Κύριως σκοπός των M2M είναι να προσθέσουν συνδεσιμότητα στο κάθε τι γύρω μας. Για παράδειγμα έξυπνα σπίτια που θα εξοικονομούν από μόνα τους ενέργεια, έξυπνα αυτοκίνητα που θα αναλύουν διάφορες παραμέτρους και θα αποτρέπουν σε πραγματικό χρόνο τα ατυχήματα, αλλά και αισθητήρες σώματος, οι οποίοι θα καταγράφουν διάφορα ζωτικά στοιχεία και θα εκπέμπουν «SOS» όταν η ζωή του ατόμου βρίσκεται σε κίνδυνο.

3.1.2.1. Smart Grid

Το Smart Grid ενσωματώνει επικοινωνιακές δυνατότητες συνυφασμένες με τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που αποσκοπούν στην αυτόματη καταγραφή και έλεγχο. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούνται πόροι. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση ενός οικιακού αισθητήρα για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, ο οποίος συλλέγει της πληροφορίες και μέσω του 3G/4G δικτύου στον M2M server.

3.1.2.2. Vehicular Telematics

Όσον αφορά τις M2M εφαρμογές στα αυτοκίνητα, αυτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Ασφάλεια και προστασία
- Πληροφόρηση και καθοδήγηση
- Διαγνωστικά
- Ψυχαγωγία

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Αυτόματη Ειδοποίηση Ατυχήματος, η οποία χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό αισθητήρων θα μπορεί να διανείμει πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία του ατυχήματος και το μέγεθος της ζημιάς, ενώ ταυτόχρονα θα μπορεί να ειδοποιήσει και τις Πρώτες Βοήθειες. Από την άλλη στον τομέα της πληροφόρησης θα μπορεί να ενημερώνεται ο οδηγός σχετικά με σημεία ενδιαφέροντος και άλλες τοπικές πληροφορίες ανάλογα με την τοποθεσία που βρίσκεται, ενώ τα διαγνωστικά θα μπορούν να εκμεταλλεύονται τις πληροφορίες

από τους διάφορους αισθητήρες και να ενημερώνουν τον οδηγό για τυχόν επισκευές που χρειάζεται το όχημα.

Έτσι λοιπόν γίνεται σαφές ότι στην αυτοκίνηση χρειαζόμαστε έναν συνδυασμό μικρού εύρους και χαμηλής κατανάλωσης αισθητικές διαδικασίες και τοπική συνδεσιμότητα για το αυτοκίνητο και μεγάλου εύρους και χαμηλής καθυστέρησης ασύρματη πρόσβαση για αναφορές και πρόσβαση σε διαδικτυακό περιεχόμενο.

3.1.2.3. Healthcare

Στον τομέα της υγείας κύριος στόχος είναι η βελτίωση της φροντίδας του ασθενή και η μείωση του κόστους. Για το λόγο αυτό γίνονται μεγάλα άλματα στον τομέα της τηλεϊατρικής και κυρίως στην απομακρυσμένη παρακολούθηση του ασθενή. Αυτό συνεπάγεται με το γεγονός ότι ο ασθενής θα φοράει ορισμένους βιοαισθητήρες που θα συλλέγουν δεδομένα σχετικά με την υγεία του και θα τα αποστέλλουν σε μια M2M συσκευή, όπως το κινητό τηλέφωνο του ασθενή, η οποία θα λειτουργεί ως aggregator και θα προωθεί τα δεδομένα στο cloud. Σε καταστάσεις ανάγκης θα μπορεί η M2M συσκευή να παρέχει πληροφορίες αναφορικά με την κλινική κατάσταση του ασθενή στο δρόμο προς το νοσοκομείο, επιτρέποντας στους γιατρούς να είναι κατάλληλα προετοιμασμένοι για το περιστατικό.

3.1.3. Architecture and Connectivity

Το εύρος που καλύπτουν τα M2M μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε μικρό χρονικό διάστημα από τώρα θα υπάρχει μια έκρηξη στις M2M συσκευές με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν θέματα χωρητικότητας στο δίκτυο. Λύση σε αυτό προσφέρουν οι δύο ιεραρχικές αρχιτεκτονικές δικτύου για επεκτάσιμη συνδεσιμότητα και υψηλή χωρητικότητα.

3.1.3.1. Scalable Connectivity

Μια M2M συσκευή μπορεί να συνδεθεί απευθείας σε έναν M2M server μέσω μιας WAN σύνδεσης ή καλύτερα μέσω ενός M2M gateway. Το gateway είναι μια συσκευή M2M η οποία συλλέγει και επεξεργάζεται τα δεδομένα από απλούστερες M2M συσκευές και διαχειρίζεται τη λειτουργία τους. Πολλές όμως συσκευές απαιτούν συνδεσιμότητα με τις τελικές συσκευές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω peer-to-peer συνδέσεων σε πολλαπλά επίπεδα τις ιεραρχίας ανάλογα με τις απαιτήσεις σε λανθάνουσα καθυστέρηση και τον τύπο της πληροφορίας που μοιράζεται.

3.1.3.2. High Capacity

Η ιεραρχική αρχιτεκτονική περιλαμβάνει multiple tiers και multiple radios.

Multitier: Στην ιεραρχία αυτή μεγάλα κελιά παρέχουν μια ευρεία κάλυψη στις M2M συσκευές και υποστηρίζουν μεγάλη κινητικότητα, ενώ τα μικρότερα στοιχεία του δικτύου όπως τα pico/femto access points φέρνουν τη συνδεσιμότητα πιο κοντά στις συσκευές βελτιώνοντας την αξιοπιστία και αυξάνοντας τη χωρητικότητα του συστήματος.

Multiradio: Πολλαπλής πρόσβασης δίκτυα βρίσκονται ενσωματωμένα και διαχειρίζονται ως ένα μέρος του μεμονωμένου ιεραρχικού δικτύου. Το επιπλέον φάσμα και η συνδεσιμότητα που είναι διαθέσιμα καταμήκος διαφόρων δικτύων μπορούν να συνεργαστούν ώστε να βελτιωθεί η χωρητικότητα του δικτύου και η ποιότητα των υπηρεσιών.

3.1.4. Air Interface Optimizations

Εκτός από την αρχιτεκτονική χρειάζονται να γίνουν και ορισμένες παρεμβάσεις αναφορικά με το air interface, ώστε να υποστηρίζονται αποδοτικά τα χαρακτηριστικά των M2M. Αυτές αφορούν κυρίως τα εξής :

- **Mass Device Transmission**
- **High Reliability**
- **Enhanced Access Priority**
- **Extremely Low Power Consumption**
- **Small Burst Transmission**
- **Low/No Mobility**
- **Monitoring and Security**
- **Addressing extremely large number of Devices**
- **Group Control**
- **Time-Controlled Traffic**
- **Time-Tolerant Traffic**
- **One-way Data Traffic**
- **Extremely low Latency**
- **Infrequent Traffic**

3.2. Home M2M Networks [6]

Τα Home M2M δίκτυα αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία M2M δικτύων και από πολλούς θεωρούνται ως μια υπερκατηγορία των M2M επικοινωνιών, καθώς περιλαμβάνουν στοιχεία όπως το smart grid, την υγεία, την ασφάλεια κ.ά.. Τις περισσότερες φορές οι συσκευές αυτές είναι μικρές και φθηνές, πράγμα που θέτει πολλούς περιορισμούς σε τομείς όπως η ενέργεια, το εύρος ζώνης, ενώ ταυτόχρονα πυροδοτούν πολλές προκλήσεις στο σχεδιασμό των M2M Home Networks αναφορικά με τις παρεμβολές, τη δυναμική του καναλιού, τους πόρους, τη διαφορετικότητα των συσκευών, την αυτοοργάνωση, την υποστήριξη του QoS και την ασφάλεια.

3.2.1. Home Network Architecture

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 στο κέντρο του δικτύου βρίσκεται ένα κεντρικό gateway (Home GateWay, HGW), το οποίο διαχειρίζεται ολόκληρο το δίκτυο και ενώνει το δίκτυο του σπιτιού με τον έξω κόσμο. Όλες οι λειτουργίες δικτύου, όπως ο έλεγχος πρόσβασης και η διαχείριση της ασφάλειας βρίσκονται υλοποιημένα μέσα στο HGW. Κάθε υποδίκτυο έχει το δικό του sub-gateway (SGW), το οποίο συνδέει το υποδίκτυο με το HGW και κατ' επέκταση με το υπόλοιπο δίκτυο. Τα M2M Home Networks αποτελούνται από 3 διαφορετικά υποδίκτυα, τα σωματικά (body area), τα προσωπικά (personal area) και τα τοπικά (local area).

3.2.1.1. Body area subnetworks

Τα υποδίκτυα αυτά γνωστά και ως (BANs) προσφέρουν ανθρωποκεντρικές υπηρεσίες ($\leq 2\mu$). Χωρίζονται σε δύο συστήματα τα intra-BAN και τα inter-BAN. Το πρώτο αναφέρεται στην επικοινωνία ανάμεσα στους αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στο ανθρώπινο σώμα, ενώ το δεύτερο αφορά την επικοινωνία των BANs με τα Aps.

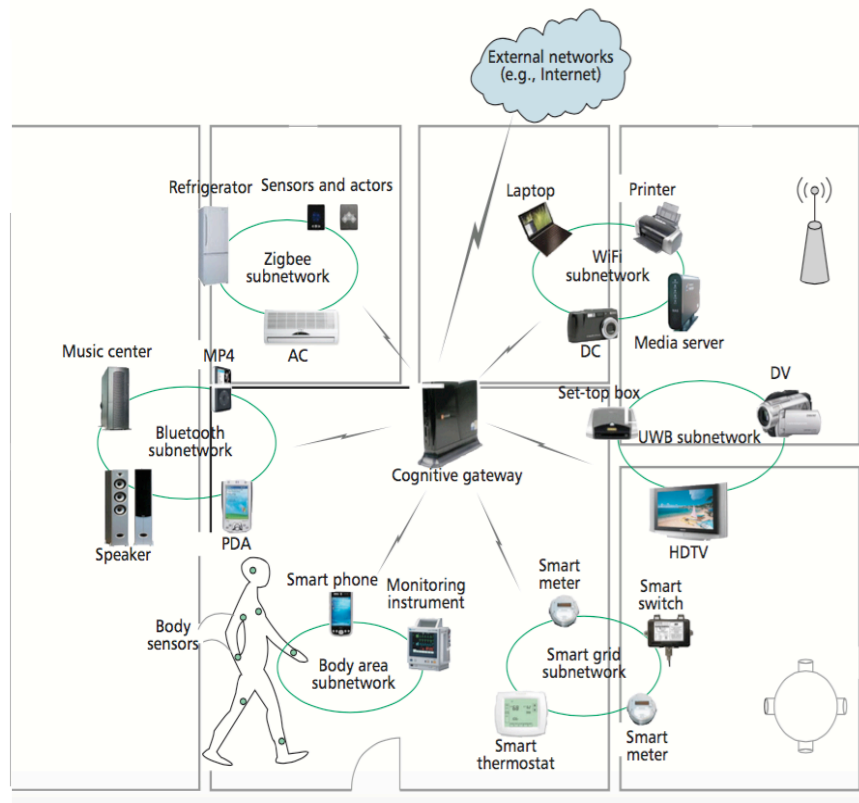
3.2.1.2. Personal Area subnetworks

Τα υποδίκτυα αυτά στοχεύουν μικρού εύρους εφαρμογές στα πλαίσια του σπιτιού ($\leq 10\mu$). Αποτελούνται κυρίως από μετρικά συστήματα τα οποία προσφέρουν ένα πιο αποτελεσματικό και ενεργειακά αποδοτικό power-grid. Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής αποτελεί το Zigbee μια ασύρματη δικτυακή τεχνολογία που χαρακτηρίζεται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρού εύρους μετάδοσης. Λειτουργεί στα 2,4 GHz και το MAC επίπεδο του ορίζει δύο μεθόδους πρόσβασης στο κανάλι, beacon-enabled και beaconless. Στην πρώτη υπάρχει ένας συνδιοργανωτής που δημιουργεί και μεταδίδει beacons για συγχρονισμό, ενώ αντίθετα στη δεύτερη οι συσκευές χρησιμοποιούν το CSMA (Carrier Sense Multiple Access) συστημά τους με την αποφυγή σύγκρουσης (CSMA/CA) και συναγωνίζονται για είσοδο στο κανάλι.

Το Zigbee ορίζει δύο τύπους προφίλ εφαρμογών για τα Home M2M Networks. Το home automation public application profile, το οποίο ορίζει τις ιδιότητες των συσκευών και τις εντολές των εφαρμογών για το οικιακό περιβάλλον και το Smart Energy profile, το οποίο παρέχει μια αμφίπλευρη επικοινωνιακή δομή βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, την ευελιξία και την αξιοπιστία.

3.2.1.3. Local Area subnetworks

Αναφέρονται σε επικοινωνίες μεταξύ των υποδικτύων και του εξωτερικού δικτύου ή ανάμεσα στις μηχανές του οικιακού δικτύου. Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι το IEEE 802.11, το οποίο με τις προσθήκες του IEEE 802.11n και την προσθήκη MIMO φτάνει ταχύτητες μέχρι και 600Mb/s, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αυξάνεται το throughput. Τα υποδίκτυα αυτά βοηθούν κυρίως στην καλύτερη οργάνωση και ανάπτυξη του Smart Grid.



Εικόνα 3 : Home M2M Network Architecture [6]

Παρατηρούμε λοιπόν ότι μέσα σε ένα οικιακό M2M δίκτυο υπάρχουν πολλά μικρότερα ετερογενή υποδίκτυα, τα οποία θα πρέπει να συνεργάζονται αρμονικά τόσο μεταξύ τους, όσο και με το κεντρικό δίκτυο.

3.2.2. Resource sharing in Home M2M

Εκτός από τα παραπάνω η μεταφορά πολυμεσικού περιεχομένου και η πρόβλεψη του QoS αποτελούν σημαντικά στοιχεία στα οικιακά δίκτυα. Για το λόγο αυτό έχουν οριστεί 3 διαφορετικά πρότυπα, τα οποία είναι το UPnP (Universal Plug'n'Play), το DLNA (Digital Living Network Alliance) και το IGRS (Intelligent Grouping and Resource Sharing).

3.2.2.1. UPnP

Αποτελεί μια τεχνολογία του επιπέδου εφαρμογής με την υποστήριξη στοίβας TCP/IP πρωτοκόλλου στα χαμηλότερα στρώματα. Υπάρχουν 2 είδη συσκευών στο UPnP, οι ελεγκτές (CDs) και τα σημεία ελέγχου (CPs). Τα πρώτα αποτελούν φυσικούς ή λογικούς κόμβους για την παροχή υπηρεσιών, ενώ τα δεύτερα ανακαλύπτουν και διαχειρίζονται συσκευές. Αναφορικά με την αρχιτεκτονική του QoS του UPnP, αυτή αποτελείται από 3 οντότητες : QoS manager (QM), QoS policy holder (QPH) και QoS device (QD). Ο QM είναι η κεντρική μονάδα QoS και αρμόδιος για την ανακάλυψη και διαχείριση πόρων και ελέγχου των QDs και QPHs.

Το QPH αποθηκεύει τις πολιτικές QoS του χρήστη και το QD προσφέρει την διεπαφή UPnP που χρειάζεται κάθε συσκευή για να συνδεθεί και κάνει και την παραμετροποίηση. Διαχειρίζεται επίσης την κυκλοφορία και παρέχει στο QM τις πληροφορίες αναλογικά με τις συνδέσεις, τις δυνατότητες κ.α..

3.2.2.2. DLNA

Το DLNA αποτελεί ένα ενδιάμεσο στρώμα βασισμένο στο framework του κανονικού δικτύου και υιοθετεί μια UPnP AV αρχιτεκτονική για τη διαχείριση των πολυμέσων και τον έλεγχο των δικτυακών συσκευών. Ορίζει επίσης δύο κατηγορίες συσκευών : digital media servers (DMSs), οι οποίοι είναι αρμόδιου για την εγγραφή, την απόκτηση και την αποθήκευση του περιεχομένου και digital media players (DMPs), οι οποίοι είναι αρμόδιοι για την εύρεση και την αναπαραγωγή του. Η QoS αρχιτεκτονική του συνοψίζεται σε 4 επίπεδα DLNA QoS-3, DLNA QoS-2, DLNA QoS-1, DLNA QoS-0 από το υψηλότερο στο χαμηλότερο και το καθένα από αυτά ένα σετ από WiFi multimedia (WMM) και differentiated services codepoint (DSCP) προτεραιότητα στα ασύρματα δίκτυα.

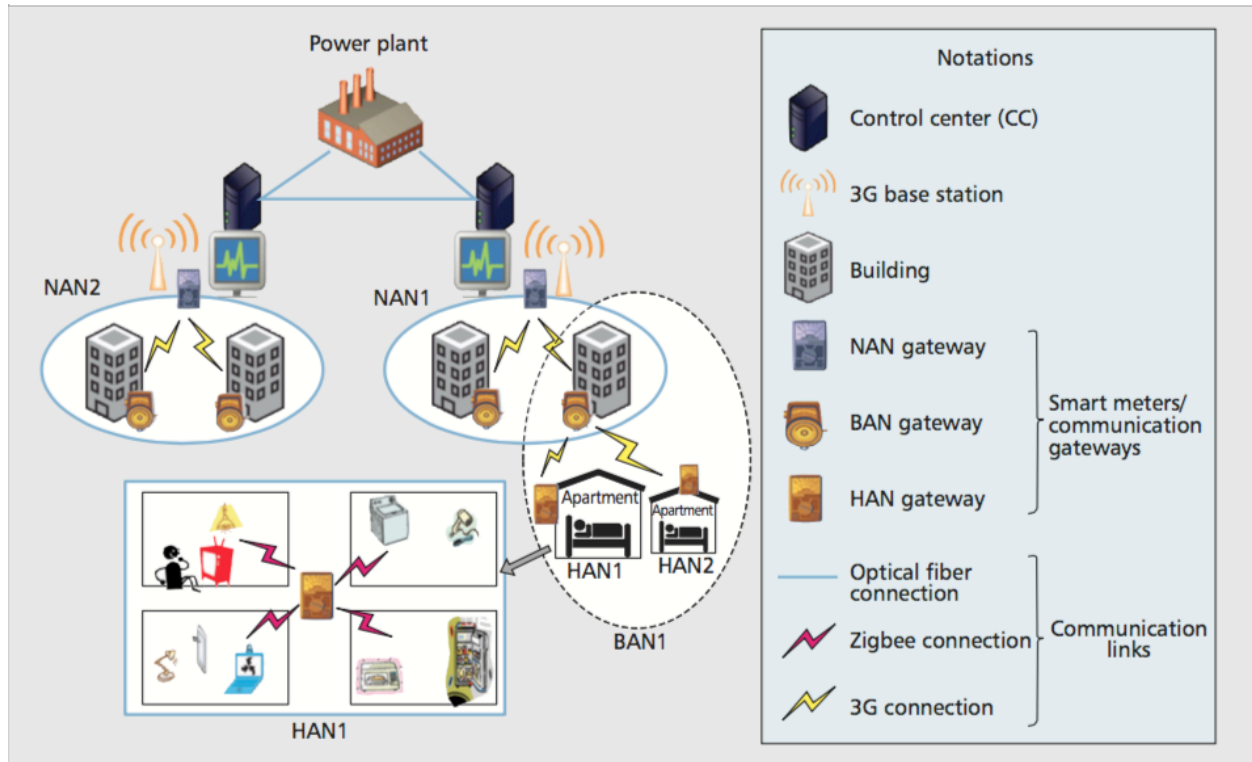
3.2.2.3. IGRS

Προσφέρει μοίρασμα των πόρων και συνεργασία των εφαρμογών ανάμεσα σε συσκευές. Αποτελείται από πρωτόκολλα, προφίλ εφαρμογών και βασικές εφαρμογές, ενώ λαμβάνει πολύ σοβαρά υπ' όψιν του θέματα ασφαλείας. Ορίζει δύο επίπεδα πρωτοκόλλων ασφαλείας: tunnel ανάμεσα σε συσκευές και session ανάμεσα σε χρήστες και υπηρεσίες. Χωρίζει τους μηχανισμούς ασφαλείας σε 4 επίπεδα : μηχανισμό επιβεβαίωσης ταυτότητας και μηνύματος, επικυρωποίηση ταυτότητας και μετάδοση κρυπτογραφημένου μηνύματος, επικυρωποίηση ταυτότητας ή μετάδοση κρυπτογραφημένου μηνύματος και μετάδοση κρυπτογραφημένου μηνύματος και υπογραφής μηνύματος. Η QoS αρχιτεκτονική του αποτελείται από 3 κλάσεις υπηρεσιών: IGRS QoS device (QD), IGRS QoS management (QM) και IGRS QoS policy holder (QPH).

3.3. M2M Communications in Smart Grid [7]

Η εξέλιξη των M2M βοήθησε στην ανάπτυξη ενός framework έξυπνου πλέγματος ενέργειας γνωστό ως Smart Grid, με σκοπό την παραγωγή, διανομή και κατανάλωση της ενέργειας με έναν πιο αποδοτικό, έξυπνο τρόπο και σαφέστατα με υψηλές προδιαγραφές ασφάλειας δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές αυτόνομες και συνάμα κρίσιμες λειτουργίες που απαιτούν ιδιωτικότητα και ασφάλεια. Τα σημερινά δίκτυα βασίζονται κυρίως στις τεχνολογίες του synchronous optical network (SONET) και τις synchronous digital hierarchy (SDH), με αποτέλεσμα να μην μπορούν να καλύψουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις σε bandwidth, μεταφορά της κίνησης IP και τις ανάγκες για μεγαλύτερη ευελιξία και αυτοματισμούς. Για τον λόγο αυτό οι πάροχοι έχουν επενδύσει στην ανάπτυξη νέων πρωτοποριακών δικτύων, των οποίων την αρχιτεκτονική αναλύουμε στη συνέχεια.

3.3.1. Smart Grid Architecture



Εικόνα 4 : Smart Grid Architecture [7]

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει μια πρότυπη αρχιτεκτονική για το SG (Signaling Gateway), στην οποία το σύστημα για την παραγωγή και τη διανομή ενέργειας είναι ξεχωριστό από σύστημα επικοινωνίας. Η ενέργεια μεταφέρεται από το εργοστάσιο στους τελικούς καταναλωτές μέσα από 2 στοιχεία, τους transmission substations (TS) που βρίσκονται κοντά στο εργοστάσιο και από έναν αριθμό distribution substations (DS). Οι TS είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά υψηλής τάσης ενέργειας προς τους DSs, ενώ οι δεύτεροι είναι αρμόδιοι για τη μετατροπή της ενέργειας από υψηλή σε μετρια τάση. Στη συνέχεια το ρεύμα το προωθούν στους διανεμητές των κτηρίων, οι οποίοι το μετατρέπουν σε ρεύμα χαμηλής τάσης, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις συσκευές. Η αρχιτεκτονική αυτή ωστόσο δε γίνεται αν εφαρμοσθεί στα επικοινωνιακά δίκτυα καθώς έχουν διαφορετικές απαιτήσεις από τα προηγούμενα.

Η αρχιτεκτονική των επικοινωνιών αναφορικά με το δίκτυο διανομής χωρίζεται σε 3 κατηγορίες: τα γειτονικά δίκτυα (NAN), τα κτηριακά δίκτυα (BAN) και τα οικιακά δίκτυα (HAN). Κάθε DS είναι προορισμένο να καλύπτει μια γειτονιά. Τα NAN αποτελούνται από έναν αριθμό BAN και αυτά με τη σειρά τους από έναν αριθμό διαμερισμάτων.

3.3.1.1. Neighbourhood Area Network

Περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα 3ης γενιάς (3G) BS και έναν αριθμό από BANs. Το framework του 3G που χρησιμοποιείται για το SG είναι ξεχωριστό από αυτό που χρησιμοποιείται εμπορικά για το Internet και αυτό γίνεται για να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου. Επίσης βοηθάει στην αποφυγή των απειλών ασφαλείας που προκύπτουν από το Internet και θα έχουν επίδραση στις ευαίσθητες στην καθυστέρηση SG επικοινωνίες.

3.3.1.2. Building Area Network

Αποτελείται από διάφορα διαμερίσματα καθένα από τα οποία έχει τα δικά τους HANs. Το BAN smart meter/GW βρίσκεται στον παροχέα ενέργειας του κτηρίου και μπορεί να παρακολουθεί τις ανάγκες για ενέργεια και τη χρήση από τους κατοίκους. Η επικοινωνία BAN-HAN γίνεται μέσω 3G.

3.3.1.3. Home Area Network

Είναι ένα υποσύστημα μέσα στο SG, το οποίο διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις απαιτήσεις για ενέργεια των τελικών χρηστών. Το HAN GW επικοινωνεί με τις υπόλοιπες συσκευές του σπιτιού δημιουργώντας έτσι ένα M2M δίκτυο.

3.3.2. Smart Grid Requirements

Οι απαιτήσεις του SG αφορούν κυρίως δύο παράγοντες, την λανθάνουσα καθυστέρηση της επικοινωνίας και τον μεγάλο όγκο των μηνυμάτων. Σε περίπτωση που το CC χάσει κάποια είσοδο από το HAN GW αυτό μπορεί να επηρεάσει κάποια σημαντική απόφασή του. Από την άλλη πλευρά συνωστισμός στο BAN GW συνεπάγεται με καθυστέρηση στην αποστολή πακέτου προς το NAN GW και το CC. Παρότι βέβαια η λανθάνουσα καθυστέρηση των ολίγων milliseconds δεν είναι εφικτή σε μεγάλης κλίμακας SGs, πρέπει να γίνουν ενέργειες προς την κατεύθυνση της όσο το δυνατόν μικρότερης latency ξεκινώντας από το επίπεδο του HAN. Επίσης το δίκτυο του SG πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί περισσότερα μηνύματα ταυτόχρονα χωρίς αυτό να έχει επίδραση στη latency. Ωστόσο, ο μεγάλος όγκος δεδομένων θα επηρεάσει σίγουρα το απαιτούμενο bandwidth και για το λόγο αυτό πρέπει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο αριθμός των μηνυμάτων που λαμβάνει κάθε HAN GW από τις συσκευές, ώστε ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων που λαμβάνεται από το BAN GW να μην είναι υπερβολικός.

3.3.3. Topologies for HAN

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τα HANs είναι οι IEEE 802.15.3a (Ultra WideBand), IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth), IEEE 802.15.4 (ZigBee).

Το UWFD εξελίχθηκε για εφαρμογές δύο τύπων. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις high-data rate επικοινωνίες, τυπικά πάνω από 1Mb/s και η δεύτερη κατηγορία αφορά τα data rates κάτω από 1Mb/s. Το μειονέκτημά του έχει να κάνει με τις υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια με αποτέλεσμα η IEEE να διαλύσει το γκρουπ που το ανέπτυξε με συνέπεια να μην υπάρχει υποστήριξη σε πιθανή επιλογή του στο μέλλον για τις επικοινωνίες στο SG HAN.

Το Wifi αφορά εφαρμογές υψηλής μετάδοσης δεδομένων καλύπτοντας μεγάλες περιοχές. Αποτελεί επίσης το πιο αποδεκτό πρωτόκολλο για επικοινωνίες εντός οικιακού δικτύου, ενώ παράλληλα έχει και υποστήριξη για IPv6 διευθυνσιοδότηση. Μοναδικό μειονέκτημα είναι όπως και το UWD (Ultra Wideband) η υψηλή κατανάλωση ενέργειας γεγονός που το καθιστά μη πρακτικό για M2M επικοινωνίες.

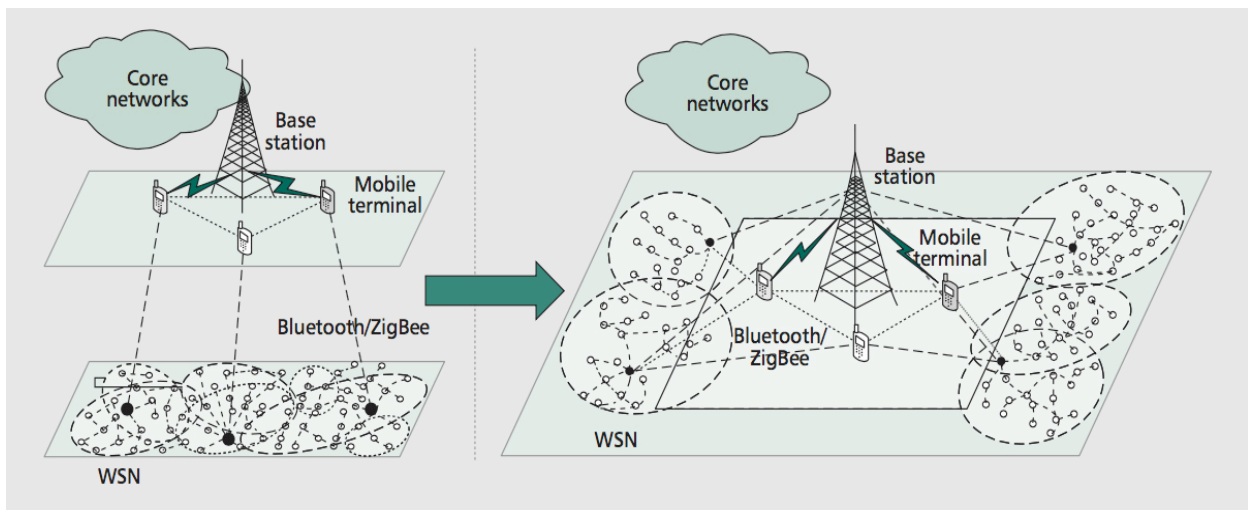
Το Bluetooth είναι διάσημο για τη μετάδοση φωνής, δεδομένων και ήχου σε μικρή απόσταση. Υποστηρίζει IP διευθυνσιοδότηση κι έτσι μπορεί να υιοθετηθεί από τα SG HANs. Είναι κατάλληλο για χαμηλής ενέργειας και χαμηλού ρυθμού δεδομένων εφαρμογές και μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και 8 συσκευές ταυτόχρονα. Στο βωμό της επεκτασιμότητας τα HANs χρειάζονται έναν αριθμό από piconets, καθένα από τα οποία έχει μια master M2M συσκευή και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω αυτής

της συσκευής. Η επικοινωνία όμως αυτή έχει ως συνέπεια την αύξηση του latency. Επίσης ένα ακόμα μειονέκτημα είναι το περιοδικό ξύπνημα και ο συγχρονισμός της κύριας συσκευής του κάθε riconet.

Το ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο εφαρμοσμένο σε πολλά οικιακά δίκτυα συμπεριλαμβανομένων των HANs. Αφορά κυρίως ασύρματες συσκευές με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής. Οι συσκευές του ZigBee χρειάζονται μόνο μερικά milliseconds για να εξέλθουν από την κατάσταση ύπνου συγκριτικά με το WiFi και το Bluetooth. Επιπλέον ακόμα και οι ZigBee συσκευές που χρησιμοποιούν CSMA/CA δε χρειάζονται προγραμματισμένα ειδικά γεγονότα ξύπνηματος, ώστε να επικοινωνήσουν και να διατηρήσουν τον συγχρονισμό με τα HAN GW. Τέλος αποτελεί την ιδανική επιλογή για τα SG HANs καθώς έχει τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας ακόμα και σε εύρος 10 – 100 μέτρων.

3.4. Different Types of Convergences [8]

Οι M2M επικοινωνίες όπως αναφέραμε προηγουμένως, χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς και είναι προσανατολισμένες προς τη μεριά των εφαρμογών. Κάτω από διαφορετικά δίκτυα οι M2M επικοινωνίες μπορούν να γίνουν ξεχωριστά αντιληπτές. Αυτό, πιο αναλυτικά σημαίνει ότι οι M2M επικοινωνίες που χρησιμοποιούν το WLAN εφαρμόζονται σε κατοικημένες περιοχές και κτήρια και αυτόματες γραμμές παραγωγής. Αντίθετα, τα WSNs (Wireless Sensor Network) υποστηρίζουν ποικιλία έξυπνων εφαρμογών, έχοντας ως μειονέκτημα τη μικρή κινητικότητα και τη μικρή κάλυψη. Αντίθετα, τα MCNs (Mobile Cellular Networks) έχουν τη δυνατότητα μεγάλης κινητικότητας και της μεγάλης κάλυψης αλλά η υλοποίησή τους και η διαχείρισή του είναι πολύπλοκη και ακριβή. Πιστεύεται λοιπόν ότι η σύγκλιση των MCN και WSN μπορεί να θέσει τις υποδομές για καλύτερες ασύρματες υπηρεσίες και περισσότερο δεδομενοκεντρικές εφαρμογές.



Εικόνα 5 : Network Convergence [8]

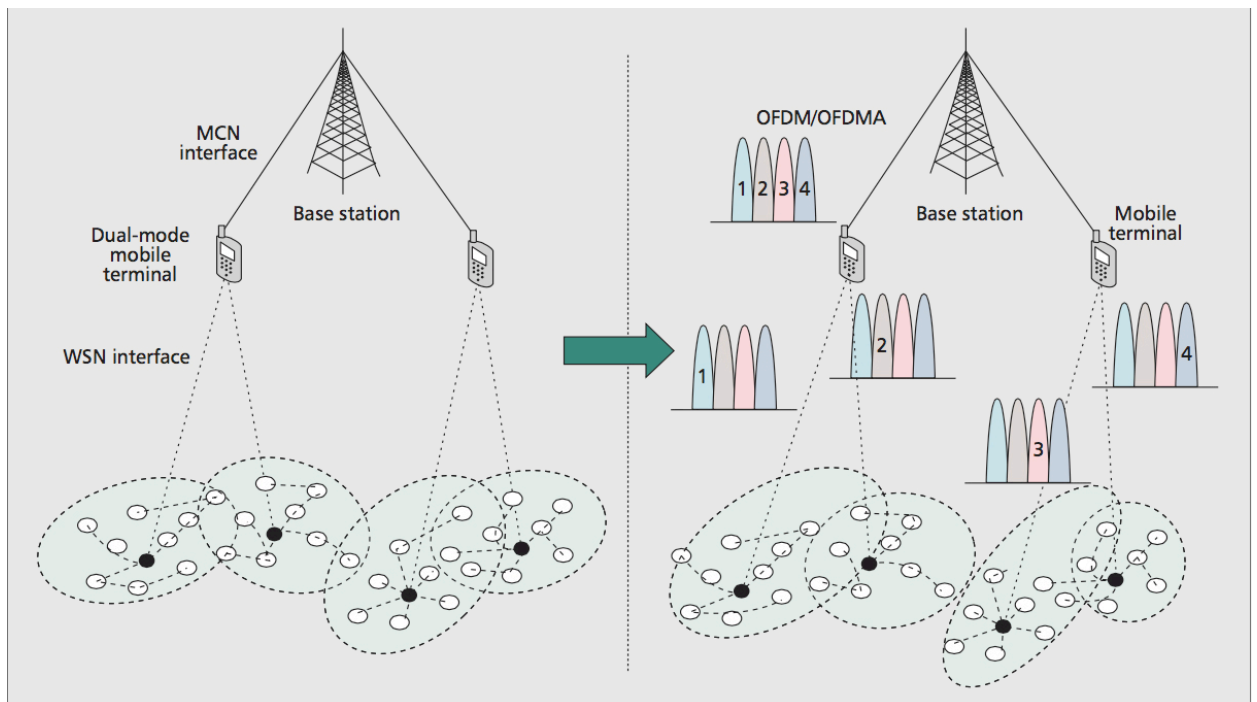
3.4.1. Network Convergence

Όπως φαίνεται στο αριστερό κομμάτι της Εικόνας 5 η αρχιτεκτονική των ενσωματωμένων MCN και WSN είναι ιεραρχική. Το data detecting plane αποτελείται από ένα σύνολο από ασύρματους κόμβους αισθητήρων, ενώ το system control plane το συνθέτουν το gateway και ο BS. Το gateway μπορεί να παρέχει πρόσβαση στους WSN κόμβους και να προωθήσει τα δεδομένα στους servers. Επικοινωνία WSN και MCN επιτυγχάνεται μέσα από το κανάλι δεδομένων του gateway.

Στη συγκλίνουσα αρχιτεκτονική, η αρχική αρχιτεκτονική μετατρέπεται από layered σε flat, προκειμένου να μειωθεί η ιεραρχική ανταλλαγή σήματος ανάμεσα στα δύο δίκτυα. Όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα της Εικόνας 5 οι κόμβοι αισθητήρων έχουν τη δυνατότητα να ακούνε τη σηματοδότηση του downlink από τα BS του MCN, με αποτέλεσμα τα MCN να μπορούν να ελέγχουν και να διαχειρίζονται απευθείας το WSN. Στη συγκλίνουσα αρχιτεκτονική η επίδραση στο MCN και η πολυπλοκότητα που προστίθεται στους κόμβους των αισθητήρων πρέπει να αξιολογηθεί, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ισορροπία ανάμεσα σε κόστος και επιδόσεις. Οι πληροφορίες που αφορούν την αυθεντικοποίηση μπορούν να βρίσκονται στο WSN gateway, το οποίο θα έχει ήδη αυθεντικοποιηθεί στο MCN. Επιπλέον θα πρέπει να δημιουργηθούν και νέα συστήματα χρονικής αναδιοργάνωσης, δεδομένου ότι το σύστημα πολλαπλής πρόσβασης στο WSN είναι contention based, σε αντίθεση με το MCN που είναι scheduling based.

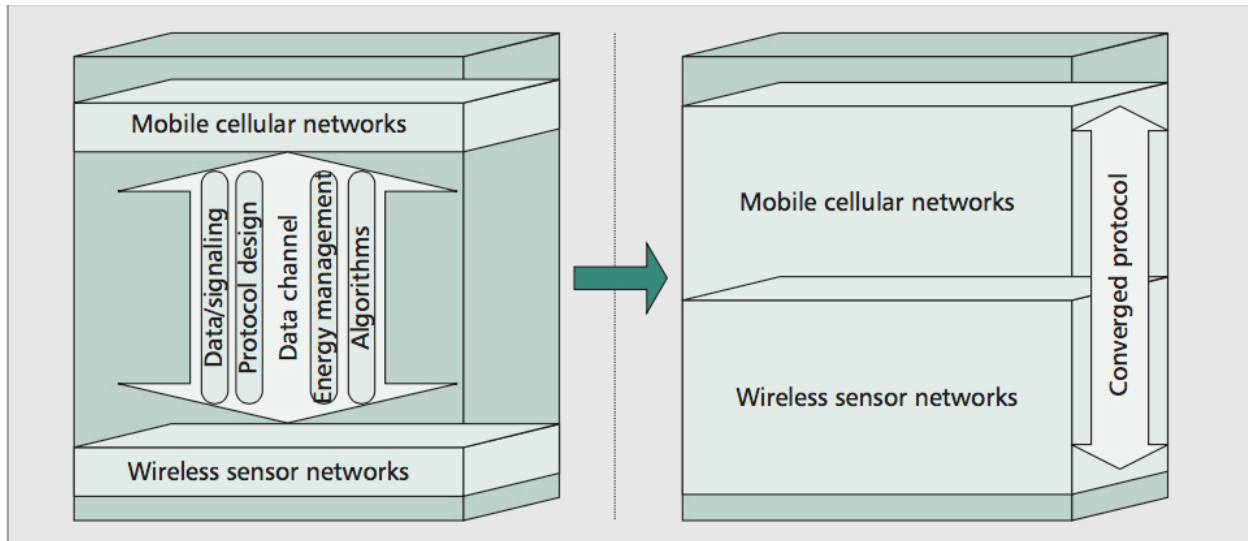
3.4.2. Air-Interface Convergence

Το WSN χρησιμοποιεί narrowband τεχνολογίες και πομποδέκτες διάδοσης φάσματος, σε αντίθεση με το MCN που χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως το UMTS/LTE κ.ά. Στην Εικόνα 6 στο αριστερό μέρος βλέπουμε την αρχιτεκτονική των διπλής λειτουργίας κινητών τερματικών. Ο περιορισμός του εγχειρήματος αυτού έχει να κάνει με το γεγονός ότι το τερματικό θα αλλάζει συχνά λειτουργία για να προωθεί τα δεδομένα από το WSN στο BS. Στο MCN το OFDM και το OFDMA αποτελούν τη λύση για το air-interface, καθώς αποτελούν ένα αποδοτικό τρόπο για το διαμοιρασμό των ραδιοσυχνοτήτων ανάμεσα σε συστήματα με διαφορετικό bandwidth. Κάθε WSN cluster μοιράζεται ένα υποσύνολο μεταφορέων/υπομεταφορέων στο MCN, μέσα στο οποίο είναι υλοποιημένη η πολλαπλή πρόσβαση των κόμβων αισθητήρων, ενώ τα δύο δίκτυα έχουν διαφορετική δυνατότητα επεξεργασίας σήματος και δεσμευμένο bandwidth.



Εικόνα 6 : Air - Interface Convergence [8]

3.4.3. Protocol Convergence



Εικόνα 7 : Protocol Convergence [8]

Στο σενάριο σύγκλισης των WSN και MCN τα δεδομένα από τους αισθητήρες μπορούν να δρομολογηθούν στο BS από το gateway. Όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα της Εικόνας 7 το κανάλι δεδομένων βρίσκεται υλοποιημένο στο gateway ανάμεσα στις δύο στοίβες πρωτοκόλλων. Με δεδομένο ότι η αρχιτεκτονική και η air-interface έχουν υψηλή σύγκλιση αναφορικά με το WSN και MCN, το πρωτόκολλο και ο έλεγχος σήματος θα πρέπει να έχουν κι αυτά στενή σύγκλιση, ώστε να υλοποιείται η πραγματικά WSN-MCN σύγκλιση. Το MAC επίπεδο και το επίπεδο πρωτοκόλλου στις δύο στοίβες πρέπει να βελτιστοποιηθούν, ώστε είτε να επιτύχουν καλύτερες επιδόσεις στο WSN ή να επεκτείνουν τις εφαρμογές του MCN.

Η σηματοδότηση για τον έλεγχο του downlink και του uplink πρέπει να είναι υλοποιημένη στο gateway και να ακολουθεί “cross-MAC” σχεδίαση. Για το downlink είσοδος/έξοδος του WSN κόμβου και τα gateways πρέπει να διαχειρίζονται από το BS, ενώ για το uplink η σηματοδότηση από τους κόμβους του WSN. Στο MAC επίπεδο πρέπει να μελετάται ένα σύστημα διπλού επιπέδου δέσμευσης πόρων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολλών WSN nodes με μεγάλη κυκλοφορία, ενώ στο επίπεδο του δικτύου, όταν ένα κινητό gateway βρεθεί εντός εύρους του WSN, αυτό πρέπει να προκαλεί re-selection για το gateway ή ακόμα και re-clustering για τον ασύρματο κόμβο αισθητήρα.

3.5. MTC Subscription, Congestion, Overload Control [9]

3.5.1. MTC Subscription Control

Οι MTC συσκευές επικοινωνούν με τους MTC servers ή με άλλες MTC συσκευές μέσω του Public Land Mobile Network (PLMN). Κάθε MTC συσκευή χρησιμοποιεί κάποια χαρακτηριστικά (MTC features), τα οποία είναι λειτουργίες δικτύου, ώστε να βελτιστοποιήσει το δίκτυο για τη χρήση από τις MTC εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά αυτά εγγράφονται και ελέγχονται από το MTC subscription στο HSS (Half-Slot Stolen). Μια εγγραφή μπορεί να μοιραστεί ανάμεσα σε πολλές συσκευές και περιλαμβάνει στα στοιχεία εκείνα που χρειάζεται μια συσκευή για την αυθεντικοποίησή της. Μεμονωμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ασύμβατα μεταξύ τους και για το λόγο αυτό ο δειχριστής του δικτύου μπορεί να

περιορίσει την εγγραφή όταν διαφαίνεται μια ασυμβατότητα. Μια τυπική διαδικασία εγγραφής ακολουθεί την εξής πορεία. Αρχικά τα MTC features είναι μη εγγεγραμμένα, μέχρις ότου ένας εγγραφέας να τα εγγράψει μέσω της διαδικτυακής διεπαφής του παροχέα. Στη συνέχεια το feature αυτό θεωρείται εγγεγραμμένο. Ο διαχειριστής τρέφει πάντα το δικαίωμα να απορρίψει την αίτηση εγγραφής. Στη συνέχεια με την προσάρτηση της συσκευής στο δίκτυο, όλα τα εγγεγραμμένα και μόνο αυτά features κατεβαίνουν από το HSS στο MME ή στο visitor location register (VLR) του SGSN του UMTS. Ένα feature μπορεί να χαρακτηριστεί ενεργό ή ανενεργό. Συνήθως όλα τα εγγεγραμμένα θεωρούνται ενεργά, αλλά ανάλογα με την πολιτική το SGSN/MME (Serving GPRS Support Node/Mobile Management Entity) μπορεί να απενεργοποιήσει τμήμα ή και ολόκληρα features ανάλογα την ικανότητα του δικτύου και της συσκευής. Όταν μια συσκευή αποπροσαρτάται από το δίκτυο όλα τα features συνεχίζουν να μένουν εγγεγραμμένα ανεξάρτητα αν είναι ενεργά ή όχι, ενώ μπορούν να διαγραφούν μόνο από τη διεπαφή του διαχειριστή. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η εγγραφή γίνεται με το μοναδικό αριθμό international mobile subscriber identity (IMSI) της κάθε συσκευής.

Σε περίπτωση που ένα ή περισσότερα features δεν υποστηρίζονται από μια συσκευή τότε το SGSN/MME θα απορρίψει την αίτηση εγγραφής στέλνοντας πίσω ένα μήνυμα με πληροφορίες για το μη υποστηριζόμενο feature και το λόγο της απόρριψης.

3.5.2. Congestion and Overload Control

Η συμφόρηση προκαλεί στο δίκτυο τεράστια προβλήματα κυρίως στην απόδοση των ζωτικών κόμβων με σπάνιους πόρους, όπως τα gateways, το RAN και το radio network controller (RNC). Η συμφόρηση μπορεί να οφείλεται είτε σε δυσλειτουργία του MTC server ή κάποιας εφαρμογής ή και στη μαζικές απόπειρες συσκευών να συνδεθούν στο δίκτυο με τη μία.

Οι μηχανισμοί για την αποφυγή της συμφόρησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους «μαλακούς», οι οποίοι προσπαθούν να μειωθεί η συχνότητα των προσπαθειών και τους άκαμπτους, οι οποίοι απαγορεύουν σε συσκευές να συνδεθούν ή να εκτελέσουν διαδικασίες μέσα στο δίκτυο. Οι περισσότεροι μηχανισμοί για αποφυγή συμφόρησης χρησιμοποιούν την άκαμπτη στρατηγική ομαδοποιώντας δε τις MTC συσκευές ανάλογα με τα διαφορετικά features και τις διαφορετικές μετρικές και συνάμα δεσμεύουν και απαγορευμένους χρόνους για την κάθε συσκευή βασισμένους στην εγγραφή της στο HSS.

Οι MTC συσκευές με χρονικά ελεγχόμενο MTC feature συνδέονται στο δίκτυο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία ορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου και πέρα από τα οποία το παράθυρο επικοινωνίας είναι περισσότερο περιορισμένο καθώς κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν να μη χρειάζονται οι συσκευές ολόκληρο το χρόνο για να συνδεθούν. Να σημειωθεί επίσης ότι ο χρόνος πρόσβασης είναι και τυχαίος πάνω στο παράθυρο πρόσβασης, με σκοπό τη μείωση των peaks στη σηματοδότηση και της κίνησης δεδομένων από τα MTCs.

Μια άλλη προσέγγιση για την αποφυγή της συμφόρησης έχει να κάνει με την απόρριψη των αιτημάτων για σύνδεση/προσάρτηση από τις MTC συσκευές από συγκεκριμένους κόμβους. Η απόρριψη πρέπει να γίνεται με βάση το ότι η απορριφθείσα συσκευή δε θα ξανακάνει αμέσως το ίδιο αίτημα και ότι οι απορριφθείσες συσκευές δεν θα προσπαθήσουν να συνδεθούν όλες την ίδια στιγμή αλλά σε τυχαία χρονικά διαστήματα. Με άλλα λόγια η απόρριψη πρέπει να γίνεται βασιζόμενη σε ένα συγκεκριμένο γκρουπ από MTC identifiers ή και ψάχνοντας στην MTC κίνηση για κάποιο συγκεκριμένο Access Point Network (APN). Η απόρριψη

αυτή μπορεί να γίνει είτε σε γειτονικό RAN είτε από το SGSN/MME. Όταν το δίκτυο ελέγχεται από RAN τότε όταν πρόκειται να συμφορηθεί το SGSN/MME στέλνει μια ειδοποίηση στους RAN κόμβους πυροδοτώντας τον έλεγχο πρόσβασης και δηλώνοντας πως υπάρχει παρακώλυση πληροφορίας. Σε περίπτωση που η πρόσβαση ελέγχεται από το SGSN/MME το HSS παρέχει στα MME/SGSNs πληροφορίες για το χρόνο παραχώρησης και τον απαγορευμένο στην εγγραφή του MTC. Βασιζόμενο σε αυτή την ανατροφοδότηση και στις τοπικές πολιτικές το SGSN/MME καθορίζει συγκεκριμένες χρονικές στιγμές για κάθε συσκευή και επικοινωνεί μαζί της μέσω του MTC server ή μέσω του Non-Access-Stratum (NAS). Σε περίπτωση βέβαια που η συμφόρηση συμβεί σε διαπιστευμένο χρόνο, το SGSN/MME απορρίπτει τις συνδέσεις από τις συγκεκριμένες συσκευές και τους παρέχει εφεδρικούς χρόνους για μεταγενέστερη πρόσβαση ή απλά τους στέλνει μήνυμα συμφόρησης απαιτώντας να μειώσουν τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων τους.

Κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι και η έλλειψη ενός μηχανισμού bulk MTC signaling handling. Αυτό μπορεί να χειριστεί από διαφορετικά πρωτόκολλα, όπως το NAS. Στο σενάριο που πολλές συσκευές «ζυπνήσουν» ταυτόχρονα για να στείλουν μηνύματα σηματοδότησης στο NAS, τότε το eNB μπορεί να τα μαζέψει αυτά και να περιμένει για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα ή μέχρι να μαζευτεί ένας συγκεκριμένος αριθμός μηνυμάτων και στη συνέχεια να προωθήσει ένα σωρό μηνυμάτων στο NAS. Επιπλέον άθροιση προς το HSS μπορεί να γίνει στο MME, πράγμα που σημαίνει ότι τα περιεχόμενα των μηνυμάτων μπορούν να συμπικνωθούν σημαντικά. Επίσης η προσπάθεια ανάλυσης των παραμέτρων τόσων μηνυμάτων μειώνεται κι αυτή στο ελάχιστο, μειώνοντας με τη σειρά της τον χρόνο που χρειάζεται για τη συνολική διαδικασία.

3.6. M2M Resource Allocation [10]

Προκειμένου να υποστηρίζονται οι M2M επικοινωνίες, η αρχιτεκτονική του RAN πρέπει να ενισχυθεί, ώστε να ενεργοποιήσει την τις συνυπάρχουσες επικοινωνίες ανάμεσα στις MTCD-related και H2H επικοινωνίες σε δίκτυο LTE-A. Εκτός από την απευθείας μετάδοση, τα MTCDs (Machine Type Communication Devices) μπορούν να εγκαθιδρύσουν συνδέσεις με τα eNBs τους μέσω multi-hop μετάδοσης, ώστε να αποφύγουν την αυτοπαρεμβολή και να μειώσουν την πολυπλοκότητα της υλοποίησης. Επιπλέον οι peer-to-peer συνδέσεις των κυψελωτών δικτύων, δημιουργούν τις προϋποθέσεις, ώστε τοπικές υπηρεσίες γειτονικών MTCDs να είναι διαθέσιμες.

Δύο κύριες μέθοδοι υπάρχουν σχετικά με την δέσμευση πόρων, η orthogonal και η shared resource allocation. Στα LTE-A δίκτυα οι ραδιοπόροι διαιρούνται σε resource blocks (RBs). Στις μεικτές επικοινωνίες υπάρχουν πέντε τύποι συνδέσεων :

- eNB-to-UE
- eNB-to-MTCD
- eNB-to-MTCG
- MTCG-to-MTCD
- MTCD-to-MTCD

Στη backhaul slot το eNB-to-MTCG πρέπει να είναι αξιόπιστο, ώστε να διασφαλίζει την ποιότητα της υπηρεσίας, για αυτό τα eNB-to-MTCG links είναι ορθογώνια τμήματα των ραδιοπόρων, ενώ όλα τα υπόλοιπα συσχετίζονται απευθείας με το eNB. Από τη άλλη πλευρά στην access slot όλα τα links εκτός των eNB-to-MTCG

μοιράζονται όλους τους ραδιοπόρους με διάφορες μεθόδους. Οι MTCD-to-MTCD επικοινωνίες λαμβάνουν χώρα τοπικά, με χαμηλή ενέργεια και χρησιμοποιώντας είτε το downlink είτε το uplink κανάλι, με αποτέλεσμα να μην παρεμβάλλονται με άλλα links.

3.6.1. Orthogonal Allocation for eNB-to-MTCG link

Η δέσμευση ραδιοπόρων και ο προγραμματισμός ανάμεσα στα MTCGs και στα MTCDs, μπορεί να μεταφερθεί στα MTCGs με τη συνεργασία του αρμόδιου eNB. Αυτό συνεπάγεται με μετριασμό της ανταγωνιστικότητας για τις ραδιοσυχνότητες. Προκειμένου να επιτευχθεί μεγάλη αποδοτικότητα φάσματος το eNB-to-MTCG link χρειάζεται να ρυθμιστεί ημιστατικά ανάλογα με τις ανάγκες των υπηρεσιών των MTCDs που σχετίζονται με το συγκεκριμένο MTCG (Machine type Communication Gateway). Σε περίπτωση που δεν επαρκούν οι πόροι για τη μετάδοση των δεδομένων, οδηγούμαστε σε υποβάθμιση του QoS. Τέλος τα MTCDs έχουν κάποια κοινά features όπως το small data transmission και το time-tolerance, που δηλώνουν τον μέσο όρο των μεταδιδόμενων δεδομένων, ώστε να μπορεί ο eNB να υπολογίσει το συνολικό data rate όλων των MTCDs συγκεκριμένου MTCG και στη συνέχεια να υπολογιστούν τα απαιτούμενα RBs .

3.6.2. Scheduling between eNB-to-UE and eNB-to-MTCD links

Στα μεικτά δίκτυα το user utility of service παρέχει περισσότερες πληροφορίες από το QoS. Αυτό συμβαίνει διότι το user utility of service βασίζεται σε παρεχόμενες υπηρεσίες όπως το bandwidth, το loss ratio κ.α. Με βάση αυτά χωρίζουμε τις εφαρμογές σε τέσσερις κατηγορίες:

- Class 1 (Elastic Applications): Αναφέρεται σε εφαρμογές που επιδέχονται καθυστερήσεις, όπως το e-mail και η μεταφορά αρχείων. Η user utility τους έχει φθίνουσες οριακές βελτιώσεις με σταδιακή αύξηση για το επιδιωκόμενο data rate.
- Class 2 (Hard Real-Time Applications): Αναφέρεται σε εφαρμογές που απαιτούν τα δεδομένα να μοιραστούν εντός συγκεκριμένου χρόνου καθυστέρησης. Τέτοιες εφαρμογές είναι η τηλεφωνία.
- Class 3 (Delay-Adaptive Applications): Αναφέρεται σε εφαρμογές ευαίσθητες στις καθυστερήσεις όπως το audio/video streaming. Το user utility μπορεί να χειροτερεύσει μόνο σε περίπτωση που το επιδιωκόμενο data rate είναι κάτω από τις απαιτήσεις.
- Class 4 (Rate-Adaptive Applications): Αφορά εφαρμογές που προσαρμόζουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανάλογα με του διαθέσιμους πόρους. Αύξηση του ρυθμού δεδομένων οδηγεί μόνο σε οριακή αύξηση του user utility.

3.6.3. Allocation between MTCD-to-MTCD links

Προκειμένου να βελτιωθεί η δικτυακή αποδοτικότητα τα διαφορετικά MTCD-to-MTCD links μοιράζονται τις ίδιες ραδιοσυχνότητες. Επιπλέον η μετάδοση μπορεί να μοιράζεται πόρους που χρησιμοποιούνται και από άλλα links αποκτώντας τη χαμηλή ενέργεια μετάδοσης των MTCDs.

3.7. M2M Device Management [11]

3.7.1. OMA-DM

Το OMA αποτελεί ένα πρωτόκολλο διαχείρισης συσκευών, το οποίο έχει αναπτυχθεί για τη διαχείριση μεγάλων ομάδων από κινητές συσκευές. Είναι σχεδιασμένο με βάση την ασφάλεια και τις απαιτήσεις σε bandwidth των κινητών συσκευών, αλλά για χαμηλής ενέργειας συσκευές η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων πρωτοκόλλου είναι υψηλή, με αποτέλεσμα να απαιτούνται νέοι τρόποι μετάδοσης και μηνυμάτων στο βωμό της αποδοτικότητας.

Το OMA DM (Open Mobile Alliance Device Management) αποτελείται από ένα SyncML πρωτόκολλο βασισμένο σε XML μορφοποίηση για τη διαχείριση των συσκευών και των συγχρονισμό τους. Το SyncML αποτελείται από ένα στοιχείο ρίζας, μια επικεφαλίδα SyncHdr και ένα στοιχείο σώματος SyncBody. Τα μηνύματα στο SyncML είναι πολύ λεπτομερή και αυτό οφείλεται στους εμφωλευμένους τύπους και στον μεγάλο αριθμό namespaces. Σε περίπτωση που επιθυμούμε αλλαγή του XML με άλλο τύπο μηνύματος, οι υπάρχοντες τύποι δεδομένων θα πρέπει μετά να δείχνουν στο νέο τύπο μηνύματος.

3.7.2. Wake up and Paging

Τη σημερινή εποχή που η εξοικονόμηση ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο οι M2M συσκευές πρέπει να έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό συνεπάγεται με το ότι οι συσκευές πρέπει να μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου το συντομότερο δυνατόν και να ξυπνάνε από αυτή μόνο όταν είναι απολύτως απαραίτητο.

Σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος όπως τα GSM/GPRS/WCDMA το Short Message System (SMS) και το Unstructured Supplementary Service Data (USSD) χρησιμοποιούνται συχνά για επικοινωνία μεταξύ των συσκευών αλλά και ως διαδικασίες αφύπνισης. Το SMS over IP εξαρτάται από το IP Multimedia Subsystem (IMS), το οποίο προσφέρει συμβατότητα ανάμεσα στα κινητά και στις υλοποιήσεις με πιο λεπτομερή μηνύματα. Σε περιβάλλοντα που δεν υπάρχει το IMS η μετάδοση γίνεται over SGs. Αποτελεί μια υβριδική προσέγγιση που επιτρέπει τη μετάδοση ενός SMS μέσω της CS υποδομής του LTE δικτύου. Το SG αποτελεί ένα σημείο αναφοράς ανάμεσα στο MME του EPS και του Mobile Switching Center (MSC).

Επιπλέον το USSD χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως στα GSM δίκτυα. Ενεργοποιείται από τον χρήστη, ο οποίος πληκτρολογεί ένα κωδικό κάποιου feature. Στη συνέχεια το μήνυμα πηγαίνει μέσω του MSC στο Home Location Register (HLR), το οποίο το προωθεί μέσω του Mobile Application Part (MAP) στον υπηρεσιακό κόμβο και στη συνέχεια USSD server απαντά στο αίτημα. Το USSD δουλεύει με δύο λειτουργίες : Man Machine Interface Mode (MMI Mode) το οποίο αρχικοποιείται από τον εξοπλισμό του χρήστη και το Application Mode που αρχικοποιείται από το δίκτυο. Με το MMI Mode ο χρήστης τραβάει δεδομένα από το δίκτυο, ενώ με το Application mode στέλνει προς αυτό. Στα LTE δίκτυα ωστόσο απουσιάζει το USSD εξαιτίας της εμφάνισης του XML Configuration Access Protocol (XCAP). Υπάρχει ωστόσο η σκέψη είτε για επαναφορά του αλλά όχι με τη γνωστή μορφή του ή διαφορετικά τα UE να ενθλακώνουν τους κωδικούς USSD σε IP μηνύματα και να τα προωθούν στο δίκτυο όταν προσαρτώνται στο IMS μέσω του EPS.

3.7.3. Constrained Application Protocol (CoAP)

Αποτελεί ένα ελαφρύ πρωτόκολλο που υποστηρίζει multicast αιτήματα και REST web services. Στο OMA DM η χρησιμοποίηση του CoAP συνάδει με την αντικατάσταση του HTTP από αυτό ή τη μετάφρασή του με HTTP/CoAP (HC) proxy. Το OMA DM ενεργοποιεί πολλαπλά SyncML μηνύματα ανα SyncML πακέτο και κάθε μήνυμα μεταφέρεται σε ένα ξεχωριστό HTTP αίτημα ή απάντηση. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το CoAP πρέπει να οριστεί η σύνδεσή του με το OMA-DM. Η σύνδεση αυτή θα προσφέρει μια συγκεκριμένη OMA DM λειτουργία για τη διαχείριση των συσκευών. Το CoAP μπορεί να σπάσει τα μηνύματα σε περισσότερες αιτήσεις ακολουθούμενα από μια τελική καταληκτική αίτηση. Γενικά το CoAP είναι ένα ελαφρύ και προσανατολισμένο προς τους πόρους πρωτόκολλο, αλλά χωρίς αποδοτική μορφή μηνυμάτων αντί για τα XML (eXtensible Markup Language) και δεν υπάρχουν σοβαρά πλεονεκτήματα για την αλλαγή πρωτοκόλλου και την εγκαθίδρυσή του.

3.7.4. Message Formats for OMA DM

- **Efficient XML Interchange (EXI):** Αποτελεί μια γραμματικά οδηγούμενη μορφή και ορίζει πως οι πληροφορίες μπορούν να περάσουν ως ροή γεγονότων, μειώνοντας έτσι κατά πολύ το overhead που δημιουργείται από την απεικόνιση των δεδομένων σαν μια ροή από χαρακτήρες κειμένου. Το αποτέλεσμα είναι ότι με αυτή τη μορφή ακόμα και οι πιο μικρές ενσωματωμένες συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν με την κωδικοποίηση χωρίς να χρειάζεται η χρήση ενός πλήρους XML parser.
- **CoRE Link Format:** Επεκτείνει Web Links ως ωφέλιμο φορτίο με επιπλέον περιγραφή των λειτουργιών των πόρων για τα M2M δίκτυα. Χρησιμοποιεί μια νέου τύπου Internet media μορφή και πρέπει πρώτα να καθοριστεί από ένα XML συντακτικό πριν χρησιμοποιηθεί στο OMA DM, με αποτέλεσμα να απαιτείται να ξαναγραφούν τα μηνύματα.
- **Protocol Buffers:** Αποτελεί ένα μηχανισμό της Google για τη σειριοποίηση των δομημένων δεδομένων που απελευθερώνονται ευρέως. Χρησιμοποιεί δυαδική κωδικοποίηση που κάνει τα δεδομένα λίγο μικρότερα και δεν απαιτεί τα δυαδικά δεδομένα να έχουν προηγουμένως κωδικοποιηθεί. Οι δομές δεδομένων πρέπει να έχουν οριστεί πριν την σειριοποίηση. Αποτελέσματα δείχνουν ότι στο χειρότερο σενάριο το ProtoBuf είναι δέκα φορές πιο αποδοτικό από το XML parsing.

Οι M2M επικοινωνίες αποτελούν αναπόφευκτα ένα κομμάτι που θα μας απασχολήσει στο μέλλον αρκετά, ωστόσο προκειμένου να δούμε έμπρακτα το πως συνδυάζονται με τα δίκτυα και ιδιαίτερα το LTE, πώς συμπεριφέροντα και τι προβλήματα και περιορισμοί υπάρχουν, χρειάζεται να κάνουμε χρήση ενός simulator. Ένας simulator που υποστηρίζει το LTE είναι ο NS3.

4. NS-3 SIMULATOR [13]

4.1. Εισαγωγή

Για τις υλοποιήσεις των σεναρίων που θα περιγράψουμε παρακάτω χρησιμοποιήσαμε τον προσομοιωτή NS-3. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής είναι για να παρουσιάσουμε στη συνέχεια όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά σενάρια. Από τον προσομοιωτή εξάγουμε κάποια αποτελέσματα και στοιχεία, τα οποία μας βοηθάνε να επιβεβαιώσουμε ότι οι επεκτάσεις που θα περιγράψουμε στο επόμενο κεφάλαιο αναφορικά με το NS-3 είναι σωστές και πλήρως λειτουργικές.

4.2. About NS-3

Ο NS-3 αποτελεί έναν διακριτών συμβάντων προσομοιωτή, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Είναι ένα ανοικτού κώδικα project με μεγάλες δυνατότητες επεκτασιμότητας. Συνοπτικά μας παρέχει μοντέλα για το πως τα δίκτυα πακέτων δεδομένων δουλεύουν και συμπεριφέρονται, ενώ ταυτόχρονα παρέχει και μια μηχανή προσομοίωσης για τους χρήστες, ώστε να μπορούν να διεξάγουν πειράματα. Οι λόγοι που χρησιμοποιείται το ns-3 περιλαμβάνουν διεξαγωγή μελετών που είναι δύσκολο ή αδύνατο να διεξαχθούν σε πραγματικά συστήματα, τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος μέσα σε ένα ελεγχόμενο και αναπαραγωγικό περιβάλλον καθώς και το πως λειτουργούν τα δίκτυα. Παρατηρούμε επίσης πως το ns-3 διαθέτει μοντέλα για το πως τα διαδικτυακά πρωτόκολλα και τα δίκτυα λειτουργούν, χωρίς ωστόσο να περιορίζεται μόνο σε αυτά.

Ορισμένα εργαλεία που διαθέτει το ns-3 και το διαχωρίζουν από άλλους προσομοιωτές είναι τα εξής :

- Το ns-3 έχει δημιουργηθεί με ένα σύνολο βιβλιοθηκών που μπορούν να συνδυαστούν μαζί αλλά και με άλλες εξωτερικές βιβλιοθήκες. Αντίθετα από άλλους προσομοιωτές που προσφέρουν στους χρήστες τους ένα ενσωματωμένο γραφικό περιβάλλον, διεξαγωγής όλων των εργασιών, το ns-3 είναι πιο αρθρωτό προς αυτή την κατεύθυνση, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα προγράμματα data analysis, visualization και animators. Οι χρήστες ωστόσο θα πρέπει να είναι συνηθισμένοι να δουλεύουν με γραμμή εντολών και με εργαλεία προγραμματισμού για γλώσσες προγραμματισμού C++/Python.
- Το ns-3 χρησιμοποιείται κυρίως σε Linux ή Linux-based συστήματα, ενώ υποστηρίζει και FreeBSD και Cygwin για τα Windows.
- Τέλος δεν υποστηρίζει κάποιο official προϊόν λογισμικού κάποιας εταιρίας, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε υποστήριξη προς αυτό να είναι αποτέλεσμα της καλύτερης δυνατής προσπάθειας των χρηστών της mailing-list προς αυτή την κατεύθυνση.

4.3. Differences from NS-2

Για τους χρήστες του ns-2 η μεγαλύτερη διαφορά που θα διαπιστώσουν στη μετάβαση από το ns-2 στο ns-3 είναι η επιλογή για scripting language. Στο ns-3 ο προσομοιωτής είναι εξ' ολοκλήρου γραμμένος σε C++ με χρήση Python bindings, συνεπώς τα οποιαδήποτε scripts μπορούν να γραφούν είτε σε C++ είτε σε Python.

Επιπλέον από τη στιγμή που παράγει και pcap trace files και άλλες εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλύσουν τα traces αυτά. Μια ακόμα διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι το ns-3 έχει αυτή τη στιγμή μια ενεργή με συνεχή ανανέωση mailing list σε αντίθεση με το ns-2, το οποίο συντηρείται πολύ αμυδρά και χωρίς σημαντική πρόοδο για πάνω από μια δεκαετία. Επιπλέον το ns-3 παρέχει στους χρήστες features, τα οποία δεν είναι διαθέσιμα στο ns-2, όπως το implementation code execution environment, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες να τρέχουν πραγματικό κώδικα στον προσομοιωτή. Παρέχει επιπλέον ένα χαμηλότερο επίπεδο απόκρυψης απ' ότι το ns-2 επιτρέποντας την καλύτερη ευθυγράμμιση των συστημάτων μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά ορισμένοι περιορισμοί που είχαν τεθεί στο ns-2, στο ns-3 φαίνεται να εκλείπουν. Πάροτι το ns-2 παρέχει ένα πιο συμπαγές σύνολο από συμβαλλόμενες ενότητες, σε σχέση με το ns-3, το δεύτερο παρέχει πιο λεπτομερή μοντέλα σε πολλές περιοχές της έρευνας και η υλοποίηση του κώδικα μαρτυρά και το υψηλό φάσμα από υψηλής πιστότητας μοντέλα επίσης.

4.4. Ways of usage of NS-3

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως το ns-3 αποτελεί ένα σύστημα από βιβλιοθήκες λογισμικού, οι οποίες δουλεύουν μαζί και οι χρήστες μπορούν να γράφουν προγράμματα, τα οποία θα συνδέονται με αυτές ή απλά θα τις εισάγουν. Το ns-3 διανέμεται με τη μορφή πηγαίου κώδικα, πράγμα που σημαίνει ότι το στοχεύον σύστημα πρέπει να διαθέτει περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού, ώστε να μπορέσει αρχικά να κατασκευάσει αυτές τις βιβλιοθήκες και στη συνέχεια να φτιάξει το πρόγραμμα χρήστη. Για συγκεκριμένα συστήματα το ns-3 μπορεί να διανεμηθεί και ως προκατασκευασμένες βιβλιοθήκες και πιθανότατα στο μέλλον μπορεί να διαμοιράζεται με αυτό τον τρόπο γενικά, στην παρούσα στιγμή ωστόσο πολλοί χρήστες κάνουν τη δουλειά τους τροποποιώντας στοιχεία του ns, συνεπώς το να έχουν τον κώδικα διαθέσιμο για επανακατασκευή είναι αρκετά βολικό.

Για την κατασκευή των βιβλιοθηκών χρησιμοποιούμε την εντολή :

```
./build.py --enable-examples --enable-tests
```

η οποία εκτός από όλα τα default modules που δημιουργεί , ενεργοποιεί και τα tests και τα παραδείγματα. Σε περίπτωση που θέλουμε να απενεργοποιήσουμε κάποιο module ή κάποιο extension χρησιμοποιούμε την εξής εντολή :

```
./build.py --disable-<name_of_module_or_extension>
```

και υπο φυσιολογικές συνθήκες θα εμφανιστεί μια λίστα όπως η ακόλουθη με τα module που έχουν και αυτά που δεν έχουν δημιουργηθεί, όπως στη Εικόνα 8.

```
Waf: Leaving directory `/path/to/workspace/ns-allinone-3.23/ns-3.23/build'
'build' finished successfully (6m25.032s)

Modules built:
antenna                aodv                    applications
bridge                 buildings               config-store
core                   csma                    csma-layout
dsdv                   dsr                      energy
fd-net-device          flow-monitor            internet
lr-wpan                lte                     mesh
mobility               mpi                     netanim (no Python)
network                nix-vector-routing     olsr
point-to-point         point-to-point-layout  propagation
sixlowpan              spectrum                stats
tap-bridge             test (no Python)       topology-read
uan                    virtual-net-device     wave
wifi                   wimax

Modules not built (see ns-3 tutorial for explanation):
brite                  click                   openflow
visualizer

Leaving directory `./ns-3.23'
```

Εικόνα 8: NS-3 build output

4.5. NS-3 Tracing

Το ns-3 περιλαμβάνει ένα εξαιρετικά πλούσιο περιβάλλον, που επιτρέπει στο χρήστη να τροποποιεί τα είδη της πληροφορίας που εξάγονται από τις προσομοιώσεις του.

Υπάρχουν υψηλού επιπέδου συναρτήσεις που επιτρέπουν στο χρήστη να ελέγχει μια συλλογή από εξ' ορισμού εξόδους. Υπάρχουν επίσης και μεσαίου επιπέδου συναρτήσεις που βοηθούν τους πιο μνημένους χρήστες στο να καθορίζουν πως θέλουν να εξάγεται και να αποθηκεύεται η πληροφορία, ενώ υπάρχουν και χαμηλού επιπέδου συναρτήσεις που στοχεύουν στους πολύ εξειδικευμένους χρήστες και τους βοηθάνε να αλλάξουν το σύστημα, ώστε να προβάλλει νέες και προηγούμενες μη εμφανείς πληροφορίες με έναν τρόπο που θα είναι απόλυτα προσβάσιμος από τα ανώτερα επίπεδα.

Στην παρούσα πτυχιακή θα ασχοληθούμε με την οντότητα του LTE, η οποία περιγράφεται και στη συνέχεια.

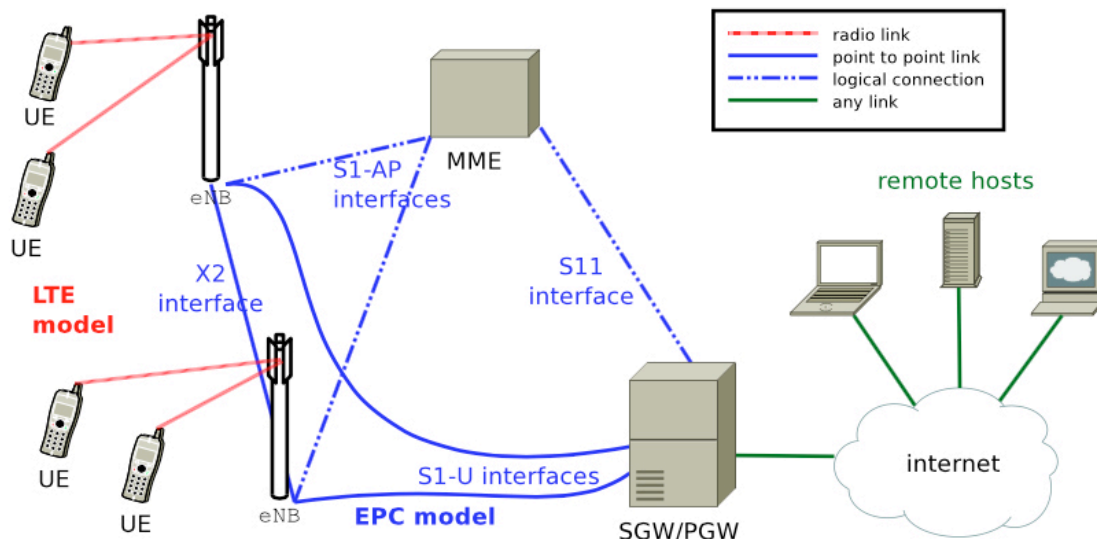
5. NS-3 LTE MODULE AND EXTENSIONS

5.1. Εισαγωγή [13]

Το μοντέλο του LTE-EPC περιγράφεται στην Εικόνα 9. Αποτελείται από δύο θεμελιώδη κομμάτια το RAN και το EPC του LTE πρωτοκόλλου. Το RAN περιλαμβάνει τη στοίβα του LTE Radio access πρωτοκόλλου, η οποία αποτελείται από RRC (Radio Resource Protocol), PDCP (Packet Data Convergence Protocol), RLC (Radio Link

Control), MAC (Medium Access Control), PHY (Physical Layer) επίπεδα και όλα αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό των UEs και στο εσωτερικό των eNBs. Από την άλλη πλευρά το EPC περιλαμβάνει πρωτόκολλα, οντότητες και διεπαφές του πυρήνα του δικτύου. Αυτά περιλαμβάνονται στους SGW (Serving GateWay), PGW (Packet GateWay) και MME κόμβους και τμηματικά στα eNBs.

Όλη αυτή η υποδομή έχει δημιουργηθεί στα πλαίσια του LENA project, από το Κέντρο Τεχνολογικών Τηλεπικοινωνιών της Καταλωνίας. Αποτελεί ένα open source προϊόν προσανατολισμένο στον LTE/EPC Network Simulator που επιτρέπει σε μικρο/μακρο-πολυπρακτικά κελιά να σχεδιάζουν και να ελέγχουν αλγόριθμους και λύσεις. Το LENA βασίζεται στον προσομοιωτή ns3 και η ανάπτυξή του είναι ανοικτή προς την κοινότητα προκειμένου να προάγει τη γρήγορη υιοθέτηση αλλά και εισφορές από βιομηχανικούς και ακαδημαϊκούς πόρους. Περιλαμβάνει εφαρμογές που στοχεύουν στο σχεδιασμό και στην αξιολόγηση της απόδοσης του uplink και του downlink, τους RRM αλγόριθμους, λύσεις για το συντονισμό των διακελευσμένων παρεμβολών, διαχείριση της κινητικότητας, ετερογενή δίκτυα και άλλα. Στην παρούσα πτυχιακή θα ασχοληθούμε ωστόσο με το κομμάτι του RAN του LTE model και κυρίως με το RRC το οποίο και επεκτείνουμε.



Εικόνα 9: LTE-EPC model[13]

5.2. LTE Design Criteria [13]

Το LTE μοντέλο έχει δημιουργηθεί για την υποστήριξη της αξιολόγησης των παρακάτω στοιχείων των LTE συστημάτων :

- Radio Resource Management
- QoS-aware Packet Scheduling
- Inter-cell Interference Coordination
- Dynamic Spectrum Access

Για να επιτευχθούν όμως όλα αυτά στο σωστό επίπεδο πρέπει να πληρούνται οι

παρακάτω προϋποθέσεις :

- Στο πεδίο των ραδιοσυχνοτήτων η διακριτότητα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή των Resource Blocks (RBs), καθώς αποτελεί τη βασική μονάδα για τη δέσμευση πόρων και χωρίς αυτή τη διακριτότητα δεν είναι δυνατόν το μοντέλο να προγραμματίσει ακριβώς τα πακέτα και την μεταξύ κελιών παρεμβολή. Ο λόγος είναι ότι εφόσον ο προγραμματισμός των πακέτων γίνεται ανά RB βάση, τότε το eNB θα εκπέμπει σε ένα υποσύνολο μόνο για τα διαθέσιμα RBs και ως εκ τούτου θα παρεμβάλλεται με άλλα eNBs μόνο για τα RBs που εκπέμπει.
- Ο προσομοιωτής κλιμακώνεται μέχρι 10 eNBs και εκατοντάδες UEs, πράγμα που οδηγεί σε έναν προσομοιωτή του οποίου η διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων είναι μοντελοποιημένη με διακριτότητα μέχρι ένα συμβολικό επίπεδο, πράγμα που είναι χρήσιμο κυρίως για την υλοποίηση όλης της διαδικασίας της σηματοδότησης στο PHY στρώμα.
- Υπάρχει η δυνατότητα να ρυθμίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης διαφορετικά κελιά, να χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες παρόχων και διαφορετικά εύρη συστήματος. Το εύρος που χρησιμοποιείται από διαφορετικά κελιά θα πρέπει να επιτρέπεται να επικαλύπτεται, προκειμένου να υποστηρίζεται η αδειοδότηση λύσεων δυναμικού φάσματος.
- Υποστήριξη του MAC Scheduler API (Application Program Interface) προκειμένου να είναι πιο αντιπροσωπευτικός ο προσομοιωτής του LTE, αλλά συνάμα να ανταποκρίνεται στις πραγματικές υλοποιήσεις. Η διεπαφή αυτή αναμένεται να χρησιμοποιηθεί από τους femtocell κατασκευαστές για την υλοποίηση αλγορίθμων προγραμματισμού και διαχείρισης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Resource Management), δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε προμηθευτές και λειτουργούς LTE εξοπλισμού να κάνουν τα πειράματά τους σε ένα προσομοιωτικό περιβάλλον.
- Ο προσομοιωτής πρέπει να περιλαμβάνει τη δική του υλοποίηση του προαναφερθέντος API. Δεν επιθυμείται καμία συμβατότητα με δυαδική ή δομή δεδομένων με υλοποίηση οποιουδήποτε προμηθευτή και ως εκ τούτου ένα στρώμα συμβατότητας πρέπει να παρεμβάλλεται κάθε φορά που κάποιος MAC προγραμματιστής κάποιου προμηθευτή χρησιμοποιείται με τον προσομοιωτή. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να εξασφαλίζει την ανεξαρτησία του προσομοιωτή από οποιεσδήποτε προσθήκες τρίτων προμηθευτών.
- Η ακριβέστατη μοντελοποίηση του RLC στρώματος, καθώς αποτελεί κομβικό στρώμα, δεδομένου ότι από μόνο του το μοντέλο του προσομοιωτή λειτουργεί προσομοιώνοντας την κίνηση των IP πακέτων από τα υψηλότερα στρώματα. Ωστόσο όμως το LTE Scheduling και το Radio Resource Management (RRM) δε λειτουργούν απευθείας με IP πακέτα, αλλά με RLC PDUs (Protocol Data Unit), τα οποία προκύπτουν από την τμηματοποίηση και την αλληλουχία των πακέτων των RLC οντοτήτων.

5.3. Αρχιτεκτονική LTE μοντέλου [13]

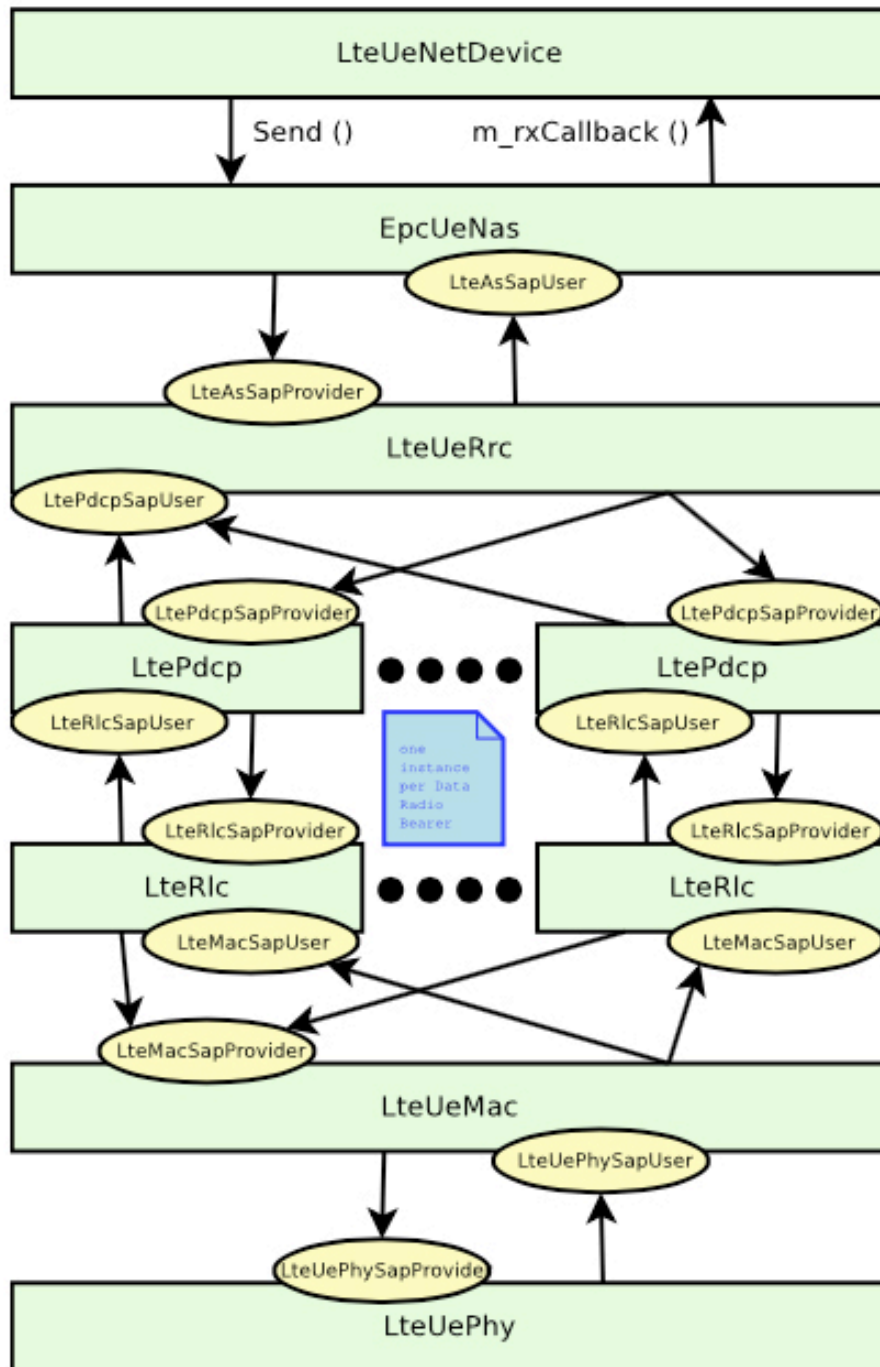
Η αρχιτεκτονική του μοντέλου του LTE χωρίζεται σε δύο οντότητες, από τις οποίες η πρώτη αφορά την οντότητα των UEs και η δεύτερη αφορά τα eNBs. Αναφορικά με τα UEs το μοντέλο της στοίβας του πρωτοκόλλου των ραδιοσυχνοτήτων του LTE

αναλύεται στην Εικόνα 10 που απεικονίζει το πλάνο δεδομένων και στην Εικόνα 11 που απεικονίζει το πλάνο ελέγχου. Από την άλλη πλευρά αναφορικά με τα eNBs και το μοντέλο της στοίβας του πρωτοκόλλου των ραδιοσυχνοτήτων του LTE η Εικόνα 12 παρουσιάζει το πλάνο δεδομένων και η Εικόνα 13 το πλάνο ελέγχου.

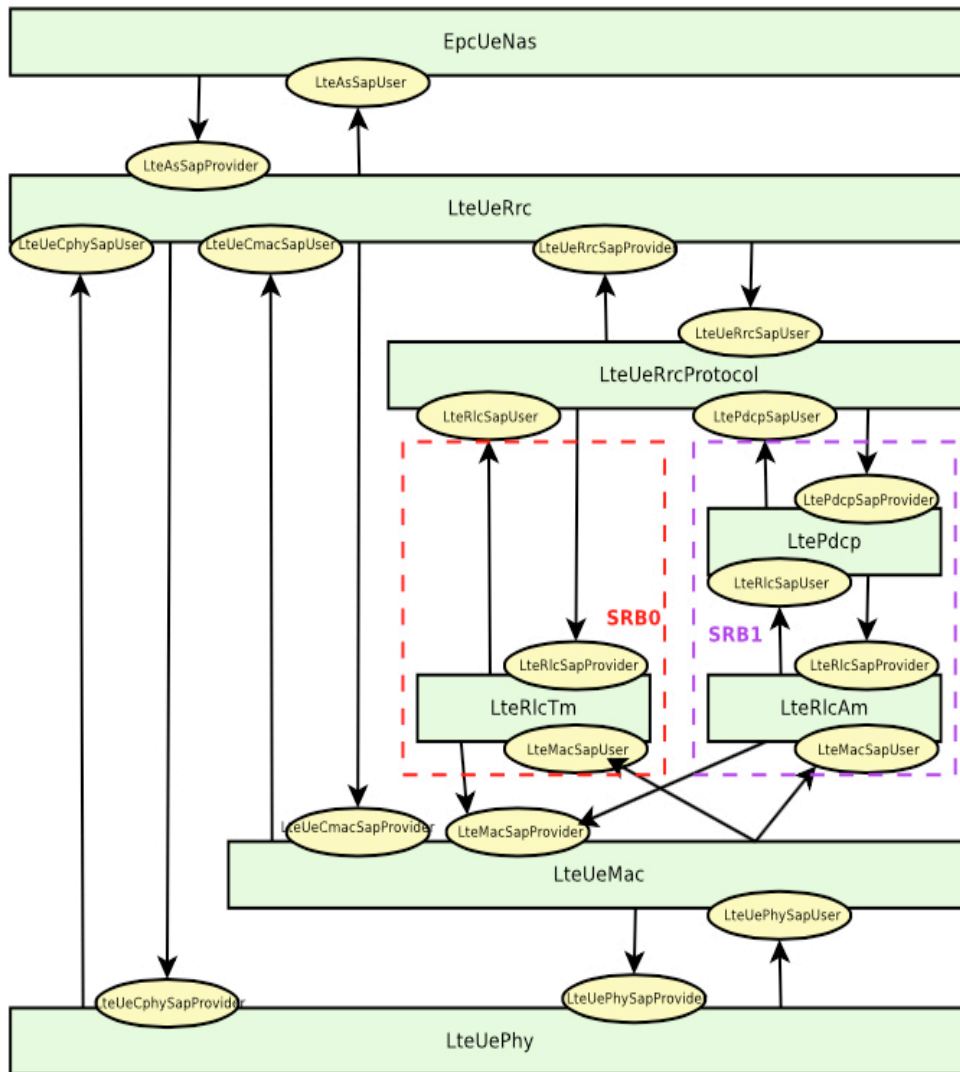
Πιο αναλυτικά στην Εικόνα 10 παρατηρούμε το UE Data Plane, το οποίο είναι γνωστό και με το όνομα Forwarding Plane (Πλάνο Προώθησης), καθώς είναι αρμόδιο για την προώθηση της κίνησης στο επόμενο άλμα στην πορεία της προς το επιλεγμένο δίκτυο προορισμού σύμφωνα με τη λογική του πλάνου ελέγχου. Βλέπουμε λοιπόν ότι τα πακέτα πηγαίνουν από το ένα επίπεδο στο άλλο είτε απευθείας, είτε με τη βοήθεια κάποιου Sap Provider ή Sap User, μέχρι να φτάσουν στο PHY στρώμα, περνώντας παράλληλα κι από όλα τα ενδιάμεσα στρώματα όπως το RRC, το PDCP, το RLC και το MAC. Από την άλλη πλευρά η Εικόνα 12 μας δείχνει το αντίστοιχο eNB Data Plane, το οποίο έχει ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά με το UE Data Plane με τη διαφορά ότι προωθεί τα πακέτα που λαμβάνει στο PHY στρώμα του, το οποίο επικοινωνεί με το PHY στρώμα του UE προς τα ανώτερα γι' αυτό στρώματα MAC, RLC, PDCP, RRC και στη συνέχεια προς το EPC.

Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται το UE Control Plane το οποίο καθορίζει τη διαδρομή που θα ακολουθήσουν τα πακέτα ώστε να φτάσουν από το UE μέσω των ενδιάμεσων στρωμάτων προς το eNB. Από την άλλη πλευρά η Εικόνα 13 παρουσιάζει το eNB Control Plane, το οποίο μοιάζει αρκετά με το UE Control Plane, αλλά διαφέρει ωστόσο καθώς καθορίζει τη διαδρομή των πακέτων από το eNB προς το SGW/PGW μέσω του ορισμού της S1-U στοίβας πρωτοκόλλων, που αποτελείται από τα GTP, UDP και IP στρώματα. Με άλλα λόγια το Control Plane αποτελείται από πρωτόκολλα για τον έλεγχο των radio access bearers και της σύνδεσης του UE με το ευρύτερο δίκτυο. Επιπλέον αποτελείται από τρία δομικά στρώματα, το φυσικό, το data-link και το δικτυακό. Το data-link στρώμα αποτελείται από τα MAC και RLC επίπεδα, ενώ το δικτυακό στρώμα από τα RRC, MM, GMM και CM.

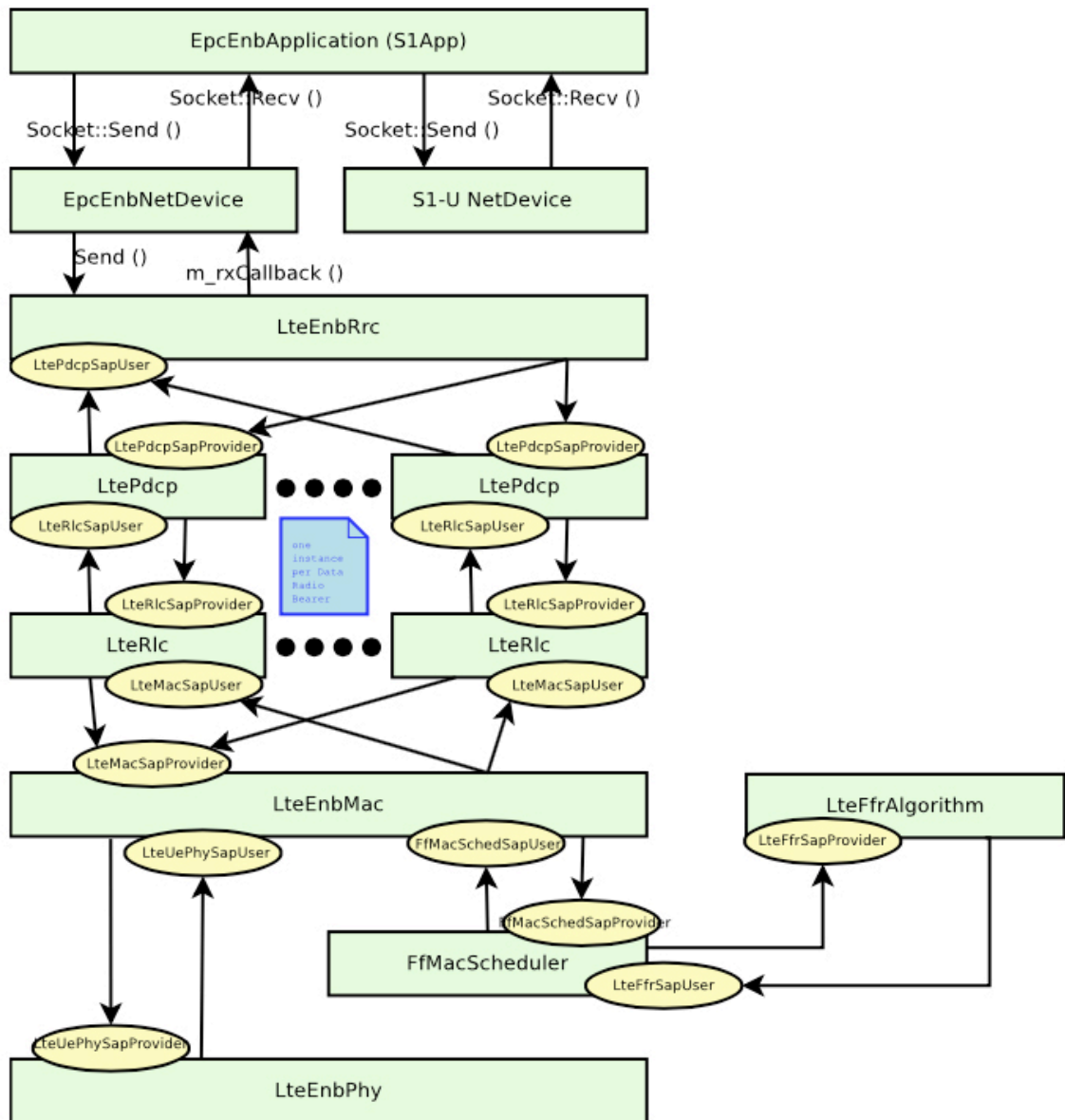
Από τα παραπάνω επίπεδα στην παρούσα πτυχιακή και δη στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλύσουμε διεξοδικά το RRC.



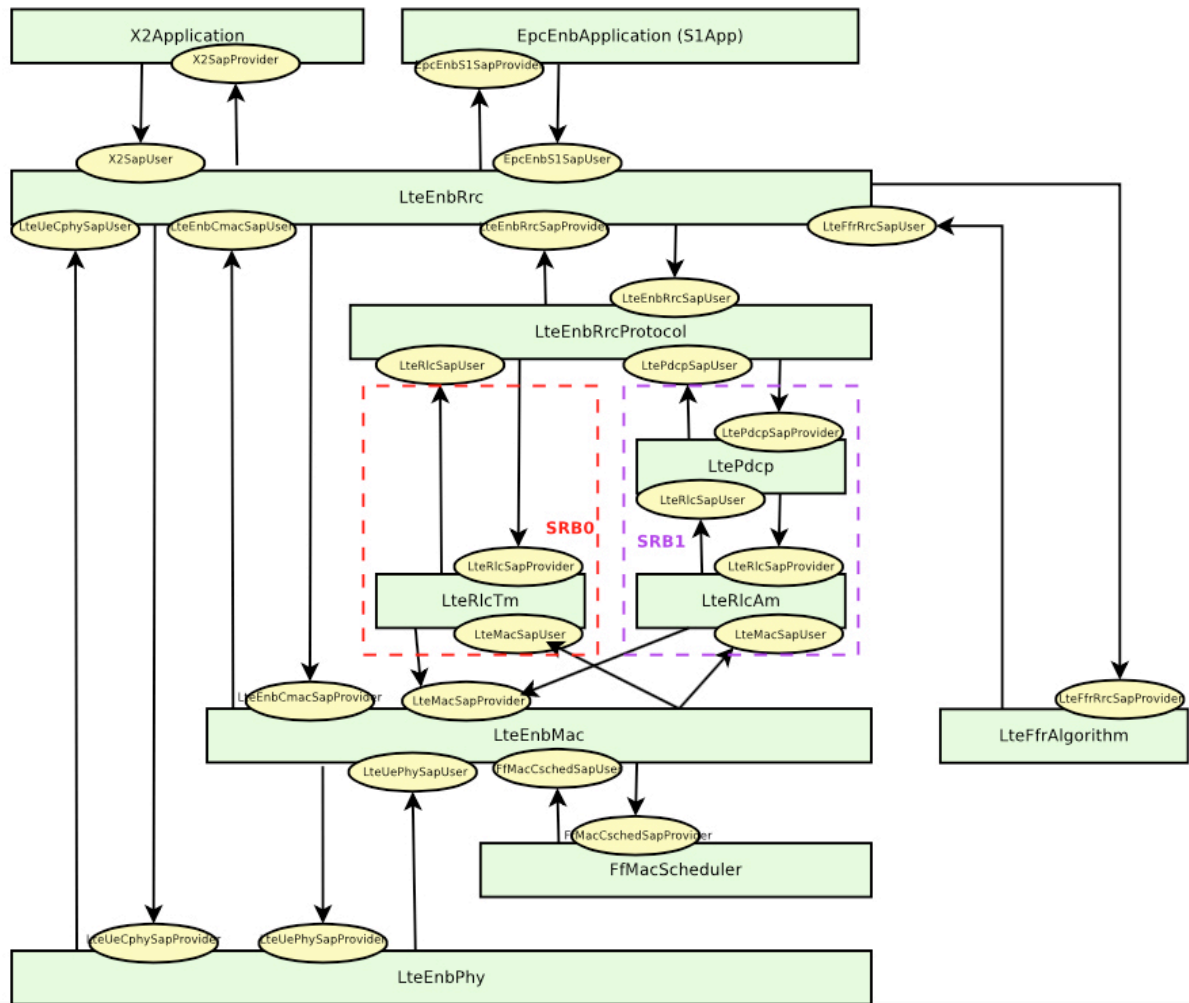
Εικόνα 10: UE data plane[13]



Εικόνα 11: UE control plane[13]



Εικόνα 12: eNB data plane[13]



Εικόνα 13: eNB control plane [13]

5.4. RRC model [13]

Το RRC μοντέλο είναι αρμόδιο για τις εξής λειτουργίες:

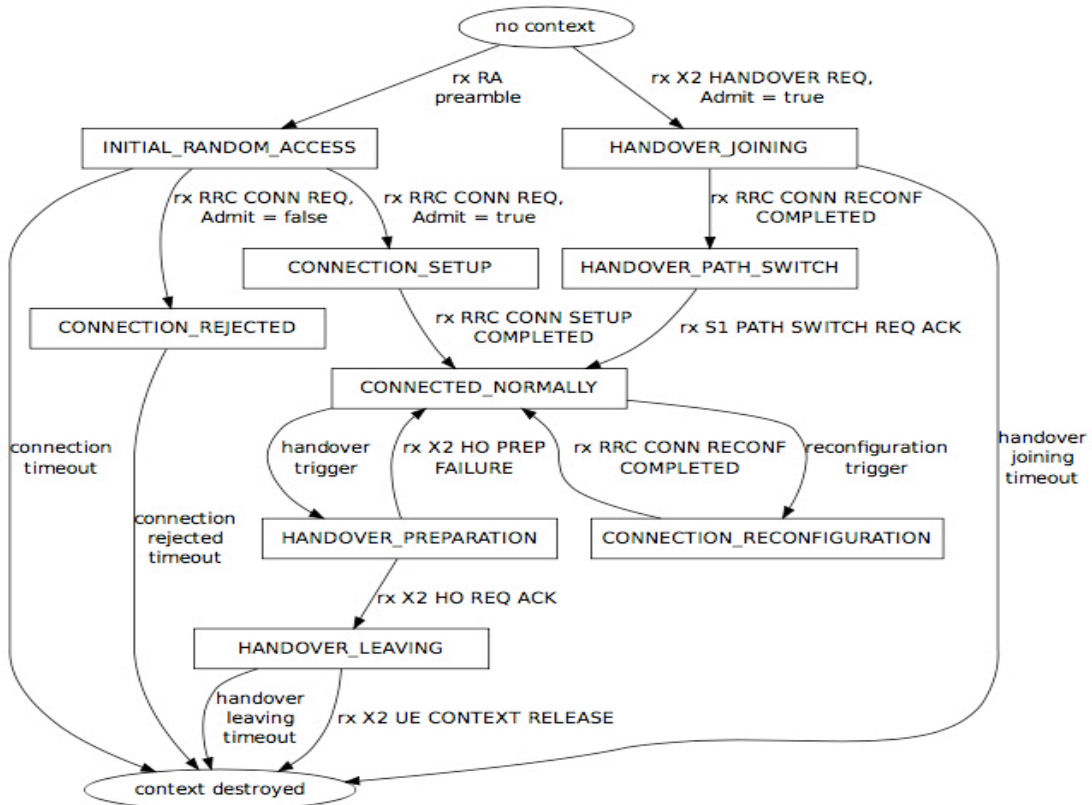
- Δημιουργία και ερμηνεία των πληροφοριών συστήματος (Master Information Block, System Information Block Type 1, 2)
- Αρχική επιλογή κελιού
- Διαδικασία για τη εγκαθίδρυση σύνδεσης του RRC
- Διαδικασία αναδιαμόρφωσης του RRC, η οποία περιλαμβάνει την αναδιαμόρφωση του δείκτη SRS (Sounding Reference Signals) διαμόρφωσης, αναδιαμόρφωση της PHY TX λειτουργίας, αναδιαμόρφωση των μετρήσεων του UE, ρύθμιση του κομιστή δεδομένων ραδιοσυχνοτήτων και του handover
- Διαδικασία επανεγκαθίδρυσης RRC σύνδεσης συμπεριλαμβανομένου και του handover.

Από την άλλη πλευρά η αρχιτεκτονική του διαχωρίζεται κυρίως στα ακόλουθα συστατικά στοιχεία :

- Τις RRC οντότητες LteUeRrc και LteEnbRrc που υλοποιούν τις καταστάσεις της μηχανής για τις RRC οντότητες αντίστοιχα για τα UEs και τα eNBs.
- Τα RRC SAPs LteUeRrcSapProvider, LteUeRrcSapUser, LteEnbRrcSapProvider, LteEnbRrcSapUser, που επιτρέπουν στο RRC να στέλνει και να λαμβάνει RRC μηνύματα και πληροφορίες.
- Κλάσσεις πρωτοκόλλου RRC LteUeRrcProtocolIdeal, LteEnbRrcProtocolIdeal, LteUeRrcProtocolReal, LteEnbRrcProtocolReal, που υλοποιούν δύο διαφορετικά μοντέλα για την μετάδοση των RRC μηνυμάτων

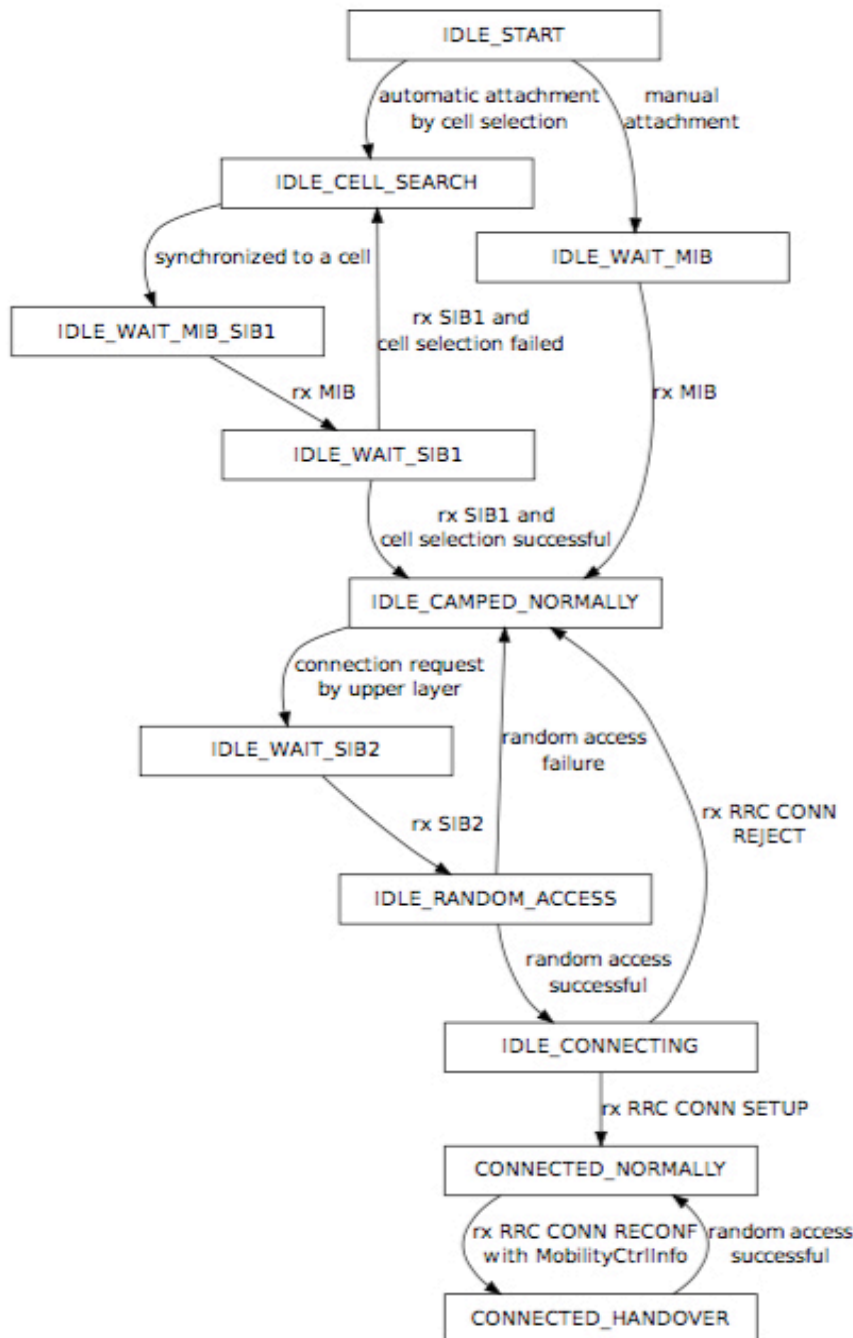
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία του RRC χρησιμοποιούν κι άλλους SAP providers προκειμένου να επιδρούν με την υπόλοιπη στοίβα πρωτοκόλλου. Όλοι αυτοί οι SAPs φαίνονται αναλυτικά στις Εικόνες 10, 11, 12, 13.

Αναφορικά με τις μεταβολές των καταστάσεων στο επίπεδο του RRC αυτές οι αλλαγές συνοψίζονται όσο αφορά το eNB στην παρακάτω εικόνα, Εικόνα 14 . Αναλυτικότερα φαίνεται η διαδικασία κατά την οποία ξεκινάει η τυχαία πρόσβαση, η οποία οδηγεί είτε σε απόρριψη της νέας σύνδεσης και καταστροφή του context, είτε στη ρύθμισή μιας νέας σύνδεσης. Στη δεύτερη περίπτωση το UE μπαίνει σε κατάσταση CONNECTED_NORMALLY και στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα ανάλογα με τις προϋποθέσεις που πληρούνται την εκάστοτε στιγμή, να υπάρξει είτε μια αναδιαμόρφωση της σύνδεσης, είτε να ξεκινήσει η διαδικασία για Handover, την ολοκλήρωση της οποίας θα διαδεχτεί ξανά η καταστροφή του context.



Εικόνα 14: eNB state transition[13]

Από την άλλη πλευρά τώρα οι αλλαγές κατάστασης των UE συνοψίζονται στην Εικόνα 15. Οι περισσότερες από αυτές είναι διαφανείς, διότι από τη στιγμή που το UE μεταβεί σε κατάσταση CONNECTED, δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή μηχανισμός που να το επιστρέφει σε κατάσταση IDLE. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι το LTE-EPC μοντέλο προσομοίωσης εστιάζεται κυρίως στην CONNECTED κατάσταση. Επιπλέον δεν υπάρχει μοντέλο που να υλοποιεί την περίπτωση αποτυχίας του radio link, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση IDLE και επίσης δεν μπορεί να πυροδοτηθεί η αλλαγή κατάστασης του UE από CONNECTED σε IDLE ούτε από το EPC ούτε από το NAS.



Εικόνα 15: UE state transformation [13]

5.5. RRC model Extensions

Το άνωθεν πρόβλημα αποτελεί μείζων ζήτημα για τον simulator, καθώς επιτρέπει σε γενικές γραμμές μόνο τη σύνδεση κι όχι την αποσύνδεση κάποιου UE από το αντίστοιχο eNB. Ιδιαίτερα στα M2M δίκτυα η λειτουργία αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς θα επιτρέψει οι μικροσυσκευές να ξυπνάνε και να μεταδίδουν τα δεδομένα, τα οποία έχουν και μόλις τερματίσει η μετάδοση να αποσυνδεόμαστε, να ελευθερώνουν τους πόρους και να «κοιμούνται» μέχρι κάποιο γεγονός να τις ενεργοποιήσει πάλι για μετάδοση δεδομένων. Συνεπώς με αυτό τον τρόπο εξοικονομούνται πόροι, μειώνεται το κόστος και ο φόρτος του δικτύου και συνάμα μειώνεται και η ενεργειακή κατανάλωση. Οδηγούμαστε λοιπόν σε μια νέα τεχνολογία η οποία δεν βελτιώνει απλά και μόνο τις ζωές μας στον τομέα της καθημερινότητας προσφέροντας λύσεις σε αυτή, αλλά συνάμα εξοικονομεί και ενέργεια και φυσικούς πόρους .

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής κατανόωντας τη σημασία της άνωθεν λειτουργίας ασχοληθήκαμε εκτενώς με τον τρόπο με τον οποίο μπορεί η συγκεκριμένη διαδικασία να υλοποιηθεί. Ύστερα από ενδελεχή και εμπειρισματομένη έρευνα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι για να γίνει αυτό χρειάζεται να επεκτείνουμε τις ήδη υπάρχουσες λειτουργίες του ns προσθέτοντας ορισμένες δικές μας συναρτήσεις, οι οποίες θα υλοποιούν την επικείμενη διαδικασία σύμφωνα πάντα με τα πρότυπα και τις οδηγίες της 3GPP.

Τα αρχεία τα οποία τροποποιήσαμε είναι τα `lte-ue-rrc.h` και `lte-ue-rrc.cc`. Στα αρχεία αυτά ορίσαμε και υλοποιήσαμε όλες τις απαραίτητες συναρτήσεις που χρειάζονται ώστε να μπορεί να μεταβαίνει το UE από την CONNECTED κατάσταση σε κατάσταση IDLE και να μπορεί στη συνέχεια άμα το επιθυμεί να μεταβεί ξανά σε CONNECTED κατάσταση. Αυτό προϋποθέτει ότι το UE μετά την αποσύνδεσή του από το eNB θα έχει αποδεσμεύσει όλους τους δεσμευμένους πόρους και κανάλια και σύμφωνα με τα κριτήρια σχεδιασμού της 3GPP θα πρέπει να επιστρέφει σε IDLE_CAMPED_NORMALLY κατάσταση ώστε να μπορεί στη συνέχεια να συνδεθεί είτε στο ίδιο eNB είτε σε διαφορετικό.

Το αρχείο `lte-ue-rrc.h` αποτελεί ένα αρχείο βιβλιοθήκης μέσα στο οποίο βρίσκονται ορισμένες όλες οι συναρτήσεις που αφορούν το UE στο επίπεδο του RRC. Στο αρχείο αυτό ορίσαμε κι εμείς τρεις συναρτήσεις, οι οποίες είναι η `SetState(State m_state)`, η `ReleaseRrcResource()` και η `AllocRrcResource()` και οι οποίες έχουν υλοποιηθεί στο αρχείο `lte-ue-rrc.cc` και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Το αρχείο `lte-ue-rrc.cc` από την άλλη πλευρά περιλαμβάνει υλοποιημένες όλες τις συναρτήσεις που περιγράφονται στο ομώνυμο `.h` αρχείο συμπεριλαμβανομένων και αυτών που προσθέσαμε εμείς. Αρχικά η `SetState(State m_state)` παίρνει σαν όρισμα την κατάσταση του συστήματος εκείνη τη στιγμή και ανάλογα αν η κατάσταση είναι IDLE_CAMPED_NORMALLY, τότε καλεί την `ReleaseRrcResource()`, ενώ αν η κατάσταση είναι CONNECTED_NORMALLY ενημερώνει τη μεταβλητή `m_state` για την κατάσταση και στη συνέχεια καλεί την `AllocRrcResource()`. Η `ReleaseRrcResource()` είναι αρμόδια για την απελευθέρωση των πόρων και με τη σειρά της ορίζει αρχικά έναν iterator, ο οποίος αναφέρεται στον Radio Bearer. Στη συνέχεια διαβάζει την τιμή της μεταβλητής `m_state`, ώστε να γνωρίζει σε ποια ακριβώς κατάσταση βρίσκεται το σύστημα εκείνη τη στιγμή, ώστε να πράξει ανάλογα. Σε περίπτωση που στο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση IDLE_CAMPED_NORMALLY, εκτυπώνει ένα μήνυμα κονσόλας, όπου ενημερώνει το χρήστη ότι έχουν ήδη ελευθερωθεί οι Rrc πόροι. Αν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση IDLE_CONNECTING, τότε απλά παρακάμπτει την

υπάχουσα συνάρτηση και συνεχίζει στο υπόλοιπο σενάριο, ενώ αντίθετα αν το UE βρίσκεται σε κατάσταση `CONNECTED_NORMALLY`, `CONNECTED_HANDOVER`, `CONNECTED_PHY_PROBLEM`, `CONNECTED_REESTABLISHING`, τότε ενημερώνεται το `LteSapUser` για την επικείμενη ελευθέρωση της σύνδεσης και στη συνέχεια το `LteUeCmacProvider` ώστε να αφαιρεθεί όλα τα λογικά κανάλια. Στη συνέχεια καθαρίζονται οι πίνακες με τους bearers και τα ids τους και θέτουμε τον δείκτη που αφορά την πληροφορία του signaling σε τιμή 0, ενώ ακολουθεί η μεταβολή της κατάστασης του UE σε `IDLE_CAMPED_NORMALLY`. Από την άλλη πλευρά έχουμε την `AllocRrcResources()`, η οποία είναι αρμόδια για την προσάρτηση του UE σε έναν eNB. Λειτουργεί δηλαδή λίγο πολύ σαν την `Attach()` του `LteHelper`. Ελέγχει αρχικά αν το UE βρίσκεται στην κατάσταση `IDLE_CAMPED_NORMALLY`, δηλαδή έχει βρει κάποιο κελί στο οποίο έχει γίνει camped. Ελέγχεται στη συνέχεια αν το UE έχει περάσει από την κατάσταση του Sib 2 και αν αυτό ευσταθεί, κάνει reset μια flag μεταβλητή αρμόδια για το `connection pending` σε false και στη συνέχεια θέτει την κατάσταση του UE σε `IDLE_RANDOM_ACCESS` και καλεί την `StartContentionBasedRandomAccessProcedure()`, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία του RACH για σύνδεση στον επόμενο eNB κόμβο.

Προκειμένου ωστόσο όλη η παραπάνω υλοποίηση να μην αποτελεί απλά μια θεωρητική προσέγγιση στον εν λόγω περιορισμό που αντιμετωπίζουμε, στα πλαίσια της συγκεκριμένης πτυχιακής αναπτύχθηκαν και κάποια σενάρια χρήσης, τα οποία περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο και επιβεβαιώνουν πανηγυρικά την ορθότητα και τη λειτουργικότητα του εν λόγω εγχειρήματος.

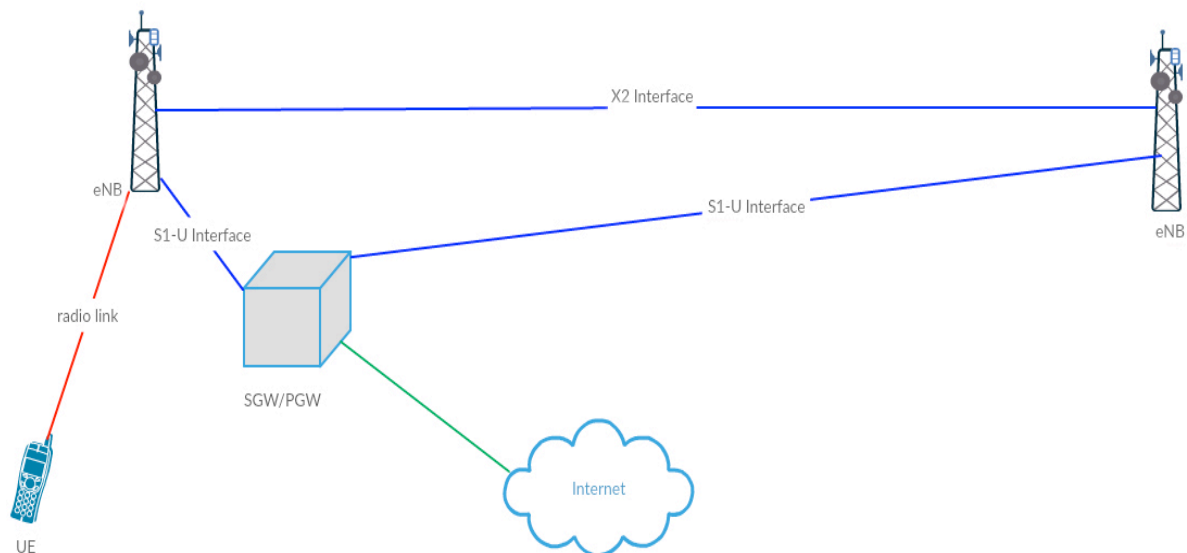
6. VALIDATION EXPERIMENTS

6.1. Scenarios

Προκειμένου να επιβεβαιώσουμε την έρευνα μας αναπτύξαμε ορισμένα σενάρια, τρία στον αριθμό, τα οποία είναι διαφορετικά μεταξύ τους και αναλύονται διεξοδικά παρακάτω.

Στο πρώτο σενάριο ασχοληθήκαμε με την περιοχή του Handover και ειδικότερα με ένα σενάριο το οποίο αφορά το ring – rong Handover. Το ring-pong Handover αφορά τη σύνδεση ενός UE σε έναν eNB και τη μετακίνησή του προς ένα δεύτερο eNB αρκετά πιο μακριά από τον πρώτο, στον οποίο όταν βρεθεί εντός εύρους θα συνδεθεί. Αποτελεί ένα μείζων πρόβλημα για τις τηλεπικοινωνίες καθώς μειώνει σημαντικά την αποδοτικότητα των δικτύων που χρειάζονται πόρους στα λογικά τους κανάλια για τη διεκπαιρέωση των αιτήσεων για Handover. Έτσι λοιπόν με το σενάριο αυτό επιδιώκουμε να επαληθεύσουμε τον ισχυρισμό αυτό και να τεκμηριώσουμε και την ύπαρξη των υπόλοιπων δύο σεναρίων που ακολουθούν.

Πιο αναλυτικά στο σενάριο αυτό ξεκινήσαμε με τον ορισμό δύο eNB κόμβων τον πρώτο στη θέση (10,0,0) και τον δεύτερο στη θέση (1000,0,0). Ορίσαμε επίσης κι ένα UE, το οποίο βρίσκεται αρχικά στη θέση (0,0,0) και κινείται κατά μήκος του άξονα x από το πρώτο eNB προς το δεύτερο και με ταχύτητα ίση με (15,0,0). Η τοπολογία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 16. Οι κόκκινες κουκίδες που ενώνονται μεταξύ αντιπροσωπεύουν τα eNBs, ενώ η κόκκινη κουκίδα που είναι μεμονωμένη αντιπροσωπεύει το UE. Από την άλλη η πρώτη γκρι κουκίδα που ενώνεται με το eNB αντιπροσωπεύει το SGW/PGW και η δεύτερη το Internet. Ορίσαμε ακόμα και 2 συναρτήσεις, εκ των οποίων η πρώτη μας παρέχει στοιχεία αναφορικά με το UE, δηλαδή το IMSI του, το RNTI (Radio Network Temporary Identifier) του και το CellId στο οποίο έχει συνδεθεί και η δεύτερη μας ενημερώνει για τυχόν αλλαγές στην κατάσταση του UE, δηλαδή κατά τη μετάβαση από IDLE_CAMPED_NORMALLY σε IDLE_WAIT_SIB2 κ.α.. Έχουμε δημιουργήσει ακόμα και μια συνάρτηση, η οποία καλείται προγραμματισμένα από τον simulator και αποσκοπεί στο να επαναπρογραμματίζει την κλήση της και να ελέγχει συνεχώς πότε το UE βρίσκεται εντός εύρους του πρώτου και πότε εντός εύρους του δεύτερου κόμβου, ώστε να εκτελέσει το handover. Στο κύριο μέρος του σεναρίου εκτός από τον ορισμό των eNBs και του UE και τον προσδιορισμό της θέσης τους και της ταχύτητάς του αντίστοιχα, δημιουργούμε και το EPC και έναν απομακρυσμένο παροχέα, ώστε να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε στη συνέχεια ολόκληρη την υποδομή του Internet. Και αφού είμαστε έτοιμοι με αυτά, φορτώνουμε στο UE και στα eNBs τα χαρακτηριστικά αυτά (π.χ.κινητικότητα) και επιπλέον φορτώνουμε στο UE τη στοίβα IP, ώστε να πάρει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να μπορεί να έχει δικιά του IP διεύθυνση και να φορτώνει εφαρμογές, ενώ θέτουμε κι ένα default gateway μέσω του οποίου θα γίνεται και η επικοινωνία. Προσαρτούμε στη συνέχεια το UE στο πρώτο eNB και συνάμα δημιουργούμε και την X2 σύνδεση μεταξύ των eNB κόμβων, ώστε αν μπορεί να γίνει το handover όταν χρειαστεί. Σειρά έχουν ο ορισμός των ports για downlink και uplink, μέσω των οποίων οι εφαρμογές θα επικοινωνούν. Ακολουθεί ο ορισμός των εφαρμογών και στη συνέχεια η εκτέλεση και η παύση τους.

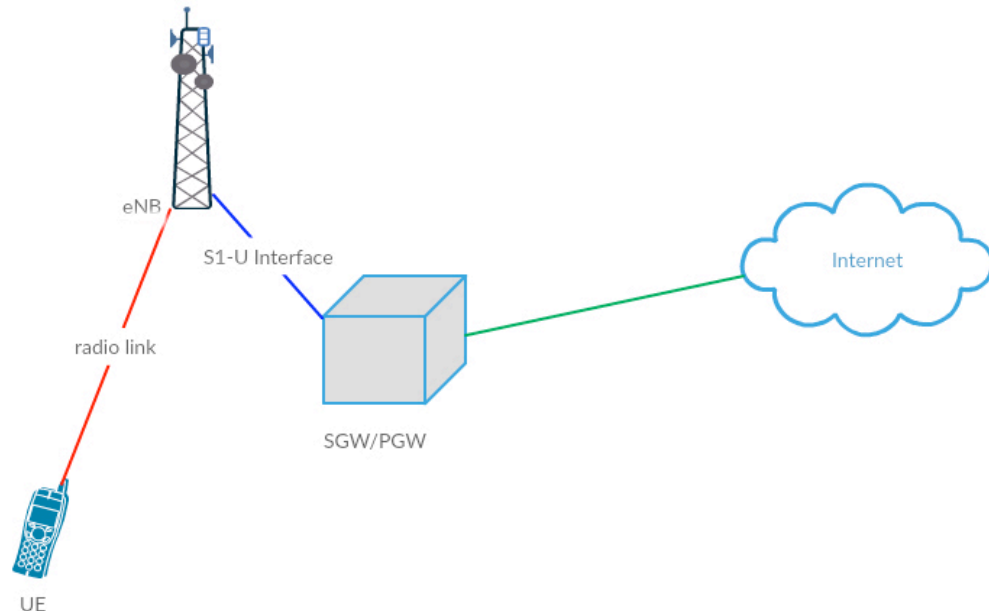


Εικόνα 16: Scenario 1 topology

Στο δεύτερο σενάριο ασχοληθήκαμε με την αποδέσμευση των πόρων του συστήματος. Όπως αναφέραμε και πιο πριν το ring-pong Handover δημιουργεί πρόβλημα στις τηλεπικοινωνίες, καθώς μειώνει την αποδοτικότητα του Handover. Έτσι κρίνεται επιτακτικό μια συσκευή μετά την προσάρτησή της σε έναν eNB κόμβο και μετά το τέλος της μετάδοσης των δεδομένων να μπορεί να μπαίνει σε κατάσταση IDLE_CAMPED_NORMALLY και στη συνέχεια να μπορεί να ξανασυνδεθεί στον κόμβο όταν αυτό κριθεί απαραίτητο για τη μετάδοση νέων δεδομένων. Έτσι λοιπόν με αυτό το σενάριο επιδιώκουμε να τεκμηριώσουμε την λειτουργία των συναρτήσεων που δημιουργήσαμε ως επέκταση στον ns3 και περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πιο αναλυτικά στο σενάριο αυτό ξεκινήσαμε με τον ορισμό μιας συνάρτησης, η οποία είναι αρμόδια για την παροχή πληροφοριών αναφορικά με το UE, όπως το IMSI του, το RNTI του, το CellId στο οποίο έχει συνδεθεί αλλά και μεταβολές στην κατάστασή του, όπως από CONNECTED_NORMALLY σε IDLE_CAMPED_NORMALLY κ.α.. Δημιουργήσαμε ακόμα μια συνάρτηση στη συνέχεια, η οποία καλείται προγραμματισμένα από τον simulator και είναι αρμόδια για την αλλαγή κατάστασης του UE από CONNECTED_NORMALLY σε IDLE_CAMPED_NORMALLY και το αντίθετο, δηλαδή είναι αρμόδια για την αποδέσμευση και την επαναδέσμευση των πόρων, χρησιμοποιώντας στον κορμό της τις συναρτήσεις που ορίσαμε στο LteUeRrc και περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια ορίζουμε την υποδομή για το EPC και το gateway, ενώ παράλληλα δημιουργούμε κι έναν απομακρυσμένο εξυπηρετητή και την υποδομή του Internet, ώστε να μπορούν οι συσκευές να έχουν διευθύνσεις και πρόσβαση σε αυτό. Ακολουθεί ο ορισμός ενός κόμβου eNB και ενός UE, ορίζοντας σταθερές θέσεις και για τα δύο (10,0,0) και (50,0,0) αντίστοιχα. Η τοπολογία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 17. Η πρώτη αριστερά κόκκινη κουκίδα αντιπροσωπεύει τον eNB και η δεξιά το UE. Από την άλλη η πρώτη γκρι κουκίδα που ενώνεται με το eNB αντιπροσωπεύει το SGW/PGW και η δεύτερη το Internet. Ακολουθεί η εγκατάσταση της IP στοίβας στο UE, της απονομής IP διεύθυνσης και της εγκατάστασης των εφαρμογών. Επίσης ορίζουμε και το default gateway για το UE. Επόμενο στη σειρά είναι η προσάρτηση του UE στον eNB και η δημιουργία εφαρμογών που θα τρέχουν, ώστε να διαμοιράζονται δεδομένα, αλλά και ο ορισμός των θυρών από τις οποίες θα γίνεται η επικοινωνία αυτή.

Με λίγα λόγια στο προηγούμενο σενάριο περιγράψαμε το πως μπορεί ένα UE που είναι προσαρτημένο σε ένα eNB και σε κατάσταση CONNECTED_NORMALLY να μπει σε κατάσταση IDLE_CAMPED_NORMALLY, δηλαδή σε κατάσταση αναμονής, άρα και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και πόρων και στη συνέχεια να ξανασυνδεθεί στο ίδιο eNB για να ξεκινήσει μια νέα σύνοδο επικοινωνίας.



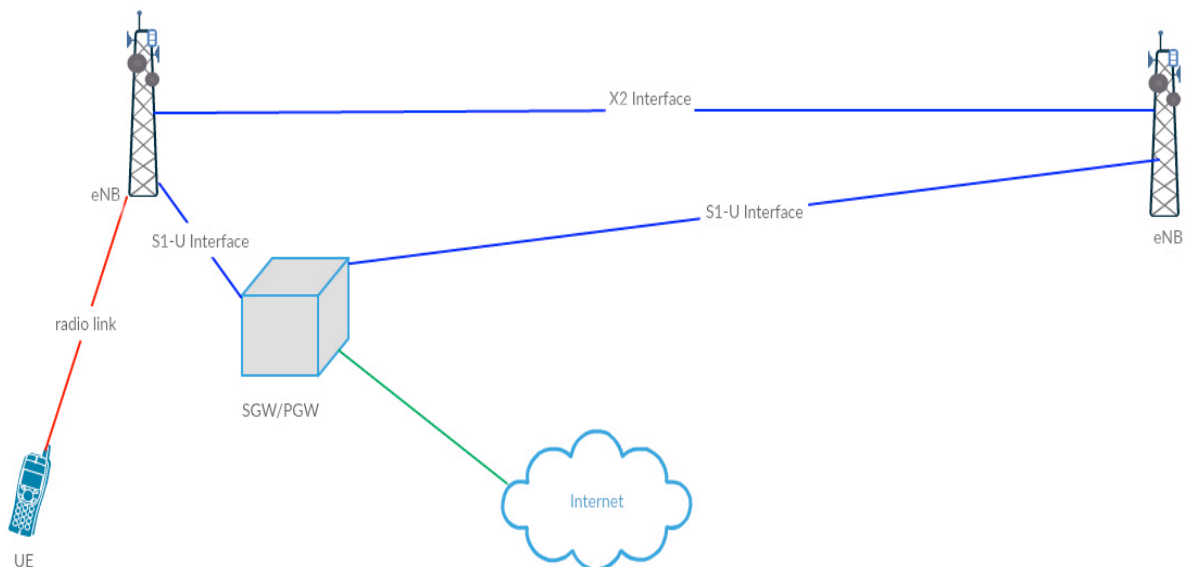
Εικόνα 17: Scenario 2 topology

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο περιλαμβάνει έναν συγκερασμό των προηγούμενων δύο. Δηλαδή παίρνει το σενάριο του ring-ring Handover και σε συνδυασμό με το δεύτερο σενάριο που αφορά την απελευθέρωση των πόρων δημιουργεί ένα σενάριο, στο οποίο μετά την αρχική σύνδεση του UE στον πρώτο eNB, κινείται σταδιακά προς το δεύτερο eNB, ωστόσο όταν απομακρυνθεί αρκετά από τον πρώτο μπαίνει σε κατάσταση IDLE_CAMPED_NORMALLY απελευθερώνοντας τους πόρους και εξοικονομώντας ενέργεια, ενώ καθώς πλησιάζει όλο και πιο κοντά στο δεύτερο συνδέεται σε αυτό χωρίς να κάνει handover. Επιδιώκουμε λοιπόν με αυτό το σενάριο να αποδείξουμε ότι η απελευθέρωση των πόρων σε ένα σενάριο λειτουργεί ευεργετικά προς το όλο σύστημα.

Πιο αναλυτικά στο σενάριο αυτό ξεκινήσαμε με τον ορισμό δύο eNB κόμβων τον πρώτο στη θέση (10,0,0) και τον δεύτερο στη θέση (1000,0,0). Ορίσαμε επίσης κι ένα UE το οποίο βρίσκεται αρχικά στη θέση (0,0,0) και κινείται κατά μήκος του άξονα x'x από το πρώτο eNB προς το δεύτερο και με ταχύτητα ίση με (15,0,0). Η τοπολογία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 18. Οι κόκκινες κουκίδες που ενώνονται μεταξύ αντιπροσωπεύουν τα eNBs, ενώ η κόκκινη κουκίδα που είναι μεμονωμένη αντιπροσωπεύει το UE. Από την άλλη η πρώτη γκρι κουκίδα που ενώνεται με το eNB αντιπροσωπεύει το SGW/PGW και η δεύτερη το Internet. Ορίσαμε ακόμα και 2 συναρτήσεις, εκ των οποίων η πρώτη μας παρέχει στοιχεία αναφορικά με το UE, δηλαδή το IMSI του, το RNTI του και το CellId στο οποίο έχει συνδεθεί και τυχόν αλλαγές στην κατάσταση του UE, δηλαδή κατά τη μετάβαση από IDLE_CAMPED_NORMALLY σε CONNECTED_NORMALLY κ.α.. Η δεύτερη, η οποία καλείται προγραμματισμένα από τον simulator και αποσκοπεί στο να επαναπρογραμματίζει την κλήση της και να ελέγχει συνεχώς πότε το UE βρίσκεται εντός εύρους του πρώτου και πότε εντός εύρους του δεύτερου κόμβου, ώστε να εκτελέσει το ανάλογο με τη θέση που βρίσκεται το UE κάθε φορά, δηλαδή αν είναι απομακρυσμένο από τον πρώτο κόμβο να θέσει το UE σε κατάσταση

IDLE_CAMPED_NORMALLY και στη συνέχεια σε IDLE_START, ενώ αν βρίσκεται εντός εύρους του δεύτερου eNB να ξεκινήσει τη RACH διαδικασία για να συνδεθεί σε αυτό. Στο κύριο μέρος του σεναρίου εκτός από τον ορισμό των eNBs και του UE και τον προσδιορισμό της θέσης τους και της ταχύτητάς του αντίστοιχα, δημιουργούμε και το EPC και έναν απομακρυσμένο παροχέα, ώστε να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε στη συνέχεια ολόκληρη την υποδομή του Internet. Και αφού είμαστε έτοιμοι με αυτά, φορτώνουμε στο UE και στα eNBs τα χαρακτηριστικά αυτά (π.χ.κινητικότητα) και επιπλέον φορτώνουμε στο UE τη στοίβα IP, ώστε να πάρει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να μπορεί να έχει δικιά του IP διεύθυνση και να φορτώνει εφαρμογές, ενώ θέτουμε κι ένα default gateway μέσω του οποίου θα γίνεται και η επικοινωνία. Προσαρτούμε στη συνέχεια το UE στο πρώτο eNB. Σειρά έχουν ο ορισμός των ports για downlink και uplink, μέσω των οποίων οι εφαρμογές θα επικοινωνούν. Ακολουθεί ο ορισμός των εφαρμογών και στη συνέχεια η εκτέλεση και η παύση τους .

Με λίγα λόγια δηλαδή στο σενάριο αυτό αντί να γίνεται ring-ring handover, γίνεται πρώτα release και στη συνέχεια σύνδεση στον επόμενο eNB. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε τα πλεονεκτήματα που μας δίνει η αποδέσμευση των πόρων προς όφελος των επικοινωνιών, εξαλείφοντας με αυτό τον τρόπο τα μειονεκτήματα της χρήσης του ring-ring handover και εξοικονομώντας πόρους και ενέργεια.



Εικόνα 18: Scenario 3 topology

6.2. Scenario Outputs

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύσαμε διεξοδικά τα σενάρια τα οποία δημιουργήσαμε προκειμένου να αναδείξουμε το πρόβλημα του ring-ring Handover και στη συνέχεια να προτείνουμε λύσεις γι' αυτό. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων σεναρίων τα οποία επιβεβαιώνουν στο ακέραιο τους άνωθεν ισχυρισμούς

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου χρήσης, το οποίο αφορά το ring-ring Handover. Παρατηρούμε λοιπόν στη εν λόγω εικόνα ότι

Ξεκινάει κανονικά η διαδικασία του RACH για την προσάρτηση του UE στον πρώτο eNB. Αφού αυτό στεφεί με επιτυχία, καθώς το UE κινείται προς το δεύτερο eNB και αφού απομακρυνθεί αρκετά από το πρώτο, εκτελείται το Handover για πρώτη φορά και συνδέεται το UE στο δεύτερο eNB. Στη συνέχεια το UE επιστρέφει πίσω προς τον πρώτο eNB και αφού απομακρυνθεί αρκετά από το δεύτερο και βρεθεί εντός εύρους από τον πρώτο, τότε εκτελείται το Handover για δεύτερη φορά και συνδέεται ξανά το UE στον πρώτο eNB.

```

UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0
State changed from IDLE_WAIT_MIB to IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0
State changed from IDLE_CAMPED_NORMALLY to IDLE_WAIT_SIB2
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0
State changed from IDLE_WAIT_SIB2 to IDLE_RANDOM_ACCESS
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1
State changed from IDLE_RANDOM_ACCESS to IDLE_CONNECTING
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1
State changed from IDLE_CONNECTING to CONNECTED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1
State changed from CONNECTED_NORMALLY to CONNECTED_HANDOVER
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1
State changed from CONNECTED_HANDOVER to CONNECTED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1
State changed from CONNECTED_NORMALLY to CONNECTED_HANDOVER
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 2
State changed from CONNECTED_HANDOVER to CONNECTED_NORMALLY

```

Εικόνα 19: First scenario output

Στην εικόνα 20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου χρήσης, στο οποίο παρατηρούμε ότι έχουμε ένα eNB κι ένα UE. Ξεκινάει κανονικά η διαδικασία του RACH για την προσάρτηση του UE στο eNB και μετά την επιτυχή προσάρτησή του, μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα εισέρχεται σε IDLE_CAMPED_NORMALLY κατάσταση, δηλαδή σε κατάσταση αναμονής. Παρατηρούμε επίσης ότι ξανακάνει τη διαδικασία για σύνδεση στο eNB όταν χρειαστεί και αυτή στέφεται με επιτυχία, δίνοντας έτσι μια πρώτη γεύση της μεθόδου με την οποία μπορεί αν αντικατασταθεί το ring-pong Handover.

```

UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 0 State changed from: IDLE_WAIT_MIB to: IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 0 State changed from: IDLE_CAMPED_NORMALLY to: IDLE_WAIT_SIB2
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 0 State changed from: IDLE_WAIT_SIB2 to: IDLE_RANDOM_ACCESS
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_RANDOM_ACCESS to: IDLE_CONNECTING
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_CONNECTING to: CONNECTED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: CONNECTED_NORMALLY to: IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_CAMPED_NORMALLY to: IDLE_RANDOM_ACCESS
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 2 State changed from: IDLE_RANDOM_ACCESS to: IDLE_CONNECTING
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 2 State changed from: IDLE_CONNECTING to: CONNECTED_NORMALLY

```

Εικόνα 20: Second scenario output

Στην Εικόνα 21 παρατηρούμε την έξοδο του σεναρίου τρία, η οποία συνδυάζει τα προηγούμενα δύο σεναρία και δείχνει με τον πλέον σαφή και κατανοητό τρόπο ότι η χρήση του ring-pong Handover δεν είναι απαραίτητη. Έχουμε λοιπόν δύο eNBs και ένα UE. Το UE ξεκινάει μια διαδικασία RACH για την προσάρτησή του στο πρώτο eNB και ξεκινάει να κινείται προς το δεύτερο. Μόλις απομακρυνθεί αρκετά από το πρώτο eNB

τότε μεταβαίνει σε IDLE_CAMPED_NORMALLY κατάσταση απελευθερώνοντας όλους τους πόρους που κατέχει. Στη συνέχεια λίγο πριν ξεκινήσει τη RACH διαδικασία για την προσάρτησή του στο δεύτερο eNB, μπαίνει σε κατάσταση IDLE_START και στη συνέχεια ξεκινάει όπως βλέπουμε η διαδικασία RACH και εν τέλει προσαρτάται το UE στο δεύτερο eNB, επιβεβαιώνοντας με τον πλέον κατηγορηματικό τρόπο, το γεγονός ότι η υλοποίηση που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο στα πλαίσια της επέκτασης του NS λειτουργεί άψογα και για τη σύνδεση από τον έναν κόμβο στον άλλο δεν απαιτείται πλέον το προβληματικό ring-rong Handover, αλλά μπορεί να επιτευχθεί και με απλή αποδέσμευση πόρων και εκ νέου έναρξη της RACH διαδικασίας.

```
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0 State changed from: IDLE_WAIT_MIB to: IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0 State changed from: IDLE_CAMPED_NORMALLY to: IDLE_WAIT_SIB2
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 0 State changed from: IDLE_WAIT_SIB2 to: IDLE_RANDOM_ACCESS
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_RANDOM_ACCESS to: IDLE_CONNECTING
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_CONNECTING to: CONNECTED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: CONNECTED_NORMALLY to: IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_CAMPED_NORMALLY to: IDLE_START
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_START to: IDLE_CELL_SEARCH
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_CELL_SEARCH to: IDLE_WAIT_MIB_SIB1
UE IMSI 1 CellId 2 RNTI 1 State changed from: IDLE_WAIT_MIB_SIB1 to: IDLE_WAIT_SIB1
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_WAIT_SIB1 to: IDLE_CAMPED_NORMALLY
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_CAMPED_NORMALLY to: IDLE_WAIT_SIB2
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 1 State changed from: IDLE_WAIT_SIB2 to: IDLE_RANDOM_ACCESS
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 3 State changed from: IDLE_RANDOM_ACCESS to: IDLE_CONNECTING
UE IMSI 1 CellId 1 RNTI 3 State changed from: IDLE_CONNECTING to: CONNECTED_NORMALLY
```

Εικόνα 21: Third scenario output

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή μελετήθηκαν τα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών, οι M2M επικοινωνίες και αναπτύχθηκαν και 3 σενάρια που μας επέτρεψαν να καταδείξουμε το πρόβλημα του ring-rong Handover και να προτείνουμε και να υλοποιήσουμε λύσεις γι' αυτό.

Αναφορικά με τα κυψελωτά δίκτυα επικοινωνιών ασχοληθήκαμε με τα δίκτυα 3ης και 4ης γενιάς και δείξαμε ιδιαίτερο ενδιαφέρον ειδικά για τα μελλοντικά δίκτυα 5ης γενιάς. Παρατηρήσαμε επίσης ότι η ανάπτυξη αυτή των δικτύων, τα μεγαλύτερη εύρη συχνοτήτων που προσφέρουν, οι μεγαλύτερες ταχύτητες και το συνεχώς μειωμένο κόστος αναπτύσσουν έναν νέο κλάδο των M2M επικοινωνιών. Ερευνήσαμε το πως αυτές οι επικοινωνίες μπορούν να υλοποιηθούν, τους περιορισμούς που αντιμετωπίζουν, αλλά και το πως θα αλληλεπιδρούν με την καθημερινότητά μας. Καταλήξαμε εν τέλει στο συμπέρασμα ότι τη συγκεκριμένη στιγμή πληρούνται οι ελάχιστες και παραπάνω δυνατές απαιτήσεις για την υλοποίηση αυτών, ενώ με την περαιτέρω ανάπτυξη των δικτύων οι απαιτήσεις αυτές θα υπερκαλυφθούν και θα μπορεί το εν λόγω εγχείρημα να τεθεί σε πλήρη εφαρμογή.

Τέλος ιδιαίτερη μνεία οφείλουμε να κάνουμε σε ένα βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι M2M επικοινωνίες και αφορά τα πολλά Handovers τα οποία επιβαρύνουν το δίκτυο και λειτουργούν ανασταλτικά στην αποδοτικότητα που αντιλαμβάνονται οι υπόλοιποι χρήστες του δικτύου. Δημιουργήσαμε λοιπόν ένα σενάριο το οποίο μας έδειξε το πως μια κινητή συσκευή ξεκινάει τη διαδικασία για να προσαρτηθεί σε έναν κόμβο και στη συνέχεια πως καθώς απομακρύνεται από αυτόν κάνει Handover με ένα δεύτερο και πάλι κατά την επιστροφή της προς τον πρώτο κάνει πάλι Handover προς αυτόν. Ύστερα από ενδελεχή έρευνα καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι μια προσωρινή αποδέσμευση των πόρων της κινητής συσκευής, όταν αυτή απομακρύνεται από έναν κόμβο ή δεν έχει επιπλέον δεδομένα να μεταδώσει, θα λειτουργούσε ευεγερτικά για το δίκτυο ξεπερνώντας τους περιορισμούς του ring-rong Handover. Για το λόγο αυτό επεκτείναμε το simulator πάνω στον οποίο κάναμε τα πειράματά μας, ώστε να υποστηρίξει αυτή τη λειτουργία των κυψελωτών δικτύων και δημιουργήσαμε δύο επιπλέον σενάρια, από τα οποία το πρώτο δείχνει πως μπορεί μια συσκευή να συνδέεται και να αποσυνδέεται συνεχώς από έναν κόμβο και το δεύτερο πως μπορεί μια συσκευή να συνδεθεί αρχικά σε έναν κόμβο, να αποδεσμεύσει έπειτα τους πόρους που έχει δεσμεύσει εφόσον δεν τους χρησιμοποιεί και στη συνέχεια να κάνει camp σε έναν δεύτερο σταθμό βάσης χωρίς να είναι διαρκώς συνδεδεμένη με το δίκτυο (άρα χωρίς τη χρήση Handover και με εξοικονόμηση πόρων και ενέργειας στο ενδιάμεσο). Έπειτα, στο 2^ο σταθμό βάσης μπορεί να συνδεθεί κανονικά εφόσον υπάρχει η αναγκη για κάποιο service. Δεδομένου λοιπόν ότι και τα δύο σενάρια λειτούργησαν άψογα, μπορούμε να ισχυριστούμε εν κατακλείδη πως η υλοποίησή μας λειτουργεί, είναι εφαρμόσιμη και θα μπορούσε να ενσωματωθεί στον προσομοιωτή ns-3 ώστε να αποφευχθούν τα επιπλέον Handover που κάνουν οι χρήστες λόγω της κίνησης στο χώρο.

Η παρούσα δουλειά δύναται να επεκταθεί με την μελέτη και υλοποίηση των συνθηκών εκκίνησης υπηρεσιών από (ή προς) το χρήστη, ώστε οι μεταβάσεις καταστάσεων να γίνονται με αυτοματοποιημένο τρόπο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Uplink	Ανερχόμενη ζεύξη
Release	Έκδοση
Roaming	Περιαγωγή
Low bandwidth	Χαμηλού εύρους ζώνης
Circuit-switched	Μεταγωγή κυκλώματος
E-mail	Ηλεκτρονική αλληλογραφία
Wideband	Ευρυζωνικός
Core band	Ζώνη πυρήνα
Digital divided	Ψηφιακά διαιρούμενος
Internet	Διαδίκτυο
Internet based services	Διαδικτυακές υπηρεσίες
Mobile broadband	Κινητή ευρυζωνικότητα
Data Rate	Ρυθμός δεδομένων
Delay	Καθυστέρηση
Capacity	Χωρητικότητα
Peak data rates	Μέγιστος ρυθμός δεδομένων
Base station	Σταθμός βάσης
Spectral efficiency	Φασματική αποδοτικότητα
Standardization	Προτυποποίηση
Requirements	Απαιτήσεις
Architecture	Αρχιτεκτονική
Detailed specifications	Λεπτομερείς απαιτήσεις
Testing and verification	Έλεγχος και πιστοποίηση
Enhanced Uplink	Ενισχυμένη ανερχόμενη ζεύξη
Spectrum flexibility	Ελαστικότητα φάσματος
Video streaming	Μετάδοση κινούμενης εικόνας
High-rate	Υψηλού ρυθμού
Low-latency	Χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης
Latency	Λανθάνουσα καθυστέρηση
Energy and cost	Ενέργεια και κόστος
Backhaul	Οπισθοζεύξη
Mobility support	Μετακινητική υποστήριξη
Blocking	Μπλοκάρισμα
Small scale fading	Μικρής κλίμακας διάλειαση
Large scale obstructions	Μεγάλης κλίμακας εμπόδια
Link acquisition	Απόκτηση ζεύξης
Phantom cells	Κελιά φαντάσματα
Single-user	Μονός χρήστης
Pilot contamination	Πρόσμειξη πιλότου
Overhead	Επίβαρο
Single carrier	Απλού φέροντος
Network planning	Σχεδιασμός δικτύου
Renewable energy	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
Hardware solutions	Λύσεις υλικού
Low-loss	Χαμηλών απωλειών
Point-to-multipoint	Σημείο-πολυσημειακός
Framework	Πλαίσιο
Peer-to-peer	Ομότιμο

Air interface	Ραδιοεπαφή
Smart grid	Έξυπνο πλέγμα
Body area	Περιοχή σώματος
Local area	Τοπική περιοχή
Personal area	Προσωπική περιοχή
Power grid	Ενεργειακό πλέγμα
Beacon-enabled	Ενεργού ραδιοφάρου
Beaconless	Άνευ ραδιοφάρου
Data detecting plane	Επίπεδο εντοπισμού δεδομένων
Contention based	Διαμαχοπαγής
Scheduling based	Προγραμματισμενοπαγής
Cluster	Συστάδα
Feature	Γνώρισμα
User utility	Βοήθημα χρήστη
Namespace	Ονοματοχώρος
Mailing list	Κατάλογος αποδεκτών
Scripting language	Σεναριογλώσσα
Implementation environment	Περιβάλλον εκτέλεσης υλοποιημένου κώδικα
Handover	Μεταπομπή
Radio link	Ραδιοζεύξη
Downlink	Κατερχόμενη ζεύξη
Default gateway	Προεπιλεγμένη πύλη

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
GSM/EDGE	Groupe Spécial Mobile / Enhanced Data for GSM Evolution
UMTS/HSPA	Universal Mobile Telecommunication System / High Speed Packet Access
Mbps	Megabits per second
MHz	Mega Hertz
IP	Internet Protocol
EPC	Evolved Packet Core
MTC	Machine Type Communication
3GPP	3rd Generation Partnership Project
1G	1st Generation
2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
4G	4th Generation
5G	5th Generation
FCC	Federal Communication Commission
POTS	Plain Old Telephony Services
CEPT	European Conference for Postal and Telecommunication services
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
TDMA	Time-division Multiple Access
CDMA	Code-division Multiple Access
SMS	Short Message Services
GPRS	General Packet Radio Services
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
FPLMTS	Future Landing Public Mobile Telecommunications
WARC	World Administrative Radio Congress
FDD	Frequency Division Duplex
TDD	Time Division Duplex
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
E-UTRA	Evolved UTRA
QoS	Quality of Service
SAE	System Architecture Evolution
mmWAVE	Millimeter WAVE

MIMO	Multiple Input Multiple Output
BS	Base Station
SIR	Signal to Interference Ratio
RAT	Radio Access Technology
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SU-MIMO	Single User MIMO
FD-MIMO	Full Dimension MIMO
FDMA/TDMA	Frequency Division Multiple Access / Time Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
CP	Cyclic Prefix
UFMC	Universal Filtered Multicarrier
NFV	Network Function Virtualization
SDN	Software Defined Networking
RAN	Random Access Network
IOT	Internet Of the Things
SG	Signaling Gateway / Smart Grid
HGW	Home Gateway
SGW	Sub-Gateway
BAN	Body Area Network
NAN	Neighbourhood Area Network
HAN	Home Area Network
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
uPnP	Universal Plug'n'Play
DLNA	Digital Living Network Alliance
IGRS	Intelligent Grouping and Resource Sharing
QM	QoS Manager
QPH	QoS Policy Holder
QD	QoS Device
DMS	Digital Media Server
DSCP	Differentiated Services CodePoint
WMM	WiFi MultiMedia
SONET	Synchronous Optical NETwork

SDH	Synchronous Digital Hierarchy
TS	Transmission Substations
DS	Distribution SubStations
UWD	Ultra Wideband
WSN	Wireless Sensor Network
MCN	Mobile Cellular Network
HSS	Half-slot Stolen
VLR	Visitor Location Register
SGSN/MME	Serving GPRS Support Node / Mobile Management Entity
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
RNC	Radio Network Controller
APN	Access Point Network
NAS	Non Access Stratum
MTCN	Machine Type Communication Device
RB	Resource Block
MTCG	Machine Type Communication Gateway
OMA-DM	Open Mobile Alliance Device Management
USSD	Unstructured Service Data
RRC	Radio Resource Control
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
RLC	Radio Link Control
MAC	Medium Access Control
PHY	Physical layer
SGW/PGW	Serving Gateway / Packet Gateway
UE	User Equipment
RRM	Radio Resource Management
API	Application Program Interface
PDU	Protocol Data Unit
SRS	Sounding Reference Signals
RNTI	Radio Network Temporary Identifier
RACH	Random Access Channel
IMS	IP Multimedia Subsystem
MSC	Mobile Switching Center
MAP	Mobile Application Part

MMI	Man Machine Interface
XCAP	XML Configuration Access Protocol
CoAP	Constrained Application Protocol
XML	eXtensible Markup Language

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Erik Dahlman, Stefan. Parkvall and Johan. Skräödl, 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier Ltd., 2011, pp.1-13.
- [2] Andrews J.G., Buzzi S., Wan Choi, Hanly S.V., Lozano A., Soong, A.C.K., Zhang, J.C., "What Will 5G Be?," in Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.32, no.6, pp.1065-1082, June 2014
- [3] Kim Chang, Soong, A., Tseng, M., Zhixian Xiang, "Global Wireless Machine-to-Machine Standardization," in Internet Computing, IEEE , vol.15, no.2, pp.64-69, March-April 2011
- [4] Galetić, V., Bojić, I., Kušek, M., Ježić, G., Dešić, S., Huljenić, D., "Basic principles of Machine-to-Machine communication and its impact on telecommunications industry," in MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention , vol., no., pp.380-385, 23-27 May 2011
- [5] Geng Wu, Talwar, S., Johnsson, K., Himayat, N., Johnson, K.D., "M2M: From mobile to embedded internet," in Communications Magazine, IEEE , vol.49, no.4, pp.36-43, April 2011
- [6] Yan Zhang, Rong Yu, Shengli Xie, Wenqing Yao, Yang Xiao, Guizani, M., "Home M2M networks: Architectures, standards, and QoS improvement," in Communications Magazine, IEEE , vol.49, no.4, pp.44-52, April 2011
- [7] Fadlullah, Z.M., Fouda, M.M., Kato, N., Takeuchi, A., Iwasaki, N., Nozaki, Y., "Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid," in Communications Magazine, IEEE , vol.49, no.4, pp.60-65, April 2011
- [8] Jian Zhang, Lianhai Shan, Honglin Hu, Yang Yang, "Mobile cellular networks and wireless sensor networks: toward convergence," in Communications Magazine, IEEE , vol.50, no.3, pp.164-169, March 2012
- [9] Taleb, T., Kunz, A., "Machine type communications in 3GPP networks: potential, challenges, and solutions," in Communications Magazine, IEEE , vol.50, no.3, pp.178-184, March 2012
- [10] Kan Zheng, Fanglong Hu, Wenbo Wang, Wei Xiang, Dohler, M., "Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications," in Communications Magazine, IEEE , vol.50, no.7, pp.184-192, July 2012
- [11] Gligoric, N., Krco, S., Drajić, D., Jokić, S., Jakovljević, B., "M2M device management in LTE networks," in Telecommunications Forum (TELFOR), 2011 19th , vol., no., pp.414-417, 22-24 Nov. 2011
- [12] Maeder Andreas, Rost Peter, Staehle Dirk, "The Challenge of M2M Communications for the Cellular Radio Access Network", Proc., Würzburg Workshop on IP: Joint ITG and Euro-NF Workshop "Visions of Future Generation Networks"(EuroView2011), 2011
- [13] "Design Documentation." *Design Documentation — Model Library*. Web. 27 Sept. 2015.