

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
Π.Μ.Σ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μελέτη της επικοινωνίας M2M σε LTE δίκτυα κινητών επικοινωνιών

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Χρησιδης
6/27/2012



Η εκπόνηση της εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Αγγελικής Αλεξίου

РАНЕЕЗНАМО ПЕРПАА

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

2.	Εισαγωγή	6
3.	Το πρότυπο LTE	8
3.1.	Διαδικασία Τυποποίησης.....	9
3.1.1.	Η διαδικασία τυποποίησης της 3GPP	10
3.2.	Προδιαγραφές του LTE.....	12
3.2.1.	Δίκτυο Πρόσβασης	12
3.2.2.	Δίκτυο κορμού.....	13
3.3.	Radio Access	15
3.3.1.	OFDMA	15
3.3.2.	SC-FDMA.....	17
3.3.3.	MIMO.....	18
3.4.	Φυσικό επίπεδο και δομή frame	18
3.4.1.	Δομή frame και subframe	19
3.5.	Χαρακτηριστικά ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης φυσικού επιπέδου	21
3.5.1.	Ανερχόμενη ζεύξη (Uplink).....	21
3.5.2.	Κατερχόμενη ζεύξη (Downlink).....	23
3.6.	Radio Resource Management-RRM	24
3.6.1.	Ημι-δυναμική διαχείριση πόρων	26
3.6.2.	Semi persistent scheduling.....	26
3.6.3.	Δυναμική ανάθεση ραδιοπόρων.....	27
3.6.4.	HARQ και RLC αναμεταδόσεις.....	29
3.7.	Discontinues Transmission/Reception -DRX/DTX	30
3.8.	M2M Εφαρμογές.....	33
3.9.	M2M εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης.....	34
3.9.1.	Αρχιτεκτονική του δικτύου.....	35
4.	Απαιτήσεις λειτουργίας M2M υπηρεσιών και βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	37
4.1.	Οι generic απαιτήσεις των M2M εφαρμογών και το πρότυπο 3GPP LTE	37
4.1.1.	Κατανομημένη αρχιτεκτονική προσέγγιση.	37
4.1.2.	Αποφυγή συμφόρησης.....	38
4.1.3.	Μείωση του όγκου των δεδομένων και του φορτίου στο δίκτυο.	39

4.1.4.	Βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση πολυάριθμων MTC συσκευών με μικρές απαιτήσεις bandwidth.....	41
4.1.5.	Βελτιστοποίηση της λειτουργία του δικτύου.....	45
4.1.6.	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ανά συσκευή	46
4.1.7.	Μείωση των παρεμβολών και αποφυγή έντονης ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης.....	47
4.1.8.	Συνύπαρξη με άλλες μη-M2M υπηρεσίες.....	47
4.2.	Απαιτήσεις ειδικού χαρακτήρα για M2M εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης.....	47
4.2.1.	Αριθμός συνδεδεμένων MTC συσκευών	48
4.2.2.	Μέγεθος περιοχής ανάπτυξης της εφαρμογής.....	48
4.2.3.	Συνεχής συνδεσιμότητα	48
4.2.4.	QoS: Προτεραιότητα/Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων/Καθυστέρηση	49
4.2.5.	Κινητικότητα (Mobility).....	49
4.2.6.	Ενεργειακή απόδοση.....	50
4.3.	Χαρακτηριστικά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης M2M εφαρμογών	50
4.3.1.	Εφαρμογές ειδοποιήσεων και ανίχνευσης γεγονότων (περιορισμένης κλίμακας).....	54
4.3.2.	Αυτόματος πιλότος (ευρείας κλίμακας).....	56
5.	Συμπεράσματα και προτάσεις εφαρμογής.....	58
5.1.	Μείωση καταναλισκόμενης ενέργειας σε M2M εφαρμογές μέσω μηχανισμών του 3GPP LTE.....	58
5.2.	Παραμετροποίηση μηχανισμών 3GPP LTE για την υποστήριξη συγκεκριμένων M2M εφαρμογών.....	66
5.2.1.	Αισθητήρας καπνού	66
5.2.2.	Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας.....	67
5.2.3.	Αυτόματος πιλότος.....	68
5.2.4.	Συμπεράσματα και υπολογισμός των παραμέτρων packet loss/channel utilization για χρήση απλού DRX κύκλου	70
5.3.	Έλεγχος συνωστισμού στο κανάλι ελέγχου PDCCH για M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας.....	78
5.3.1.	Μοντέλο μηχανισμού ανάθεσης πόρων στο PDCCH εντός DRX κύκλου και συμπεράσματα.....	79
6.	Ένα προτεινόμενο business model για την αξιοποίηση M2M εφαρμογών από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους.....	83

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

2. Εισαγωγή

Ο αριθμός των δικτυωμένων συσκευών ανά τον κόσμο αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Μάλιστα οι συσκευές αυτές δεν είναι μόνο απλοί προσωπικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, tablets κτλ αλλά μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε συσκευή. Αισθητήρες, μετρητές, οικιακές συσκευές, βιομηχανικά εργαλεία και μηχανήματα, αυτοκίνητα, ιατρικός εξοπλισμός είναι μόνο λίγα από τα παραδείγματα των συσκευών που είτε είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο είτε θα συνδεθούν μέσα στα επόμενα χρόνια. Με αυτόν τον τρόπο οδηγούμαστε γοργά στο λεγόμενο «διαδίκτυο των πραγμάτων» (internet of things), το οποίο εκφράζει την πραγματικότητα του τεράστιου αριθμού των συσκευών που είναι δικτυωμένες και έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις λειτουργίας. Οι απαιτήσεις αυτές διαφέρουν σε αρκετά σημεία από τις απαιτήσεις των ήδη παγιωμένων μορφών επικοινωνίας, όπως είναι η φωνή και τα δεδομένα αρχείων. Γι' αυτόν το λόγο η νέα αυτή μορφή επικοινωνίας με τις νέες απαιτήσεις έχει αποκτήσει και διαφορετικό όνομα: επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (Machine to Machine-M2M) ή επικοινωνία τύπου μηχανής (Machine Type Communication-MTC). Οι αντίστοιχες συσκευές ονομάζονται συσκευές M2M ή MTC. Ταυτόχρονα βέβαια αναπτύσσεται και τίθεται σε εφαρμογή το νέο πρότυπο του 3GPP στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, που ονομάζεται Long Term Evolution (LTE), το οποίο οδηγεί στο πρότυπο Long Term Evolution Advanced (LTE-A) για τα κινητά συστήματα τέταρτης γενιάς 4G. Τα πρότυπο 3GPP LTE/LTE-A ορίζει κάποιους μηχανισμούς (Semi Persistent Scheduling-SPS, Discontinuous Reception/Transmission-DRX, επίπεδη IP αρχιτεκτονική), οι οποίοι φαίνονται κατάλληλοι για να προσφέρουν πρόσβαση στις MTC συσκευές που είτε είναι ήδη, είτε θα συνδεθούν στο δίκτυο τα επόμενα χρόνια. Η επικράτηση μάλιστα του προτύπου 3GPP LTE/LTE-A έναντι του προτύπου IEEE WiMAX εξασφαλίζει ότι η ανάπτυξη των δικτύων LTE θα είναι καθολική για να καλύψει της απαιτήσεις επικοινωνίας φωνής των περισσότερων χωρών. Αυτό σημαίνει πως αν το ίδιο δίκτυο μπορεί να καλύψει και τις απαιτήσεις της M2M επικοινωνίας χωρίς την πρόσθετη ανάπτυξη επιπλέον υποδομών, η εγκατάσταση MTC συσκευών για M2M εφαρμογές και η επέκτασή τους μπορεί να γίνει άμεσα και χωρίς ιδιαίτερο κόστος. Η εργασία αυτή εξετάζει αυτήν τη δυνατότητα. Δηλαδή κατά πόσο και ποιες M2M εφαρμογές μπορούν να εξυπηρετηθούν από τα δίκτυα LTE/LTE-A, θωρώντας κάθε MTC συσκευή σαν ένα απλό τερματικό του δικτύου, χωρίς τη χρησιμοποίηση aggregators ή femtocells. Ελέγχονται τα όρια του 3GPP LTE όσον αφορά το είδος των εφαρμογών που μπορεί να υποστηρίξει και προτείνεται κατάλληλη παραμετροποίηση των μηχανισμών έτσι να είναι δυνατή η βέλτιστη εξυπηρέτηση συγκεκριμένων M2M εφαρμογών. Η δομή της εργασίας έχει ως εξής: στο κεφάλαιο 3 αναπτύσσονται οι βασικές αρχές του 3GPP LTE. Στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι γενικές και ειδικές απαιτήσεις λειτουργίας των M2M εφαρμογών καθώς και οι σχετικοί με αυτές μηχανισμοί του 3GPP LTE/LTE-A. Επίσης παρουσιάζονται τα βασικότερα μοντέλα τηλεπικοινωνιακής κίνησης M2M υπηρεσιών. Τέλος το κεφάλαιο 5 πραγματεύεται την παραμετροποίηση των μηχανισμών SPS και DRX του 3GPP LTE/LTE-A έτσι ώστε να μπορούν να υποστηριχθούν συγκεκριμένες M2M εφαρμογές. Έπειτα μελετάται η αποδοτικότητα μιας απλής εφαρμογής των μηχανισμών αυτών όσον αφορά το packet loss και το channel utilization σε σχέση με το μέσο χρόνο ζωής των πακέτων. Επιπροσθέτως προτείνεται και ένας μηχανισμός που βελτιώνει τις συνθήκες συνωστισμού στο κανάλι ελέγχου του 3GPP LTE/LTE-A όταν εξυπηρετείται μεγάλος αριθμός συσκευών MTC σε μια M2M εφαρμογή.

Στο τελευταίο κεφάλαιο προτείνεται ένα business model κατάλληλο για τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ώστε να επωφεληθούν από τη διάθεση M2M εφαρμογών.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

3. Το πρότυπο LTE

Η εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών από την τρίτη γενιά (3G) στην τέταρτη γενιά (4G) κατευθύνεται από τη δημιουργία και την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών για κινητές συσκευές, όπως επίσης και από την εξέλιξη της τεχνολογίας που είναι διαθέσιμη για τα κινητά συστήματα. Οι κατεύθυνση βέβαια που παίρνει η εξέλιξη αυτή επηρεάζεται άμεσα και από το περιβάλλον στο οποίο τα κινητά συστήματα έχουν αναπτυχθεί και λειτουργούν, σύμφωνα με τους όρους του ανταγωνισμού μεταξύ παρόχων κινητής τηλεφωνίας, τις προκλήσεις από άλλες παρεμφερείς τεχνολογίες, νέες ρυθμίσεις για τη χρήση του φάσματος αλλά και όλες τις πτυχές της αγοράς των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας και επικοινωνιών.

Η ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία 20 χρόνια της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, στα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης και συγκεκριμένα στις κινητές συσκευές είναι αξιοσημείωτη. Ο Νόμος του Moore αναφέρει τη συνεχιζόμενη αύξηση της απόδοσης των επεξεργαστών και του μέγεθος της μνήμης των συσκευών, συχνά σε συνδυασμό με μειωμένο μέγεθος και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Η ταχεία αύξηση της χρήσης του Διαδικτύου για την παροχή κάθε είδους υπηρεσιών από τη δεκαετία του 1990 άρχισε την ίδια στιγμή που τα κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς (2G και 3G) τέθηκαν σε ευρεία χρήση. Το επόμενο βήμα ήταν οι υπηρεσίες διαδικτύου να ενσωματωθούν από τις κινητές συσκευές, δημιουργώντας αυτό που σήμερα γνωρίζουμε ως ευρυζωνική κινητή τεχνολογία. Η δυνατότητα υποστήριξης από κινητές συσκευές υπηρεσιών που βασίζονται στο πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol-IP) και είναι διαθέσιμες σε σταθερές ευρυζωνικές συνδέσεις είναι μια μεγάλη πρόκληση και ένα κίνητρο για την εξέλιξη του LTE. Μερικές από αυτές τις υπηρεσίες ήδη υποστηρίχονταν από τα εξελιγμένα συστήματα 2.5G, αλλά μόνο αν το δίκτυο επανασχεδιαζόταν εξ αρχής με σκοπό την αποκλειστική υποστήριξη του IP και των υπηρεσιών του θα μπορούσαν οι υπηρεσίες αυτές να επικρατήσουν και να αναπτυχθούν απεριόριστα στο πεδίο των κινητών επικοινωνιών. Μια ενδιαφέρουσα πτυχή της ενσωμάτωσης των ευρυζωνικών υπηρεσιών στις κινητές συσκευές είναι η δυνατότητα της κινητικότητας που μπορεί να δημιουργήσει ένα ολόκληρο νέο φάσμα υπηρεσιών προσαρμοσμένων στο κινητό περιβάλλον. Η σταθερή τηλεφωνία και οι προηγούμενες γενιές της κινητής τεχνολογίας δημιουργήθηκαν για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, κυρίως φωνής. Οι πρώτες υπηρεσίες δεδομένων μέσω GSM (Global System for Mobile Communications) ήταν μεταγωγής κυκλώματος, με την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων GPRS (General packet radio service) να έρχεται ως μεταγενέστερη προσθήκη. Αυτό επηρέασε επίσης την αρχική ανάπτυξη του 3G, η οποία βασίστηκε σε δεδομένα μεταγωγής κυκλώματος, με επιπρόσθετες υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων. Η μεταγωγή πακέτου και η υποστήριξη IP υπηρεσιών έγινε πρωταρχικός στόχος μόνο με την ανάπτυξη του 3G HSPA (High Speed Packet Access) και αργότερα του Long Term Evolution/Long Term Evolution Advanced (LTE/LTE-A). Οι παλιότερες υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος παραμένουν, αλλά στο LTE παρέχονται μέσω IP, με το Voice over IP (VoIP) ως παράδειγμα. Η τεχνολογία του πρωτοκόλλου διαδικτύου δεν επηρεάζεται από το μέσο στο οποίο εφαρμόζεται και επομένως μπορεί να αποτελέσει τη βάση ενός νέου πλήθους υπηρεσιών εφαρμόσιμων στο πεδίο των κινητών επικοινωνιών. Οι M2M υπηρεσίες είναι ένα παράδειγμα των δυνατοτήτων που χρήση του IP προσφέρει.

Οι κύριες παράμετροι σχεδίασης ενός radio interface με βάση τις παρεχόμενες υπηρεσίες είναι ο ρυθμός δεδομένων, η καθυστέρηση και η χωρητικότητα. Πολλές υπηρεσίες με χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων, όπως οι υπηρεσίες φωνής, είναι ακόμη σημαντικές και εξακολουθούν να καταλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος της συνολικής χωρητικότητας ενός κινητού δικτύου, αλλά είναι πλέον οι υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων που οδηγούν στο επανασχεδιασμό του radio interface. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων ώστε να είναι δυνατή η πλοήγηση στο διαδίκτυο, η συνεχής ροή δεδομένων και η μεταφορά αρχείων ωθεί τους ρυθμούς μετάδοσης για κινητά συστήματα από μερικά kbps για τις υπηρεσίες 2G, στην κλάση των Mbps στο 3G και τελικά στο επίπεδο των δεκάδων ή και εκατοντάδων Gbps στο 4G. Βέβαια πολλές διαδραστικές υπηρεσίες πραγματικού χρόνου αλλά και η περιήγηση στο διαδίκτυο και η μεταφορά αρχείων απαιτούν εκτός από υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, πολύ χαμηλή καθυστέρηση, καθιστώντας την απαίτηση αυτή πρωταρχικό στόχο του σχεδιασμού. Ως καθυστέρηση ορίζεται ο χρόνος για την μεταφορά ενός πακέτου από τον τελικό χρήστη σε έναν server στο δίκτυο και πίσω. Ωστόσο υπάρχουν πολλές εφαρμογές, όπως το e-mail και η τηλεόραση, όπου οι απαιτήσεις καθυστέρησης δεν είναι τόσο αυστηρές. Από την πλευρά όμως του παρόχου του συστήματος κινητής τηλεφωνίας δεν είναι μόνο τα οι ρυθμοί δεδομένων ανά χρήστη σημαντικοί αλλά και ο συνολικός ρυθμός δεδομένων που δύναται να παρέχεται κατά μέσο όρο από κάθε σταθμό βάσης, ανά Hertz της άδειας χρήσης φάσματος. Το μέτρο αυτό ονομάζεται φασματική απόδοση (spectral efficiency). Σε περίπτωση μείωσης της χωρητικότητας σε ένα κινητό σύστημα, η ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Service-QoS) για τους τελικούς χρήστες μπορεί να υποβαθμιστεί.

Με την αύξηση του φάσματος για χρήση σε κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, δημιουργείται η ανάγκη να λειτουργούν τα κινητά συστήματα σε μια σειρά από διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, σε νέες κατανομές φάσματος διαφορετικών μεγεθών και μερικές φορές στη λειτουργία σε μη συνεχές φάσμα. Εισάγεται δηλαδή ο όρος spectrum flexibility με τη δυνατότητα χρησιμοποίησης μεταβαλλόμενου εύρους ζώνης καναλιού, γεγονός το οποίο ήταν ένας από τους κύριους παράγοντες ανάπτυξης του LTE. Τέλος η ζήτηση για νέες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και η εξέλιξη των διεπαφών του με το δίκτυο πρόσβασης χρησίμευσαν ως αφορμές για να εξελιχθεί και το δίκτυο κορμού (core network). Το δίκτυο κορμού που αναπτύχθηκε για το GSM στη δεκαετία του 1980 επεκτάθηκε για την υποστήριξη των τεχνολογιών GPRS, EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και στη δεκαετία του 1990 αλλά ήταν χτισμένο με βάση τη λογική της μεταγωγής κυκλώματος και δε μπορούσε να ακολουθήσει τις νέες προδιαγραφές. Η νέα αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού ονομάζεται System Architecture Evolution (SAE) και ξεκίνησε ταυτόχρονα με την ανάπτυξη του LTE, έχοντας σαν αποτέλεσμα το Evolved Packet Core (EPC), που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη των HSPA και LTE-LTE-A, με επίκεντρο τη μεταγωγή πακέτου.

3.1. Διαδικασία Τυποποίησης

Το έργο προσδιορισμού του συστήματος LTE (Long Term Evolution) που πληροί τους στόχους που θέτει η ITU-R (International Telecommunication Union – Radio communication Sector) το έχει αναλάβει η 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Η 3GPP εκπονεί προδιαγραφές για τα δίκτυα 2G, 3G, 4G και τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Ο ορισμός ενός προτύπου για τις κινητές επικοινωνίες δεν είναι μια στατική αλλά μια συνεχής διαδικασία. Τα διάφορα φόρουμ τυποποίησης (ETSI, 3GPP, IETF, W3C κ.α.) εξελίσσουν συνεχώς τα πρότυπα που προτείνουν και τους κανόνες που θέτουν προσπαθώντας να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις υπηρεσιών και λειτουργικότητας. Η διαδικασία τυποποίησης είναι διαφορετική ανάμεσα στα διάφορα φόρουμ, αλλά συνήθως αρχίζει με τη φάση των απαιτήσεων όπου αποφασίζεται τι θα πρέπει να επιτευχθεί με το πρότυπο. Αυτή η φάση συνήθως είναι σχετικά σύντομη. Στη φάση της αρχιτεκτονικής μελέτης, ο φορέας τυποποίησης αποφασίζει για την αρχιτεκτονική του συστήματος, δηλαδή για τις αρχές που πρέπει να πληροί το σύστημα ώστε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις. Η φάση της αρχιτεκτονικής μελέτης περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τα σημεία αναφοράς της διεργασίας τυποποίησης αλλά και τις προτεινόμενες διεπαφές του συστήματος. Αυτή η φάση συνήθως είναι αρκετά μεγάλη σε χρονική διάρκεια και μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή κάποιων από τις προδιαγραφές. Το επόμενο στάδιο της διαδικασίας είναι η λεπτομερής καταγραφή των προδιαγραφών. Σε αυτή τη φάση καθορίζονται οι λεπτομέρειες για καθεμία από τις ορισμένες διεπαφές. Κατά τη λεπτομερή περιγραφή των διεπαφών, ο φορέας τυποποίησης μπορεί να επανεξετάσει κάποιες αποφάσεις των προηγούμενων σταδίων. Το τελευταίο στάδιο είναι αυτό των δοκιμών και της επαλήθευσης. Συνήθως δεν αποτελεί επίσημο μέρος της διαδικασίας τυποποίησης των φορέων τυποποίησης, αλλά λαμβάνει χώρα παράλληλα με τα άλλα στάδια, μέσω δοκιμών από τους κατασκευαστές. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών και επαληθεύσεων, σφάλματα του προτύπου μπορούν ακόμα να βρεθούν και τα λάθη αυτά μπορεί να αλλάξουν τις αποφάσεις για το πρότυπο. Για να επιβεβαιωθεί το πρότυπο είναι απαραίτητη η ανάπτυξη προϊόντων. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη των προϊόντων ξεκινά μετά από ή κατά τη διάρκεια της φάσης λεπτομερούς ανάπτυξης των προδιαγραφών. Η φάση δοκιμών και επαληθεύσεων τελειώνει όταν υπάρχουν σταθερές προδιαγραφές δοκιμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιβεβαιωθεί ότι το προϊόν πληροί τις προδιαγραφές του προτύπου. Υπό φυσιολογικές συνθήκες χρειάζεται ένα έως δύο έτη από τη στιγμή που η τυποποίηση έχει ολοκληρωθεί μέχρι την εμπορική αξιοποίηση των σχετικών προϊόντων στην αγορά. Ωστόσο εάν το πρότυπο είναι χτισμένο από το μηδέν, αυτό το διάστημα μπορεί να είναι μεγαλύτερο, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν σταθερά εξαρτήματα για την κατασκευή των σχετικών προϊόντων.

3.1.1. Η διαδικασία τυποποίησης της 3GPP

Η 3GPP (Third-Generation Partnership Project) είναι ο φορέας ανάπτυξης των προτύπων LTE/LTE-A, καθώς και συστημάτων 3G UTRA και 2G GSM. Η 3GPP είναι ένα έργο συνεργασίας των οργανισμών τυποποίησης ETSI, ARIB, TTC, TTA, CCSA, και ATIS. Η 3GPP αποτελείται από τέσσερις ομάδες τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups –TSG's). Η ομάδα τεχνικών προδιαγραφών 3GPP TSG RAN (Radio Access Network) έχει αναπτύξει το πρότυπο WCDMA, την εξέλιξη του HSPA, καθώς και τα LTE /LTE-A.

Η 3GPP TSG RAN αποτελείται από πέντε ομάδες εργασίας:

1. RAN WG1, που ασχολείται με τις προδιαγραφές φυσικού επιπέδου.
2. RAN WG2, που ασχολείται με τις προδιαγραφές των επιπέδων 2 και 3.
3. RAN WG3, που ασχολείται με τις σταθερές διεπαφές στο δίκτυο πρόσβασης.

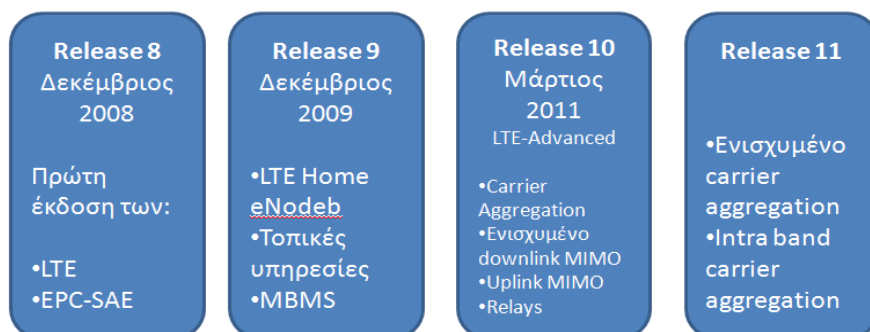
4. RAN WG4, που ασχολείται με τις απαιτήσεις και τη απόδοση των ραδιοσυχνοτήτων (RF) και των μηχανισμών διαχείρισης πόρων του δικτύου.

5. RAN WG 5, που ασχολείται με τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις των τερματικών.

Ο στόχος του φορέα 3GPP, όταν ιδρύθηκε το 1998, ήταν η παραγωγή παγκόσμιων προδιαγραφών για τα 3G συστήματα κινητών επικοινωνιών, τα οποία θα βασίζονταν σε ένα εξελιγμένου δικτύου κορμού του GSM, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων πρόσβασης UTRA FDD που βασίζονταν στο WCDMA και των συστημάτων UTRA TDD που βασίζονταν στο TD-CDMA. Το έργο της συντήρησης και ανάπτυξης των προδιαγραφών των δικτύων GSM/EDGE ανατέθηκε στον φορέα 3GPP σε μεταγενέστερο στάδιο, ενώ πλέον το έργο του φορέα περιλαμβάνει επίσης την τεχνολογία LTE (E-UTRA). Οι προδιαγραφές των συστημάτων UTRA, E-UTRA και GSM/EDGE αναπτύσσονται, συντηρούνται και εγκρίνονται από τον φορέα 3GPP.

Μετά την έγκριση οι συνεργάτες του έργου μεταφέρουν τις προδιαγραφές σε παραδοτέα πρότυπα για κάθε περιοχή του κόσμου. Το έργο της 3GPP πραγματοποιείται με βάση τις σχετικές συστάσεις της ITU και το αποτέλεσμα του έργου υποβάλλεται στην ITU. Οι συνεργάτες του φορέα υποχρεούνται να προσδιορίσουν τις τοπικές απαιτήσεις, όπως οι υποστηριζόμενες συχνότητες λειτουργίας και οι κανόνες προστασίας, που μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικές τοπικές εκφάνσεις του προτύπου. Βέβαια πολλές τοπικές απαιτήσεις στην ουσία θα είναι παγκόσμιες απαιτήσεις για όλους τους τερματικούς σταθμούς, δεδομένου ότι ένα τερματικό που υποστηρίζει την περιαγωγή πρέπει να πληροί τις αυστηρότερες τοπικές απαιτήσεις. Γι' αυτό το λόγο οι τοπικές εκφάνσεις του προτύπου είναι πιο συχνές για τους σταθμούς βάσης από ό, τι για τους τερματικούς σταθμούς.

Τα παραδοτέα έγγραφα του 3GPP διαιρούνται σε εκδόσεις (releases), όπου κάθε έκδοση έχει ένα σύνολο πρόσθετων χαρακτηριστικών σε σχέση με την προηγούμενη έκδοση. Τα χαρακτηριστικά αυτά ορίζονται σαν αντικείμενα εργασίας (work items) που συμφωνήθηκε να αναληφθούν από τις ομάδες εργασίας. Οι εκδόσεις από την όγδοη και έπειτα, με ορισμένα κύρια χαρακτηριστικά του LTE, παρουσιάζονται στο σχήμα. Η έκδοση 10 του LTE είναι εγκεκριμένη από την ITU-R ως προηγμένη τεχνολογία IMT (International Mobile Telecommunications) και ως εκ τούτου ονομάζονται LTE-Advanced (LTE-A).



Εικόνα 1: Εκδόσεις 3GPP LTE

3.2. Προδιαγραφές του LTE

Πολλές προδιαγραφές για την αρχιτεκτονική και τις τεχνολογίες του LTE έχουν μελετηθεί ώστε το πρότυπο να είναι συμβατό με πλήθος διαφορετικών σεναρίων χρήσης [1]:

- Αυτόνομα σενάρια ανάπτυξης του συστήματος όπου οι πάροχοι αναπτύσσουν το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN σε περιοχές χωρίς υπάρχον δίκτυο ή ειδικές περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση δεν απαιτεί δικτύωση με τα υπάρχοντα συστήματα UTRAN/GSM EDGE Radio Access Network (GERAN).
- Σενάρια που προϋποθέτουν τη συνδεσιμότητα με τα υπάρχοντα UTRAN ή/και GERAN δίκτυα, όπου οι πάροχοι έχουν ήδη εγκατεστημένα UTRAN ή/και GERAN δίκτυα.

Στο πλαίσιο αυτό πρέπει κατ'αρχάς να τονιστεί ότι το LTE και το LTE-Advanced (LTE-A) είναι η ίδια τεχνολογία, με την ετικέτα "Advanced" να προστίθεται κυρίως για να τονίσει τη σχέση ανάμεσα στην έκδοση 10 του LTE (LTE-Advanced) και στις προδιαγραφές ITU/IMT-Advanced. Έτσι το LTE-A δεν διαχωρίζεται ως ένα διαφορετικό σύστημα από το LTE και δεν είναι σε καμία περίπτωση το τελικό βήμα της εξέλιξης του LTE. Μια άλλη σημαντική πτυχή είναι ότι οι εργασίες για την ανάπτυξη του LTE και του LTE-A πραγματοποιούνται παράλληλα άλλα και ως συνεχιζόμενη εργασία εντός 3GPP, ακολουθώντας τις τεχνολογίες 3G.

3.2.1. Δίκτυο Πρόσβασης

Οι στόχοι του Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) περιλαμβάνουν την απρόσκοπτη εφαρμογή νέων τεχνολογιών στα δύο σενάρια που περιγράφηκαν παραπάνω, ώστε να υποστηρίζονται υψηλές ταχύτητες και κινητικότητα των χρηστών με μικρή καθυστέρηση και χαμηλή απώλεια δεδομένων, διαφορετικά μεγέθη κελιών και διαφορετικά περιβάλλοντα ραδιοεπικοινωνιών, υποστήριξη και συνεργασία με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα και υψηλή αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα.

Οι διαδικασίες τυποποίησης του LTE έχουν καθορίσει τις προδιαγραφές τόσο για air interface όσο και για την αρχιτεκτονική του δικτύου. Οι πρώτες αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Εύρος ζώνης		1,25 έως 20 MHz
Duplexing		FDD, TDD, half duplex FDD
Υποστηριζόμενη ταχύτητα		Έως 350 km/h
Πολλαπλή πρόσβαση	Downlink	OFDMA
	Uplink	SC-FDMA
MIMO	Downlink	2x2, 4x2, 4x4
	Uplink	1x2, 1x4
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα	Downlink	172 Mbps για 2X2 MIMO και

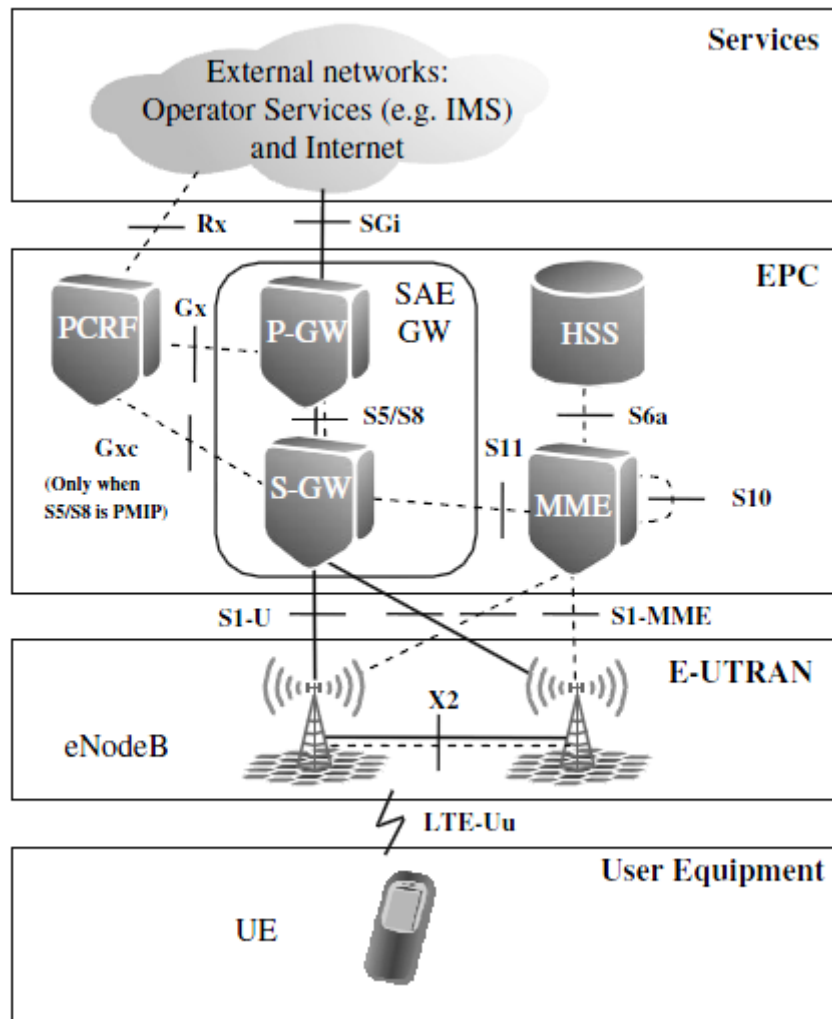
20 MHz	326 Mbps για 4X4 MIMO
	Uplink 86 Mbps για 1X2 MIMO
Διαμόρφωση	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Κωδικοποίηση	Turbo code
Άλλες τεχνικές	Channel depended scheduling, ICIC και υβριδικό ARQ, έλεγχος ισχύος, link adaptation

Πίνακας 1: Προδιαγραφές IEEE LTE

Οι διαμορφώσεις Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) και Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), που αναλύονται παρακάτω, επιτρέπουν ευελιξία του εύρους ζώνης, καθώς και κοινή χρήση της πολυπλεξίας στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου (Frequency Division Multiplexing-FDD, Time Division Multiplexing-TDD). Η υπηρεσίες που προσφέρει το πρότυπο είναι βελτιστοποιημένες για χαμηλές ταχύτητες, μέχρι 15km/h, ωστόσο υποστηρίζονται ταχύτητες έως και 350 km/h με κάποια υποβάθμιση της απόδοσης. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι 326 Mbps, χρησιμοποιώντας 4x4 Multiple Input Multiple Output (MIMO) διαμόρφωση στις κεραίες και ολόκληρο το εύρος ζώνης συστήματος 20MHz. Με βάση τα παραπάνω η φασματική απόδοση ενός κελιού είναι τέσσερις φορές υψηλότερη σε σύγκριση με την έκδοση 6 του HSPA. Η καθυστέρηση μετάδοσης έχει επίσης βελτιωθεί σε τιμές μικρότερες των 10 ms [1]. Το πρότυπο LTE ικανοποιεί τις απαιτήσεις της σύμβασης International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) και ως εκ τούτου είναι μέρος της οικογένειας των προτύπων IMT-2000.

3.2.2. Δίκτυο κορμού

Μαζί με το δίκτυο πρόσβασης το 3GPP τυποποιεί και μια νέα αρχιτεκτονική για το δίκτυο κορμού. Ο στόχος είναι η οικοδόμησης μιας επίπεδης αρχιτεκτονικής δικτύου που να βασίζεται στο πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol-IP) και να έχει σαφώς λιγότερη πολυπλοκότητα από την ήδη υπάρχουσα αρχιτεκτονική. Αυτή η νέα αρχιτεκτονική αναφέρεται ως System Architecture Evolution (SAE) και σηματοδοτεί τη βελτίωση των υφιστάμενων GSM Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) δικτύων κορμού, με σκοπό την υποστήριξη της αγοράς των IP υπηρεσιών με πιο αποδοτικό τρόπο από άποψη κόστους ανάπτυξης του δικτύου και βελτιστοποίησης του. Η εξελιγμένη αρχιτεκτονική ορίζεται με ένα πλήθος τεχνικών κειμένων του 3GPP και περιγράφεται λεπτομερώς από τους [2], που παρουσιάζουν τη γενική μορφή της στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού [2]

Η αρχιτεκτονική του SAE καθορίζει μόνο δύο τύπους κόμβων, το νέο σταθμό βάσης E-UTRAN Node B (eNodeB) και την πύλη διαφυγής (SAE Gateway): η σύνδεση μεταξύ eNodeB και του δικτύου κορμού γίνεται με την διεπαφή S1. Επίσης στην αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού, η 3GPP είχε σαν στόχο την οικοδόμηση ενός δικτύου συμβατού με τα υπάρχοντα δίκτυα, με αποτέλεσμα τη σύνδεση των GSM, WCDMA, HSPA, CDMA2000 με το SAE μέσω συγκεκριμένων και τυποποιημένων διεπαφών. Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτής της προσπάθειας είναι η δυνατότητα διπλής και απλής μεταγωγής, επιτρέποντας όχι μόνο τη συνύπαρξη με τα υπάρχοντα συστήματα αλλά και με την εύκολη μετάβαση από αυτά στα νέα. Άλλοι στόχοι που έπρεπε να εκπληρώνει το εξελιγμένο δίκτυο κορμού είναι οι εξής:

- Μεγαλύτερη αποδοτικότητα της σηματοδοσίας ελέγχου, που επιτυγχάνεται με τη δημιουργία μιας νέα οντότητας, της Mobility Management Entity (MME) η οποία αναλαμβάνει τη σηματοδοσία ελέγχου καλύπτοντας θέματα πιστοποίησης και ασφάλειας, διαχείρισης κινητικότητας και διαχείρισης των προφίλ των συνδρομητών.
- Σηματοδοσία και χρέωση που να βασίζεται στο IP, με την εγκατάλειψη του συστημάτων σηματοδότησης 7 (SS7) των GSM/WCDMA υπέρ του Diameter.

- Διάφορες απλοποιημένες κατηγορίες QoS (Quality of Service), που να είναι δυνατόν να τις εκμεταλλευτούν οι πάροχοι, για την προσφορά διαφόρων υπηρεσιών με διαφορετικό εξασφαλισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (Guarantee Bit Rate-GBR).

Η οντότητα Service Gateway (S-GW) συνδέει κάθε χρήστη του IEEE LTE RAN με το δίκτυο κορμού EPC. Διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες κινητικότητας των χρηστών μεταξύ κελιών αλλά μεταξύ νέων και παλαιότερων τεχνολογιών. Επίσης συλλέγει και διαχειρίζεται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τις χρεώσεις των χρηστών.

Η οντότητα Packet Data Network Gateway (P-GW) εκτελεί στην ουσία χρέη router από το δίκτυο κορμού του IEEE LTE, που ορίζεται και ως Evolved Packet System (EPS), προς το Internet, ή οποιοδήποτε άλλο IP δίκτυο. Συνήθως υλοποιείται μαζί με το S-GW και τοποθετείται κεντρικά στους χώρους του παρόχου. Το P-GW διανέμει IP διευθύνσεις στα τερματικά που συνδέονται στο δίκτυο, ενώ επιβάλλει και συγκεκριμένα QoS χαρακτηριστικά στους IP φορείς, ανάλογα με κανόνες που ελέγχονται από την οντότητα PCRF (βλέπε παρακάτω).

Επιπροσθέτων στο EPC συμπεριλαμβάνονται και οντότητες όπως η Policy and Charging Rules Function, υπεύθυνη για τη διαχείριση του QoS των φορέων δεδομένων και των αντίστοιχων χρεώσεων. Αλλά και η οντότητα Home Subscriber Service (HSS) που είναι ουσιαστικά η βάση δεδομένων με τα στοιχεία όλων των χρηστών.

3.3. Radio Access

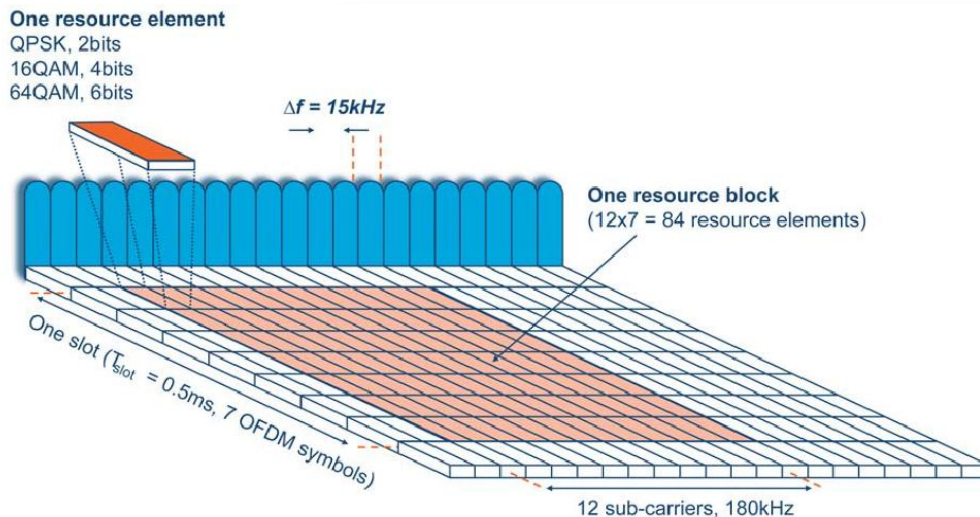
Η τεχνολογία radio access που χρησιμοποιείται στο σύστημα 3G, γνωστό ως WCDMA, κάνει χρήση του scrambling για να περιορίσει τη δια-συμβολική παρεμβολή (ISI) μεταξύ των χρηστών. Ωστόσο, η τεχνική αυτή όταν χρησιμοποιείται για εύρος ζώνης 5MHz ήδη υποφέρει από φαινόμενα παρεμβολών λόγω πολλαπλών διαδρομών του σήματος, τα οποία θα επιδεινωθούν εάν το εύρος ζώνης αυξηθεί μέχρι 10MHz ή 20MHz. Με βάση αυτή τη διαπίστωση κατέστη σαφές ότι το LTE πρέπει να χρησιμοποιήσει μια διαφορετική τεχνολογία ραδιοπρόσβασης, ώστε να μπορέσει να εκπληρώσει τις απαιτήσεις που τέθηκαν και να εκμεταλλευτεί τα υψηλότερα εύρη ζώνης συστήματος.

3.3.1. OFDMA

Η μετάδοση δεδομένων μέσω ενός φέροντος (Single Carrier-SC) πραγματοποιείται διαμορφώνοντας το σήμα εισόδου σε κατάλληλη κυματομορφή (συνήθως ημιτονοειδής), μεταβάλλοντας την στιγμιαία τιμή του πλάτους, της συχνότητας ή τη φάση της. Η φέρουσα συχνότητα είναι συνήθως πολύ υψηλότερη από αυτή του σήματος πληροφορίας. Χρησιμοποιώντας διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation) ο πομπός ρυθμίζει τη φάση και το πλάτος των δύο κυματομορφών, τα οποία βρίσκονται σε διαφορά φάσης 90 μοιρών (είναι δηλαδή ορθογώνιες) σύμφωνα με ένα καθορισμένο σύμβολο από τον αστερισμό του QAM, που φέρνει έναν ορισμένο αριθμό bits. Η τιμή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων καθορίζει το απαιτούμενο εύρος ζώνης στο RF φάσμα. Subcarriers ονομάζονται τα ήδη διαμορφωμένα φέροντα που αποτελούν το σήμα εισόδου μιας νέας διαδικασίας διαμόρφωσης..

Η πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας (FDMA) επιτρέπει τη μετάδοση σημάτων διαφορετικών χρηστών πάνω από διαφορετικά subcarriers. Κάθε χρήστης καταλαμβάνει ένα μικρό μέρος του διαθέσιμου φάσματος με διαφορετική κεντρική συχνότητα από τους άλλους χρήστες που μεταδίδουν τα δεδομένα του εντός του κοινού εύρους ζώνης. Βέβαια τα φάσματα των χρηστών δεν πρέπει να επικαλύπτονται. Μια αποτελεσματική λύση ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών subcarriers και ταυτόχρονα να επιτρέπεται μια μικρή επικάλυψη μεταξύ τους, αποτελεί η ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας (OFDMA). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην επιλογή γειτονικών subcarriers των οποίων οι κεντρικές συχνότητες απέχουν κατά τρόπο ώστε κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας όλες οι υπόλοιπες τιμές των subcarriers να είναι μηδενικές εκτός από την επιλεγμένη. Τα κατάλληλα subcarriers που σχηματίζουν το τελικό σήμα χαρακτηρίζονται ως ορθογώνια και το προκύπτον σήμα είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε πολλαπλές απώλειες πολλαπλών διαδρομών. Η αρχή της ορθογωνικότητας των subcarriers είναι γνωστή από το 1950, αλλά μόνο ο σύγχρονος ψηφιακός εξοπλισμός μπορεί να κρατήσει την ορθογωνικότητα μεταξύ των επιμέρους subcarriers, χωρίς να επηρεάζεται από μεταβολές της θερμοκρασίας και άλλους παράγοντες. Σήμερα η πολλαπλή πρόσβαση OFDMA χρησιμοποιείται με επιτυχία σε πολλούς τομείς των ψηφιακών μεταδόσεων, όπως η επίγεια ψηφιακή μετάδοση (Digital Video Broadcasting-Terrestrial/DVB-T), 802.11n κ.α. αλλά είναι σχετικά νέα στα κυψελωτά συστήματα.

Το πρότυπο LTE επέλεξε την τεχνική OFDMA λόγω των πλεονεκτημάτων της, που περιλαμβάνουν την υψηλή αποδοτικότητα με χαμηλό κόστος πολυπλοκότητας συσκευής, αποδοτικής χρήσης του ραδιοφάσματος και συμβατότητας με τις παλαιότερες τεχνολογίες της κεραίας και του δέκτη. Η εφαρμογή της πρόσβασης OFDMA στο E-UTRAN βασίζεται στον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transformation-DFT) και στην ανάστροφη λειτουργία του (Inverse DFT-IDFT) που μπορούν να αλλάξουν την παράσταση του σήματος μεταξύ του χρόνου και συχνότητας. Η υλοποίηση στο LTE πραγματοποιείται με τη χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) που έχει ήδη ερευνηθεί σε βάθος και έχει βελτιστοποιηθεί, αρκεί τα μήκη του FFT να είναι δυνάμεις του δύο (512, 1096). Επιπλέον οι προδιαγραφές του LTE καθορίζουν την απόσταση μεταξύ subcarriers στα 15kHz ώστε τα σύστημα να αντισταθμίζει τη μετατόπιση Doppler που οφείλεται είτε στην ταχύτητα του τερματικού, είτε στις ατέλειες των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, είτε στη διασπορά λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η μετάδοση με τη χρήση OFDMA έχει το αρνητικό της ύπαρξης inter-cell interference όταν ο χρήστης βρίσκεται στην άκρη της κυψέλης. Τα CDMA συστήματα είναι λιγότερο επιρρεπή σε αυτό το φαινόμενο, γιατί διαφορετικοί κώδικες περίπλεξης χρησιμοποιούνται σε γειτονικά κελιά. Ένας αποτελεσματικός σχεδιασμός επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων μεταξύ γειτονικών κυψέλων μπορεί να περιορίσει το πρόβλημα. Βέβαια ο μηχανισμός Intercell Interference Coordination-ICIC που προβλέπει το LTE μπορεί να οδηγήσει σε απάλειψη του φαινομένου με ταυτόχρονο συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ίσο με 1.



Εικόνα 3: Βασικοί πόροι μετάδοσης [3]

Οι μεταδόσεις OFDMA αποτελούνται από παράλληλα OFDM σύμβολα στο πεδίο του χρόνου, ενώ μια σειρά από ημιτονοειδή κύματα, τα οποία ονομάζονται subcarriers, καταλαμβάνουν το εύρος ζώνης με βήματα των 15kHz στο πεδίο της συχνότητας. Η μετάδοση αυτή μπορεί να απεικονιστεί σαν ένα πλέγμα συχνοτήτων/χρόνου, στο οποίο το πρότυπο LTE καθορίζει το λεγόμενο resource block (RB), που αποτελείται από 12 subcarriers των 15kHz που διαρκούν για 1ms και καταλαμβάνουν συνολικά 180 kHz. Εντός 1 ms περιέχονται 12 ή 14 OFDM σύμβολα ανάλογα με τη χρήση ή μη διευρυμένου κυκλικού προθέματος. Η χρήση κυκλικού προθέματος αυξάνει τη αντοχή του σήματος σε φαινόμενα χρονικής διασποράς λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών αλλά και εισάγει επιβάρυνση ισχύος και σηματοδοσίας. Η ελάχιστη μονάδα πόρων μετάδοσης που ορίζεται στο πρότυπο είναι το resource element (RE) που έχει διάρκεια όση ένα OFDM σύμβολο στο χρόνο και εύρος ζώνης όσο ένα subcarrier στο πεδίο της συχνότητας (15 KHz). Έτσι ένα resource block αποτελείται από 168 resource elements εάν χρησιμοποιείται κανονικό κυκλικό πρόθεμα, ενώ αν χρησιμοποιείται το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα αποτελείται από 144 στοιχεία. Κάθε στοιχείο μπορεί να είναι ένα σύμβολο Q-PSK, 16-QAM, 64-QAM. Ο αριθμός των RB που αναθέτονται στους χρήστες, επομένως και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, εξαρτάται το είδος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υποστηρίζει το σύστημα και η σωστή κατανομή τους εντός του πλέγματος επιτυγχάνεται με τη χρήση αλγορίθμων ανάθεσης πόρων χρόνου και συχνότητας.

Μία από τις παρενέργειες της παράλληλης μετάδοσης μεγάλου αριθμού σημάτων είναι η μεγάλη μεταβλητότητα του σήματος στο πεδίο του χρόνου, που έχει σαν αποτέλεσμα μια υπερβολικά μεγάλη τιμή του λόγου μέγιστης προς μέση ισχύς (Peak to Average Ratio-PAR). Τα φαινόμενο αυτό δυσχεραίνει το σχεδιασμό των ενισχυτών και είναι ο βασικός λόγος που στην ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιείται διαφορετική τεχνική.

3.3.2. SC-FDMA

Οι OFDMA μεταδόσεις συνεπάγονται υψηλές τιμές PAR του σήματος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πολύ χαμηλές τιμές απόδοσης των ενισχυτών και σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο η ανερχόμενη ζεύξη στο πρότυπο LTE βασίζεται στη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης Single Carrier FDMA (SC-FDMA). Η μέθοδος

SC-FDMA συνδυάζει τις χαμηλές τιμές PAR που προσφέρουν τεχνικές μετάδοσης απλού φορέα, όπως η CDMA με την ανοχή στις διαλείψεις πολλαπλής διαδρομής και την ευέλικτη κατανομή συχνοτήτων της OFDMA. Στη μέθοδο SC-FDMA τα σύμβολα των δεδομένων μετάδοσης στο πεδίο του χρόνου αρχικά απεικονίζονται στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιώντας την διακριτό Μ/Σ Fourier (DFT). Στη συνέχεια τοποθετούνται στη κατάλληλη θέση εντός του διαθέσιμου εύρους ζώνης και τελικά απεικονίζονται και πάλι στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο Μ/Σ Fourier, αφού εντωμεταξύ έχει τοποθετηθεί το κυκλικό πρόθεμα. Η πρακτική διαφορά μεταξύ OFDMA και SC-FDMA έγκειται στο γεγονός ότι στη μεν πρώτη τα διαμορφωμένα σύμβολα πληροφορίας εκπέμπονται παράλληλα σε πολλαπλά subcarriers, ενώ στην SC-FDMA ένα διαμορφωμένο σύμβολο πληροφορίας μεταδίδεται σε πολλαπλά subcarriers. Στην ουσία δηλαδή κάθε σύμβολο δεδομένων φαίνεται να μεταδίδεται σε ένα φέρον, από όπου προκύπτει και η ονομασία SC-FDMA. Η σειριακή μετάδοση συμβόλων συμβάλλει στη μείωση της τιμής PAR καταλαμβάνοντας όμως το ίδιο εύρος ζώνης με τη μέθοδο OFDMA. Η δημιουργία των SC-FDMA συμβόλων περιλαμβάνει μια ειδική προ-κωδικοποίηση των συμβόλων δεδομένων η οποία καθιστά την τεχνική αυτή ανθεκτική στις διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών, όπως η OFDMA [4].

3.3.3. MIMO

Κέρδος διαφορισμού εκπομπής επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και λήψης. Ο διαφορισμός εκπομπής μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος, ιδίως όταν οι αναφορές κατάστασης του καναλιού είναι αναξιόπιστες, π.χ. όταν η ταχύτητα του κινητού είναι υψηλή, και δεν αποδίδουν οι τεχνικές προσαρμογής καναλιού. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χωρική πολυπλεξία μεταξύ πομπού και δέκτη, όπου δημιουργούνται πολλά παράλληλα κανάλια, επιτυγχάνοντας αύξηση της χωρητικότητας και του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Το αντίστοιχο κέρδος ονομάζεται κέρδος χωρικής πολυπλεξίας. Το πρότυπο LTE υποστηρίζει τρία είδη συστημάτων Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input-Multiple Output - MIMO): διαφορισμό εκπομπής με συστήματα Πολλαπλών εισόδων Απλής εξόδου (Multiple Input Single Output-MISO), διαφορισμό λήψης με συστήματα Απλής Εισόδου Πολλαπλών Εξόδων (Single Input Multiple Output-SIMO) και χωρική πολυπλεξία με συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input Multiple Output-MIMO).

3.4. Φυσικό επίπεδο και δομή frame

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου LTE είναι η υποστήριξη ευέλικτου εύρους ζώνης, μέχρι τη μέγιστη τιμή των 20MHz. Με βάση αυτήν την απαίτηση η αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υποστηρίζει βήματα εύρους ζώνης των 180kHz ξεκινώντας από το ελάχιστο εύρος ζώνης συστήματος των 1.25MHz. Επιπλέον για να επιτευχθεί η μικρότερη δυνατή καθυστέρηση ορίζεται ως βασική μονάδα χρόνου, εντός της οποίας μεταδίδεται η ελάχιστη πληροφορία για ένα χρήστη, το 1 ms (Transmission Time Interval-TTI=1 ms). Η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης αφορά την καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων των χρηστών, των επανεκπομπών ARQ και HARQ αλλά και των σημάτων ανάδρασης ποιότητας του καναλιού. Συνεπώς η βασική μονάδα μετάδοσης πληροφορίας στο πρότυπο LTE είναι το resource block που έχει διάρκεια ίση με

ένα TTI, δηλαδή 1 ms, ενώ στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από 12 subcarriers που διαχωρίζονται με βήμα των 15 KHz. Αν χρησιμοποιείται κανονικό κυκλικό πρόθεμα ίσο με 5,1 μs τότε ο αριθμός των OFDM συμβόλων εντός του resource block είναι 14, ενώ αν χρησιμοποιείται το διευρυμένο κυκλικό πρόθεμα, ο αριθμός αυτός είναι 12. Ο βασικός λόγος χρησιμοποίησης του εκτεταμένου κυκλικού προθέματος είναι μεγάλη χρονική διασπορά που μπορεί να παρατηρηθεί σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα όπως αυτό των κελιών μεγάλου μεγέθους. Η χρήση διαστημάτων 15kHz μεταξύ των συμβόλων διασφαλίζει την αξιοπιστία της μετάδοσης σε περίπτωση διασποράς Doppler. Στην περίπτωση της ανερχομένης ζεύξης όπου και χρησιμοποιείται η τεχνική SC-FDMA είναι απαραίτητη η κατανομή των πόρων ενός χρήστη σε γειτονικά subcarriers και resource blocks. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται τα υποστηριζόμενα εύρη ζώνης συστήματος και μετάδοσης με τον αντίστοιχο συνολικό αριθμό resource block για κάθε παραμετροποίηση συστήματος. Παρατηρείται ότι ισχύουν οι ισότητες:

$$BW_{transmission} = BW_{channel} \times 90\%$$

$$BW_{transmission} = N_{RB} \times 180$$

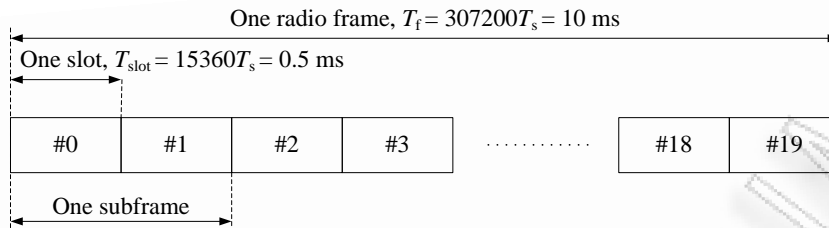
, όπου N_{RB} ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων resource block του συστήματος, $BW_{transmission}$ το εύρος ζώνης μετάδοσης και $BW_{channel}$ το εύρος ζώνης καναλιού του συστήματος.

Εύρος ζώνης καναλιού $BW_{channel}$ (MHz)	Εύρος ζώνης μετάδοσης $BW_{transmission}$ (MHz)	Αριθμό resource block N_{RB}
1,4	1,08	6
3	2,7	15
5	4,5	25
10	9	50
15	13,5	75
20	18	100

Πίνακας 2: Εύρος ζώνης συστήματος

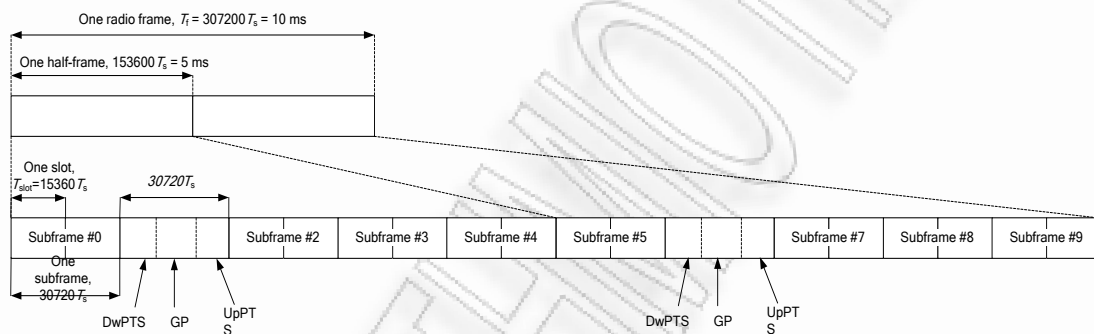
3.4.1. Δομή frame και subframe

Δύο τύποι δομής frame ορίζονται για το E-UTRAN του LTE [5]: δομή frame τύπου 1 που υποστηρίζει τη λειτουργία διαίρεσης στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Division Duplexing-FDD), και το frame τύπου 2 για τη λειτουργία διαίρεσης στο πεδίο του χρόνου (Time Division Duplexing). Για τη δομή frame τύπου 1, ένα frame των 10 ms διαιρείται σε 20 χρονοθυρίδες των 0,5 ms. Κάθε subframe έχει χρονική διάρκεια 1 ms και αποτελείται από δύο χρονοθυρίδες. Έτσι ένα frame στο LTE αποτελείται από 10 subframes. Η δομή αυτή φαίνεται στο σχήμα, όπου ο παράγοντας T_s εκφράζει τη βασική μονάδα του χρόνου που αντιστοιχεί σε 30,72 MHz.



Εικόνα 4: Δομή frame τύπου 1 [5]

Στη δομή frame τύπου 2 το βασικό frame των 10 ms αποτελείται από δύο μισά frames διάρκειας 5 ms καθένα. Κάθε μισό frame χωρίζεται σε πέντε subframe του 1 ms, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όλα τα subframes που δεν είναι ειδικά subframes ορίζονται ως δύο διαδοχικές χρονοθυρίδες διάρκειας 0,5 ms. Τα ειδικά subframes αποτελούνται από τα εξής πεδία: DwPTS (Downlink time slot Pilot), GP (Guard Period) και UpPTS (Uplink time slot Pilot). Οι τιμές των πεδίων αυτών μπορούν να παραμετροποιηθούν αλλά η συνολική διάρκεια τους σε ένα subframe είναι αυστηρά 1 ms.



Εικόνα 5: Δομή frame τύπου 2 [5]

Σε περίπτωση χρήσης TDD υποστηρίζονται 7 διαφορετικές συνθέσεις uplink/downlink μετάδοσης σε ένα frame με περίοδο μετάβασης από τη downlink στην uplink μετάδοση και αντίστροφα τα 5 ή 10 ms. Στην περίπτωση της περιόδου μετάβασης των 5 ms, τα ειδικά subframe ενυπάρχουν και στα δύο μισά frames. Στην περίπτωση της περιοδικότητας μετάβασης των 10 ms, τα ειδικά subframe υπάρχουν μόνο στο πρώτο μισό frame. Τα subframe 0 και 5 και το πεδίο DwPTS του ειδικού subframe προορίζονται πάντα για τη κατερχόμενη ζεύξη μετάδοσης. Το πεδίο UpPTS του ειδικού υπό-πλασίου και το subframe αμέσως μετά το ειδικό subframe προορίζονται πάντοτε για την ανερχόμενη ζεύξη. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις υποστηριζόμενες συνθέσεις uplink/downlink σε ένα frame TDD, όπου το γράμμα D δηλώνει ένα subframe αποκλειστικά για τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης, ενώ το γράμμα U δηλώνει ένα subframe που προορίζεται για τη μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης και το γράμμα S δηλώνει το ειδικό subframe.

Uplink-downlink configuration	Downlink-to-Uplink Switch-point periodicity	Subframe number									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Πίνακας 3: Συνθέσεις Uplink/Downlink σε TDD frame

3.5. Χαρακτηριστικά ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης φυσικού επιπέδου

Προτού αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίον οι πόροι χρόνου-συχνότητας αναθέτονται στους χρήστες με τη διαχείριση ραδιοπόρων, θα πρέπει να περιγραφούν τα κανάλια ελέγχου αλλά και μετάδοσης δεδομένων τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη. Επίσης είναι απαραίτητο να διαχωριστούν τα κανάλια από τα σήματα, τα οποία μεταδίδονται μόνο στα δύο τελευταία επίπεδα (1 και 2), χωρίς να χρειάζεται πληροφορία παραπάνω επιπέδου. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται φανερή και η επιβάρυνση σηματοδοσίας (signaling overhead) που εισάγει το 3GPP LTE για τη μετάδοση δεδομένων.

3.5.1. Ανερχόμενη ζεύξη (Uplink)

Στην ανερχόμενη ζεύξη διακρίνονται τα εξής κανάλια:

Physical Uplink Control Channel (PUCCH): Η σηματοδοσία στο PUCCH περιλαμβάνει επιβεβαιώσεις HARQ για πακέτα που έχουν ληφθεί στο downlink, δείκτες ποιότητας καναλιού (Channel Quality Indicators-CQI), που απαιτούνται ώστε να υπάρξει η βέλτιστη αξιοποίηση των κερδών διαφορισμού χρόνου και συχνότητας, αλλά και αιτήματα προγραμματισμού για μεταδόσεις στο PUSCH (Scheduling Request-SR). Το PUCCH χρησιμοποιείται μόνο όταν ο χρήστης δεν έχει ήδη προγραμματισμένους πόρους για να μεταδώσει δεδομένα στο uplink. Οι ληφθείσες CQI εκθέσεις χρησιμοποιούνται από το σταθμό βάσης για αποφάσεις προγραμματισμού των χρηστών αλλά και για την προσαρμογή του επιλεγμένου καναλιού (link adaptation). Η ανάδραση καναλιού CQI μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να είναι:

- μια ευρυζωνική μέτρηση της ποιότητας του καναλιού
- αναφορά για ένα συγκεκριμένο αριθμό ζωνών συχνοτήτων
- αναφορά του μέσου όρου της ποιότητας των καναλιών από τις καλύτερες 10 ζώνες συχνοτήτων [6]

Οι CQI μεταδόσεις μπορεί να περιοδικά ρυθμισμένες και/ή να έχουν ζητηθεί από το σταθμό βάσης κατά τον προγραμματισμό ενός χρήστη στην ανερχόμενη ζεύξη. Ο μεγαλύτερος φόρτος του καναλιού ελέγχου οφείλεται στις εκθέσεις CQI. Το PUCCH καταλαμβάνει ένα resource block. Επειδή συνήθως το μπλοκ αυτό είναι πολύ μεγάλο για τη μεταδιδόμενη πληροφορία ενός χρήστη, μπορεί να μοιραστεί για χρήση σε πολλούς χρήστες που έχουν πληροφορία προς μετάδοση στο uplink. Στον παρακάτω πίνακα

παρουσιάζονται τα είδη της πληροφορίας που μεταδίδονται στο PUCCH μαζί με το είδος της διαμόρφωσης και τον αριθμό των bit που αποστέλλονται στο κανάλι.

Τύπος PUCCH	Μεταδιδόμενη Πληροφορία	Διαμόρφωση	Αριθμός bit
1	Scheduling Request (SR)	BPSK	-
1a	1 bit ACK/NACK	QPSK	1
1b	2 bit ACK/NACK	QPSK	2
2	CQI	QPSK	20
2a	CQI+1 bit ACK/NACK	QPSK	21
2b	CQI+2 bit ACK/NACK	QPSK	22

Πίνακας 4: PUCCH πληροφορία

Physical Uplink Share Channel (PUSCH): Στο συγκεκριμένο κανάλι μεταδίδεται η πραγματική πληροφορία από τον χρήστη στο σταθμό βάσης αλλά επίσης μπορεί να μεταδοθεί και πληροφορία του PUCCH, όπως εκθέσεις CQI και ανάδραση ACK/NACK για τον μηχανισμό HARQ. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι μια από τις εξής: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, ενώ η κωδικοποίηση είναι ρυθμού 1/3.

Physical Random Access Channel (PRACH): Είναι το κανάλι τυχαίας προσπέλασης των χρηστών που μπορεί να συμβεί όταν μια κινητή συσκευή ζητά πρόσβαση για πρώτη φορά σε ένα κελί, όταν θέλει να ξανασυνδεθεί μετά από μια αποτυχία της σύνδεσης, σε περίπτωση αλλαγής κελιού λόγω κίνησης και σε περίπτωση που δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι πόροι στο PUCCH για αποστολή αιτημάτων προγραμματισμού από τον χρήστη.

Σε αντίθεση με τα κανάλια τα σήματα στην ανερχόμενη ζεύξη αντιπροσωπεύουν σηματοδοσία που προέρχεται από τα επίπεδα 1 και 2 και είναι απαραίτητα για την εκτίμηση του καναλιού και κατ' επέκταση για την καλύτερη αξιοποίηση του.

Sounding Reference Signals (SRS): Μεταδίδονται στο τελευταίο OFDM σύμβολο κάθε n_{th} subframe, όπου το n μπορεί να πάρει μια από τις τιμές $n=2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16$. Αυτό σημαίνει ότι μεταδίδονται κάθε 2 ms έως κάθε 16 ms. Σύμφωνα με τα παραπάνω όλο το εύρος ζώνης του συστήματος για το τελευταίο OFDM σύμβολο κάθε νιοστού subframe θα καταλαμβάνεται από τα σήματα SRS.

Demodulation Reference Signals (DRS): Τα συγκεκριμένα σήματα σχετίζονται πάντα με ένα κανάλι PUSCH και PUCCH, σε αντίθεση με τα SRS, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του καναλιού μόνο στη ζώνη συχνοτήτων που έγινε η μετάδοση στο PUCCH ή PUSCH. Μεταδίδονται στο 4^ο και 8^ο σύμβολο κάθε υπό-πλασίου (στο 3^ο και στο 6^ο αν χρησιμοποιείται εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα) με εύρος ζώνης που μπορεί να κυμαίνεται από 12 subcarriers έως πολύ περισσότερα.

3.5.2. Κατερχόμενη ζεύξη (Downlink)

Τα αντίστοιχα φυσικά κανάλια στο downlink είναι τα εξής:

Physical Downlink Share Channel (PDSCH): Αποτελεί το κοινό κανάλι το οποίο μοιράζονται οι χρήστες σε ένα κελί για λήψη πληροφορίας στο downlink. Μόνο δεδομένα από παραπάνω επίπεδα που αποτελούν πραγματική πληροφορία και όχι πληροφορία ελέγχου μεταδίδονται στο PDSCH. Η διαθέσιμη διαμόρφωση μπορεί να είναι QPSK, 16-QAM, 64-QAM ενώ η κωδικοποίηση έχει τελικά ρυθμό 1/3.

Physical Broadcast Channel (PBC): Στο κανάλι αυτό μεταδίδονται πληροφορίες από τον σταθμό eNodeB που πρέπει να λάβουν όλοι οι χρήστες του κελιού. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK μεταδίδει πληροφορίες κάθε 40 ms.

Physical Downlink Control Channel (PDCCH): Αποτελεί το κύριο κανάλι σηματοδότησης, όπου μεταδίδονται από το σταθμό βάσης σε κάθε ενεργή συσκευή πληροφορίες σχετικές με αποφάσεις προγραμματισμού στο downlink μαζί με τα επιλεγμένα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme-MCS) που απαιτούνται για τη σωστή λήψη, αλλά και με εξουσιοδοτήσεις για μετάδοση στο uplink (uplink grants). Το PDCCH καταλαμβάνει πάντα πόρους εντός των τριών πρώτων OFDM συμβόλων (ή τεσσάρων για μικρό εύρος ζώνης συστήματος) ενός resource block που ανατίθεται σε έναν χρήστη. Το PDCCH, μαζί με τα PCFICH και PHICH, που αναλύονται παρακάτω, αποτελούν τα βασικά κανάλια σηματοδότησης επιπέδου 1 και 2 στο 3GPP LTE και όλα μαζί καταλαμβάνουν πόρους εντός των αρχικών τριών (ή τεσσάρων) συμβόλων κάθε subframe. Ο αριθμός των OFDM συμβόλων που καταλαμβάνονται για τα κανάλια αυτά μπορεί να αλλάζει κάθε 1 ms και μεταδίδεται στους χρήστες μέσω του PCFICH. Το PDCCH χρησιμοποιεί μόνο QPSK διαμόρφωση και κωδικοποίηση με ρυθμό 1/3. Η κατανομή των πόρων του δικτύου στο PDCCH (όπως και για τα PCFICH και PHICH) γίνεται με τη χρήση των στοιχείων ελέγχου καναλιού (Control Channel Element –CCE). Ένα στοιχείο ελέγχου αποτελείται από 36 resource elements, που συνθέτουν 9 ομάδες resource elements (Resource Element Group-REG) των 4 resource elements. Οι πληροφορίες ελέγχου για μια συσκευή μπορούν να ανατεθούν σε 1, 2, 4 ή 8 στοιχεία ελέγχου σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

PDCCH format	Αριθμός CCE's	REG	RE
0	1	9	36
1	2	18	72
2	4	36	144
3	8	72	288

Πίνακας 5: PDCCH και CCE

Το PDCCH format που χρησιμοποιείται (αριθμός CCE ανά χρήστη) εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του μεταδιδόμενου φορτίου αλλά και το ρυθμό κωδικοποίησης. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων ελέγχου εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής ελέγχου σε ένα subframe, το εύρος ζώνης του συστήματος και τους πόρους που χρησιμοποιούνται στο PHICH.

Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH): Ο ρόλος του PCFICH είναι η δυναμική ενημέρωση των χρηστών ενός κελιού για τον αριθμό των OFDM συμβόλων που δεσμεύονται για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου (1 έως 3 OFDM σύμβολα). Παρακολουθώντας το κανάλι αυτό κάθε χρήστης γνωρίζει ποια σύμβολα σε κάθε resource block που του ανατίθεται θα είναι σύμβολα με πληροφορίες ελέγχου. Για να μπορεί ο χρήστης να αποκωδικοποιεί πρώτα αυτή τη πληροφορία, η θέση του PCFICH σε ένα resource block είναι σταθερή, εντός των πρώτων 3 OFDM συμβόλων και μάλιστα χρονικά προγενέστερα των συμβόλων του PDDCH. 2 bit πληροφορίας αποτελούν το κανάλι αυτό και κωδικοποιούνται με ρυθμό 1/16, ενώ στη συνέχεια διαμορφώνονται με QPSK. Το αποτέλεσμα είναι 16 σύμβολα, δηλαδή 16 resource elements σε κάθε μπλοκ.

Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH): Στο κανάλι αυτό μεταδίδεται θετική ή αρνητική ανάδραση (ACK, NACK) από τον σταθμό βάσης eNodeB στη συσκευή μετά από υβριδικές ARQ αναμεταδόσεις. Το κανάλι καταλαμβάνει συγκεκριμένους πόρους εντός των μπλοκ στα οποία μεταδίδεται, αλλά πάντα εντός των τριών πρώτων OFDM συμβόλων. Χρησιμοποιώντας δύο διαμορφωτές BPSK και δύο κωδικοποιητές ρυθμού 1/3 ο καθένας, ο αριθμός των resource elements που τελικά χρησιμοποιεί είναι 12 [7].

Τα σχετικά σήματα επιπέδου 1 και 2, που δεν προκύπτουν από σηματοδοσία ανώτερου επιπέδου στην κατερχόμενη ζεύξη είναι τα εξής:

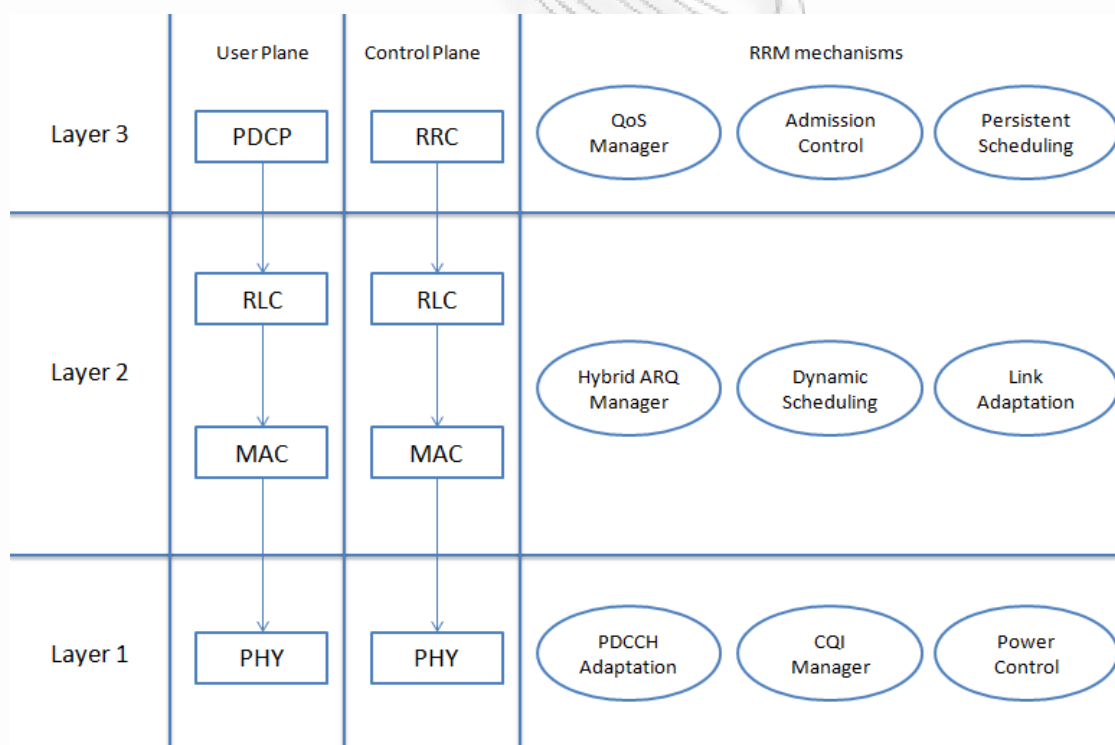
Synchronization Signals: Τα σήματα συγχρονισμού μεταδίδονται από το σταθμό βάσης στον χρήστη με σκοπό την αναγνώριση της ταυτότητας του κελιού και το χρονικό συγχρονισμό των χρηστών. Μεταδίδονται πάντα στο πρώτο και στο πέμπτο subframe ενός frame στα OFDM σύμβολα 6 και 7 (για κανονικό κυκλικό πρόθεμα) γύρω από την κεντρική συχνότητα του συστήματος και καταλαμβάνουν εύρος ζώνης 72 subcarriers για κάθε σύμβολο. Κατά συνέπεια όταν εμφανίζονται σε ένα subframe καταλαμβάνουν 144 RE των resource block γύρω από την κεντρική συχνότητα.

Reference Signals: Η χρήση τους επιτρέπει τη σύγχρονη αποδιαμόρφωση και χρησιμοποιούνται από τους χρήστες για την εκτίμηση του καναλιού και για μετρήσεις ποιότητας του καναλιού. Η πιο γενική κατηγορία των σημάτων αυτών είναι αυτά που σχετίζονται με το κάθε κελί (cell specific) και καταλαμβάνουν συνολικά 8 resource elements σε κάθε μεταδιδόμενο resource block. Υπάρχουν έπειτα και τα σήματα που σχετίζονται με συγκεκριμένους χρήστες (UE specific), τα οποία μεταδίδονται μόνο όταν δεν υπάρχουν cell specific σήματα και υπάρχουν μόνο στα resource block που είναι ήδη προγραμματισμένα για κάποιον χρήστη. Σε αυτά τα μπλοκ καταλαμβάνουν 12 resource elements. Εναλλακτικά με τα UE specific σήματα χρησιμοποιούνται και τα CSI (Channel State Information) reference σήματα, τα οποία χρησιμεύουν για τη μείωση του επιφόρτου σηματοδοσίας. Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθούν 1,2,4 ή 8 CSI RS σε κάθε resource block. Έτσι για παράδειγμα ο επιφόρτος σηματοδοσίας μπορεί να μειωθεί από τα 12 RE στο 1 RE για κάθε ανατιθέμενο μπλοκ.

3.6. Radio Resource Management-RRM

Το radio resource management πραγματοποιείται από ένα σύνολο μηχανισμών ελέγχου που αναλαμβάνονται από τον κόμβο eNodeB. Οι μηχανισμοί αυτοί διασφαλίζουν την αποτελεσματική αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του καναλιού προκειμένου να

εξασφαλιστεί λειτουργικότητα, σταθερότητα και βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων των χρηστών. Κατά το σχεδιασμό ενός κυψελωτού συστήματος ασύρματης επικοινωνίας υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ της πολυπλοκότητας του τερματικού, της πολυπλοκότητας του δικτύου και της αποδοτικότητας του συστήματος. Το πλαίσιο των μηχανισμών διαχείρισης πόρων του προτύπου LTE περιλαμβάνει μια μεγάλη σειρά αλγορίθμων που παρέχουν υπηρεσίες ελέγχου της ισχύος εκπομπής, της κατανομής των πόρων και τη διαχείριση QoS. Όλες αυτές οι υπηρεσίες λειτουργούν από το επίπεδο 1 με έλεγχο της ισχύος και εκτίμηση καναλιού, μέχρι το επίπεδο 3 με λειτουργίες QoS. Αυτοί οι μηχανισμοί είναι απολύτως διασυνδεδεμένοι μεταξύ τους, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται ονομαστικά οι μηχανισμοί αυτοί για κάθε επίπεδο OSI μαζί με τα αντίστοιχα πρωτόκολλα που τους υλοποιούν. Οι μηχανισμοί RRM στο επίπεδο δικτύου, όπως οι QoS manager, admission control και semi-persistent scheduling χαρακτηρίζονται ως ημι-δυναμικοί μηχανισμοί, δεδομένου ότι κατά κύριο λόγο εκτελούνται κατά τη διάρκεια της εκκίνησης νέων bearers και κατά τη διάρκεια σπάνιων μεταβολών των παραμέτρων αυτών. Οι αλγόριθμοι RRM στα φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο δικτύου είναι ιδιαίτερα δυναμικές λειτουργίες με τις νέες αποφάσεις προγραμματισμού των χρηστών να λαμβάνονται σε ΤΠΙ του 1 ms.



Εικόνα 6: Στοιβά πρωτοκόλλων

Η στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη στο σταθμό βάσης αποτελείται από το Packet Data Convergence Protocol (PDCP) στο επίπεδο δικτύου και από τα Radio Link Control (RLC) και Medium Access Control (MAC) στο επίπεδο ζεύξης. Μεταξύ άλλων το RLC περιλαμβάνει έναν εξωτερικό μηχανισμό Automatic Repeat Request (ARQ), ενώ το MAC παρέχει το ασύγχρονο υβριδικό ARQ, που αποτελεί μια νέα τεχνολογία του προτύπου LTE. Δεδομένου ότι τόσο το RLC όσο και το MAC υλοποιούνται στο ίδιο επίπεδο στο σταθμό βάσης, μπορεί

να επιτευχθεί μια επιπλέον βελτιστοποίηση της απόδοσης μέσω της στενής αλληλεπίδρασης μεταξύ του εξωτερικού και υβριδικού ARQ. Το PDCP χειρίζεται κάθε bearer. Αντίθετα η στοίβα πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου τερματίζεται στο σταθμό βάσης με το Radio Resource Control (RRC) στο επίπεδο δικτύου ως το πρωτόκολλο με την κύρια λειτουργικότητα.

3.6.1. Ημι-δυναμική διαχείριση πόρων

Κάθε bearer συνδέεται με ένα συγκεκριμένο QoS προφίλ που αποτελείται από τις ακόλουθες παραμέτρους του downlink που σχετίζονται με [8] :

- Την παράμετρο Allocation Retention Priority-ARP
- Τον εγγυημένο ρυθμό bit (Guaranteed Bit Rate-GBR)
- Τον QoS δείκτη (QoS Class Identifier-QCI)

Η παράμετρος GBR καθορίζεται μόνο για τους φορείς με προκαθορισμένο GBR. Για τους φορείς χωρίς εγγυημένο bit rate ορίζεται ένας αθροιστικός μέγιστος ρυθμός δεδομένων. Η παράμετρος ARP, που είναι ένας ακέραιος αριθμός μεταξύ 1-16, προορίζεται για τον καθορισμό προτεραιοτήτων κατά τη λήψη αποφάσεων ελέγχου εισαγωγής νέων χρηστών και φορέων. Η παράμετρος QCI είναι ένας δείκτης που ορίζει μια πιο εξειδικευμένη σειρά χαρακτηριστικών QoS, όπως παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Συγκεκριμένα ορίζει για κάθε φορέα μια σειρά χαρακτηριστικών όπως η συνολική καθυστέρηση επιπέδου 2 αλλά και ο ρυθμός απώλειας πακέτων. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το σταθμό βάσης eNodeB για τη ρύθμιση του μηχανισμού εξωτερικού ARQ σαν σημείο αναφοράς από το RLC πρωτόκολλο, ενώ η καθυστέρηση πακέτου στο επίπεδο 2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την οντότητα Packet Scheduler στο σταθμό βάσης (π.χ. να δώσει προτεραιότητα σε ορισμένους φορείς, προκειμένου να πληρούν ορισμένες στόχους όσον αφορά την καθυστέρηση πακέτων). Λαμβάνοντας υπόψη το QoS προφίλ, ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής αποφασίζει κατά πόσον νέα αιτήματα για εκκίνηση bearers από του χρήστες στην κυψέλη γίνονται αποδεκτά ή όχι. Ο έλεγχος αποδοχής που πραγματοποιείται μπορεί να λάβει υπόψη την κατάσταση των πόρων χώρου και χρόνου στην κυψέλη, τις απαιτήσεις QoS του νέου φορέα, καθώς και την προτεραιότητα αλλά και το επίπεδο QoS που προβλέπονται από τις ήδη ενεργές συνομιλίες στην κυψέλη. Ένα νέο αίτημα για εξυπηρέτηση γίνεται δεκτό εφόσον εκτιμάται ότι το απαιτούμενο QoS για το νέο bearer μπορεί να ικανοποιηθεί, ενώ συνεχίζεται να παρέχεται αποδεκτό επίπεδο υπηρεσιών στις ήδη ενεργές συνεδρίες στο κελί, οι οποίες έχουν την ίδια ή υψηλότερη προτεραιότητα με τις νέες.

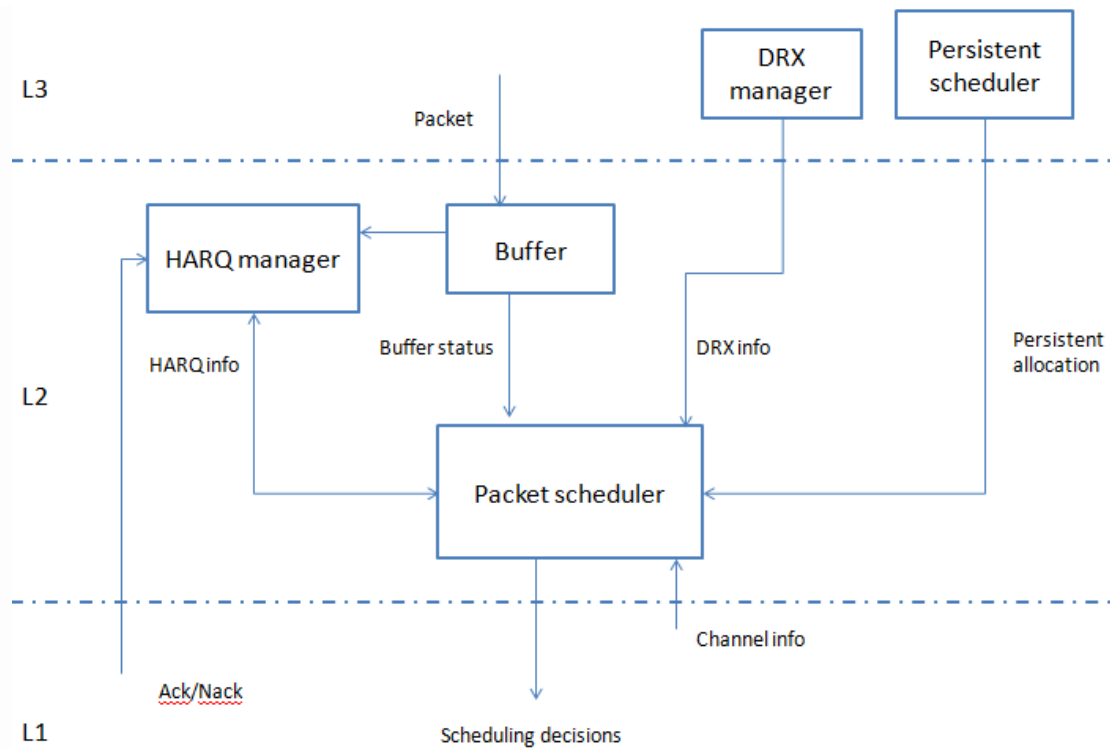
3.6.2. Semi persistent scheduling

Ο μηχανισμός semi-persistent scheduling είναι μια γνωστή μέθοδος από άλλα συστήματα όπως το πρότυπο IEEE 802.16 και το 3GPP HSDPA. Η βασική αρχή που διέπει τη μέθοδο ορίζει τη διάθεση ορισμένων περιοδικών πόρων χρόνου και συχνότητας του δικτύου για μετάδοση δεδομένων ενός συγκεκριμένου χρήστη. Τα χρονικά διαστήματα του περιοδικού προγραμματισμού των χρηστών αρχικά ρυθμίζονται μέσω του πρωτοκόλλου RRC. Ο σταθμός βάσης μπορεί πάντα να υπερκεράσει τον semi-persistent scheduling μηχανισμό αναθέτοντας δυναμικά resource block σε κάθε TTI στους χρήστες μέσω του PDCCH. Δεδομένου ότι η ανάθεση πόρων μέσω αυτού του μηχανισμού είναι περιοδική στον χρόνο

με ένα σταθερό εύρος ζώνης καθώς και με ένα συγκεκριμένο συνδυασμό διαμόρφωσης, κωδικοποίησης, είναι φανερό ότι οι πόροι που καταναλώνονται αντιπροσωπεύουν ένα σταθερό όγκο δεδομένων. Ο μηχανισμός semi-persistent scheduling συνεπώς προορίζεται για ντετερμινιστικές ροές δεδομένων (π.χ. για Voice over Internet Protocol-VoIP υπηρεσίες). Για παράδειγμα ένας χρήστης που μεταδίδει σταθερού μεγέθους πακέτα VoIP κάθε 20 ms θα μπορούσε να προγραμματίζεται διαρκώς ανά 20 ms με εύρος ζώνης (αριθμός RB's) και συνδυασμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που αντιστοιχεί στο αναμενόμενο μέγεθος πακέτου και την ποιότητα του καναλιού. Το κύριο πλεονέκτημα του μηχανισμού semi-persistent scheduling είναι ότι δεν απαιτείται αποκλειστική σηματοδότηση στο PDCCH για κάθε μετάδοση, με αποτέλεσμα τη μείωση του επιφόρτου σηματοδότησης ελέγχου. Ωστόσο όταν η λήψη ενός πακέτου επίμονα προγραμματισμένου αποτύχει, κάθε υβριδική αναμετάδοση ARQ θα πρέπει να προγραμματιστεί δυναμικά.

3.6.3. Δυναμική ανάθεση ραδιοπόρων

Η οντότητα που ελέγχει τη διαχείριση ραδιοπόρων στο επίπεδο ζεύξης ονομάζεται Packet Scheduler (PS), η οποία παίρνει αποφάσεις προγραμματισμό των χρηστών της κυψέλης σε κάθε TTI κατανέμοντας τους resource block(s), καθώς και αναθέτοντας τους ένα συγκεκριμένο τύπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (channel adaptation). Τα διατιθέμενα resource blocks και η επιλεγμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση σηματοδοτούνται στους χρήστες μέσω του PDCCH. Ο γενικός στόχος του προγραμματισμού των πακέτων είναι η μεγιστοποίηση χωρητικότητας των κυψελών, μεριμνώντας ώστε να πληρούνται οι ελάχιστες QoS απαιτήσεις για τα bearers και ταυτόχρονα να υπάρχουν επίσης επαρκείς πόροι για την όσο το δυνατόν καλύτερη εξυπηρέτηση φορέων δεδομένων χωρίς αυστηρές απαιτήσεις QoS. Ο προγραμματισμός της ανάθεσης των πόρων του δικτύου γίνεται ανά χρήστη, ακόμη και αν ένας χρήστης μπορεί να έχει πολλά bearers. Στην πραγματικότητα, κάθε ενεργός χρήστης στο δίκτυο έχει τουλάχιστον δύο φορείς bearers: έναν bearer δεδομένων στο επίπεδο ελέγχου για τον έλεγχο του RRC πρωτόκολλου και ένα ή περισσότερα bearer στο επίπεδο του χρήστη. Δεδομένου του ορισμένου εκ των προτέρων μεγέθους του μπλοκ μεταφοράς στο επίπεδο ζεύξης (transport block) για έναν συγκεκριμένο χρήστη, το MAC πρωτόκολλο αποφασίζει για όγκο των δεδομένων που μεταδίδονται σε κάθε bearer. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα, ο PS αλληλεπιδρά με τον μηχανισμό διαχείρισης υβριδικού ARQ, που είναι υπεύθυνος για τον προγραμματισμό των αναμεταδόσεων έπειτα από απόρριψη πακέτων. Ο PS για την κατερχόμενη ζεύξη έχει την ευελιξία να προγραμματίσει δυναμικά στο χρόνο και στη συχνότητα επανεκπομπές υβριδικού ARQ που εκκρεμούν. Κατά τη διάρκεια ενός TTI, ο PS πρέπει να αποφασίσει μεταξύ της αποστολής ενός νέου πακέτου ή ενός πακέτου που εκκρεμεί εντός του υβριδικού ARQ, αφού ο ταυτόχρονος προγραμματισμός και των δυο δεν επιτρέπεται για τον ίδιο χρήστη. Η προσαρμογή καναλιού παρέχει στον PS πληροφορίες για τους υποστηριζόμενους τύπους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του χρήστη ανάλογα με το επιλεγμένο σύνολο resource block. Ο μηχανισμός link adaptation βασίζεται κατά κύριο λόγο τις αποφάσεις του στις εκθέσεις CQI από τους χρήστες της κυψέλης και στις απαιτήσεις QoS που υπάρχουν κάθε στιγμή. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα, μπορεί να υπάρξει και ένα πρόσθετος μηχανισμός outer loop link adaptation, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο του ποσοστού σφαλμάτων μετάδοσης μπλοκ δεδομένων, με βάση την ύπαρξη ή όχι επανεκπομπών παλαιότερων μεταδόσεων [9].



Εικόνα 7: Packet Scheduler

Ο packet scheduler μπορεί να αναλυθεί στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Ο χρονικός προγραμματιστής επιλέγει τους χρήστες που προγραμματίζονται στο επόμενο TTI, ενώ ο FDPS (Frequency Domain Packet Scheduling) διαθέτει στους επιλεγμένους χρήστες συγκεκριμένα resource block στο πεδίο της συχνότητας. Αυτή η λύση διευκολύνει τον βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ απόδοσης και πολυπλοκότητας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς στο πεδίο της συχνότητας. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο οι QoS απαιτήσεις μπορούν να ελέγχονται από τον χρονικό προγραμματιστή, ενώ ο FDPS αναλαμβάνει την κατανομή των ήδη προγραμματισμένων χρηστών ενός TTI στα καταλληλότερα resource block. Η βασική αρχή του FDPS είναι η εκμετάλλευση των συχνοτικά επιλεγμένων διαλείψεων, με τον προγραμματισμό χρηστών σε resource block όπου η ποιότητα του καναλιού είναι αξιόλογη και δεν παρατηρούνται φαινόμενα διαλείψεων. Για να επιτευχθεί το κέρδος που προσφέρει ο μηχανισμός FDPS θα πρέπει το εύρος ζώνης συμφωνίας του καναλιού να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του συστήματος, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προγραμματισμού των χρηστών σε διαφορετικές ζώνες, και η ταχύτητα των χρηστών να είναι μέτρια (20-30 km/h). Σε αυτές τις ταχύτητες το κανάλι είναι ανιχνεύσιμο μέσω των CQI εκθέσεων που επηρεάζονται από τη συχνότητα λειτουργίας και μεταδίδονται περιοδικά από τους χρήστες. Σε υψηλές ταχύτητες UE ο σταθμός βάσης δεν είναι σε θέση να παρακολουθήσει με ακρίβεια την ποιότητα του καναλιού λόγω των καθυστερήσεων της CQI σηματοδότησης. Για αυτό τον λόγο η καλύτερη σχεδίαση του PS σε υψηλές ταχύτητες κινητών είναι η ομοιόμορφη κατανομή των χρηστών εντός ενός TTI σε όλο το εύρος ζώνης του καναλιού ώστε να επιτευχθεί απλό κέρδος διαφορισμού συχνότητας. Ωστόσο αυτή η πολιτική προγραμματισμού είναι δυνατή μόνο εάν υπάρχουν επαρκή δεδομένα προς μετάδοση από τους χρήστες, ώστε να μπορούν να

καταλάβουν πολλά resource block ο καθένας (4-6). Για τους χρήστες με μικρότερο όγκο δεδομένων, που απαιτούν μετάδοση μόνο σε ελάχιστα resource block, το κέρδος διαφορισμού συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατανεμημένη μετάδοση. Η κατανεμημένη μετάδοση στηρίζεται στην έννοια των εικονικών resource block. Τα δεδομένα ενός εικονικού resource block αντιστοιχίζονται στη συνέχεια σε αρκετά μη συνεχόμενα πραγματικά resource blocks προκειμένου να διανεμούν τη μετάδοση σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης και να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο συχνοτικά κέρδος διαφορισμού. Ως εκ τούτου στην κατανεμημένη μετάδοση ένα πραγματικό resource block μπορεί να περιλαμβάνει πόρους περισσότερων χρηστών [6].

3.6.4. HARQ και RLC αναμεταδόσεις

Οι αναμεταδόσεις δεδομένων που είτε δεν ελήφθησαν από το δέκτη, είτε αποκωδικοποιήθηκαν εσφαλμένα είναι η κύρια λειτουργία του μηχανισμού αίτησης Hybrid Repeat Request (HARQ) στο επίπεδο MAC. Ο μηχανισμός αυτός συμπληρώνεται από το μηχανισμό αναμετάδοσης του πρωτοκόλλου RLC. Οι λόγοι που υπάρχουν δύο μηχανισμοί αναμετάδοσης μπορούν να βρεθούν στο συμβιβασμό μεταξύ της γρήγορης και αξιόπιστης αναμετάδοσης της κατάστασης μιας μετάδοσης. Ο μηχανισμός HARQ στοχεύει στην πολύ γρήγορη αναμετάδοση και κατά συνέπεια η ανάδραση σχετικά με την επιτυχία ή την αποτυχία της προσπάθειας αποκωδικοποίησης μεταδίδεται στον πομπό μετά από κάθε λαμβανόμενο μπλοκ μεταφοράς. Η δυνατότητα να επιτευχθεί μια αυθαίρετα μικρή πιθανότητα λάθους με τη χρήση του HARQ, έρχεται με ένα κόστος στην ισχύ εκπομπής. Η διατήρηση της ισχύος εκπομπής σε λογικά πλαίσια συνήθως οδηγεί σε πιθανότητα σφάλματος ανατροφοδοτήσεων γύρω στο 1%. Μια τέτοια πιθανότητα σφάλματος θεωρείται σε πολλές περιπτώσεις πολύ μεγάλη, ειδικά για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο TCP, το οποίο μπορεί να απαιτήσει ουσιαστικά παράδοση των πακέτων χωρίς λάθη στο επίπεδο TCP.

Ο μηχανισμός HARQ χρησιμοποιεί πρωτόκολλα stop-and-wait (SAW). Μετά από μια μετάδοση, η πομπός σταματά και περιμένει μια θετική ή αρνητική επιβεβαίωση (ACK/NACK) πριν τη μετάδοση είτε ενός νέου πακέτου ή την αναμετάδοση του ίδιου. Ο διαχειριστής HARQ είναι μια οντότητα που υλοποιείται στον σταθμό eNodeB και έχει ως σκοπό το χειρισμό της μετάδοσης, λήψης και αναμετάδοσης των μπλοκ μεταφοράς του MAC επιπέδου και την παραγωγή, την παραλαβή και επεξεργασία της ACK/NACK σηματοδότησης. Κατά τη διάρκεια της λήψης μιας μετάδοσης, ο δέκτης προσπαθεί να αποκωδικοποιήσει το ληφθέν πακέτο που και στέλνει την αντίστοιχη ανάδραση στο κανάλι PUCCH. Σε περίπτωση αρνητικής ανάδρασης (NACK), το πακέτο που αποκωδικοποιείται λάθος αποθηκεύεται στο soft buffer του δέκτη HARQ [10] περιμένοντας για ένα νέο αντίγραφο του πακέτου που θα σταλεί από τον πομπό. Τα δύο αντίγραφα του ίδιου πακέτου συνδυάζονται ώστε να προκύψει ένα ενιαίο πακέτο που αργότερα θα αποκωδικοποιηθεί. Οκτώ ανεξάρτητες και παράλληλες SAW HARQ διαδικασίες μπορεί να είναι ταυτόχρονα ενεργές προκειμένου να είναι δυνατή η συνεχής μετάδοση δεδομένων. Κάθε διαδικασία χειρίζεται έναν ξεχωριστό SAW μηχανισμό και ένα ξεχωριστό buffer. Το πρότυπο 3GPP LTE υποστηρίζει δύο είδη HARQ: ασύγχρονο προσαρμοστικό, για την κατερχόμενη ζεύξη αναμετάδοσης και σύγχρονο προσαρμοστικό ή μη προσαρμοστικό για τις αναμεταδόσεις της ανερχόμενης ζεύξης. Στο σύγχρονο σύστημα η αναμετάδοση μπορεί

να συμβεί μόνο σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές του. Με αυτόν τον τρόπο ο σταθμός eNodeB γνωρίζει ακριβώς πότε και ποια διαδικασία HARQ πρέπει να υποβάλλεται σε επεξεργασία. Κατά συνέπεια η επιπρόσθετη σηματοδότηση για λόγους προγραμματισμού της επόμενης μετάδοσης δεν είναι απαραίτητη αν η αναμετάδοση πραγματοποιείται στο ίδιο resource block. Αντίθετα στο ασύγχρονο σύστημα η αναμετάδοση μπορεί να προγραμματιστεί σε οποιαδήποτε στιγμή σε σχέση με την αρχική μετάδοση και για το λόγο αυτό ένα αναγνωριστικό μήνυμα της HARQ διαδικασίας πρέπει να σταλεί για να συνδεθεί η αναμετάδοση με την αρχική μετάδοση. Προσαρμοστική ή μη προσαρμοστική αναμετάδοση HARQ σημαίνει ότι στην αναμετάδοση το είδος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και η κατανομή των πόρων μπορεί ή αντίστοιχα δεν μπορεί να αλλάξει σε κάθε αναμετάδοση.

Επιπροσθέτως με τον μηχανισμό HARQ λειτουργεί και ο μηχανισμός αναμεταδόσεων του RLC. Αν και τα περισσότερα από τα σφάλματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με την HARQ λειτουργία, υπάρχουν, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οφέλη από την ύπαρξη ενός μηχανισμού δεύτερου επιπέδου αναμετάδοσης ως συμπλήρωμα. Με τον έλεγχο των αριθμών ακολουθίας των PDU που έλαβε ο δέκτης, μπορεί να ανιχνεύσει και τα PDU που λείπουν και να ζητήσει αναμετάδοση αυτών από τον πομπό.

3.7. Discontinues Transmission/Reception -DRX/DTX

Το πρότυπο 3GPP LTE παρέχει ένα σύνολο λειτουργιών που επιτρέπει στα τερματικά να εισέλθουν σε κατάσταση ύπνου, ώστε να είναι σε θέση να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλής ποιότητας υπηρεσίες και συνδεσιμότητα. Η εφαρμογή του μηχανισμού αυτού επιτρέπει στο τερματικό να μην παρακολουθεί το PDCCH κάθε TTI, αλλά μόνο για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων. Η λύση αυτή παρέχει οφέλη τόσο στο downlink όσο και στο uplink επειδή όλες οι πληροφορίες ελέγχου για τον προγραμματισμό μεταδίδονται PDCCH. Κατά τη διάρκεια των μη ενεργών καταστάσεων, τα τερματικά μπορεί να εισέρχονται σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας, γεγονός που μειώνει δραματικά την κατανάλωση ενέργειας στο RF κομμάτι του τερματικού. Το πρότυπο 3GPP LTE με αυτόν τον μηχανισμό παρέχει μια λύση στην επερχόμενη ανάγκη της συνεχούς σύνδεσης, όπου ο χρήστης παραμένει σταθερά συνδεδεμένος στο δίκτυο για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με μια γενικά χαμηλής συχνότητας δραστηριότητα μετάδοσης και λήψης. Έτσι αποφεύγονται πολλές διαδικασίες σύνδεσης και απεμπλοκής που προκαλούν επιβάρυνση στο δίκτυο και καθυστέρηση. Το πρωτόκολλο RRC διαδραματίζει τον πλέον σημαντικό ρόλο στην διαχείριση των DRX/DTX κύκλων, δεδομένου ότι ορίζει το μεγαλύτερο μέρος των αντίστοιχων παραμέτρων για κάθε τερματικό [10]. Αυτές οι παράμετροι παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το τερματικό μπορεί να εκκινήσει την DRX διαδικασία είτε βρίσκεται σε RRC_IDLE κατάσταση, είτε σε RRC_CONNECTED κατάσταση. Στη μεν πρώτη παρακολουθεί απλά το paging κανάλι κάνοντας μετρήσεις για την επιλογή κελιού και η ενεργοποίηση του DRX κύκλου ελέγχεται από ανώτερα επίπεδα. Στην δεύτερη περίπτωση το τερματικό λαμβάνει και μεταδίδει δεδομένα από το δίκτυο παρακολουθώντας το κανάλι ελέγχου και η ενεργοποίηση του DRX κύκλου γίνεται από τα χαμηλότερα επίπεδα. Εξάλλου το πρότυπο ορίζει τη δυνατότητα μεγάλων DRX κύκλων ακόμη και σε αν το τερματικό βρίσκεται στην RRC_CONNECTED

κατάσταση, για παράδειγμα μέχρι και 2,56 sec. Αυτό σημαίνει πως και ανενεργές συσκευές θα βρίσκονται σε κατάσταση σύνδεσης, χρησιμοποιώντας διαδικασίες κινητικότητας (mobility) της συνδεδεμένης κατάστασης (ελεγχόμενες από το δίκτυο-handover). Για να είναι δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας αυτών των συσκευών ορίζονται [11] διαφορετικές απαιτήσεις μετρήσεων του καναλιού, για εφαρμογή των κανόνων κινητικότητας, όταν εφαρμόζονται μεγάλοι DRX κύκλοι (πάνω από 80 ms). Με βάση αυτούς τους κανόνες το τερματικό θα κάνει τις μετρήσεις κοντά στην χρονική στιγμή που ο δέκτης του είναι ενεργός κατά τη διάρκεια του DRX κύκλου. Για να πραγματοποιηθεί αυτό οι χρόνοι των μετρήσεων και ταυτοποίησης του κελιού ορίζονται ανάλογα με τις DRX παραμέτρους. Σε αυτήν την περίπτωση, που εξετάζεται παρακάτω και στην οποία αναφέρεται η εργασία, η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται απλά με την απενεργοποίηση του RF κομματιού της συσκευής κατά τη διάρκεια του κύκλου. Η εξοικονόμηση ενέργειας από τη λειτουργία άλλων κομματιών της συσκευής επαφίεται στους κατασκευαστές.

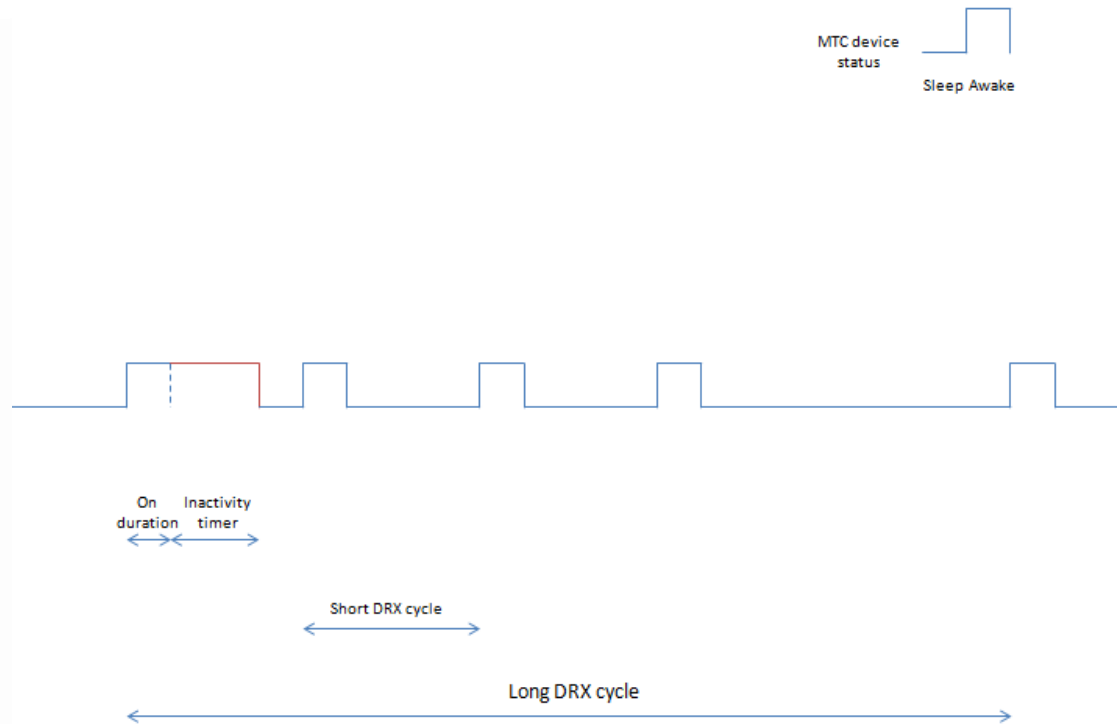
DRX παράμετροι	Περιγραφή
DRX κύκλος	Περιγράφει την περιοδική επανάληψη της ενεργής περιόδου που διαρκεί όσο ο on duration timer ακολουθούμενος από την περίοδο του inactivity timer
On Duration timer	Περιγράφει τον αριθμό των subframe που πρέπει το τερματικό να παραμένει ενεργό παρακολουθώντας το PDCCH, όταν εκκινεί ένας DRX κύκλος
Inactivity timer	Περιγράφει τον αριθμό των PDCCH subframes για τα οποία το τερματικό πρέπει να μείνει ενεργό, αφού έχει αποκωδικοποιήσει το αρχικό PDCCH subframe (είτε σε UL, είτε σε DL). Αποτελεί ένα χρήσιμο τρόπο για να μείνει ενεργό το τερματικό αλλά προκαλεί τη δέσμευση/παρακολούθηση των καναλιών ελέγχου ακόμη και όταν δεν χρειάζεται
DRX περίοδος επανεκπομπής	Περιγράφει τον αριθμό των PDCCH subframes για τα οποία το τερματικό παραμένει ενεργό, περιμένοντας την επόμενη HARQ αναμετάδοση ενός πακέτου μετά την πρώτη αποτυχημένη αναμετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο δεν χρειάζεται το τερματικό να περιμένει ένα πλήρη DRX κύκλο για την επόμενη ασύγχρονη επανεκπομπή στο DL
DRX βραχύς κύκλος	Περιγράφει την περιοδική επανάληψη της ενεργής περιόδου εντός του μακρού DRX κύκλου.

Περίοδος βραχύ κύκλου DRX

Περιγράφει τον αριθμό των subframes που το τερματικό πρέπει να ακολουθεί τον βραχύ DRX κύκλο, αφού έχει λήξει ο inactivity timer.

Πίνακας 6: DRX παράμετροι

Σύμφωνα με τα παραπάνω το τερματικό είναι ενεργό κατά τη διάρκεια του on duration timer και του inactivity timer. Το πρότυπο βέβαια ορίζει επίσης ότι το τερματικό είναι σε ενεργή κατάσταση όταν έχει μεταδώσει ένα αίτημα προγραμματισμού (SR) προς τον σταθμό eNodeB και περιμένει την έγκριση του (uplink grant). Γενικά ο μηχανισμός DRX παρέχει δύο DRX κύκλους που μπορούν να ρυθμιστούν για κάθε τερματικό. Η μακρής DRX κύκλος χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του inactivity timer του τερματικού, όταν το τερματικό ελέγχει το PDCCH και κανένας πόρος δεν του έχει εκχωρηθεί: κατά τη διάρκεια ενός μακρού DRX κύκλου το RF κομμάτι του τερματικού ενεργοποιείται και ελέγχει το PDCCH για ένα συγκεκριμένο αριθμό υπό-πλαισίων που αντιστοιχεί στην περίοδο του inactivity timer. Όταν εντοπίζεται δραστηριότητα είτε στη ανερχόμενη είτε στην κατερχόμενη ζεύξη, ο σταθμός eNodeB ενεργοποιεί το βραχύ DRX κύκλο, αυξάνοντας τη δυνατότητα ανταπόκρισης και τη συνδεσιμότητα του τερματικού. Οι μεταβάσεις από τον μακρύ στο βραχύ DRX κύκλο ελέγχονται από τον κόμβο eNodeB είτε ορίζονται χρονικά εκ των προτέρων. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του DRX σχετίζεται με το ισοζύγιο εξοικονόμησης ενέργειας και καθυστέρησης κατά τη διάρκεια των HARQ αναμεταδόσεων: όταν ένα τερματικό αποτυγχάνει να αποκωδικοποιήσει ένα μπλοκ μεταφοράς μιας από τις ενεργές HARQ διεργασίες παραμένει ενεργό υποθέτοντας ότι η επόμενη αναμετάδοση θα γίνει εντός της περιόδου επανεκπομπής DRX, έτσι ώστε να μη μπορεί να εισέλθει σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας απευθείας και να χρειαστεί να περιμένει τον επόμενο DRX κύκλο για να γίνει η αναμετάδοση. Η βασική δηλαδή λειτουργία του RRC σε σχέση με τον DRX/DTX μηχανισμό είναι η εξεύρεση του βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ της εξοικονόμησης ενέργειας και δυνατότητας ανταπόκρισης του τερματικού. Υπάρχουν πολυάριθμες δυνατότητες παραμετροποίησης των μηχανισμών DRX/DTX ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της κάθε παραμέτρου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως ευελιξία και πολυπλοκότητα της λύσης, τις οντότητες που μπορούν να ελέγξουν τις παραμέτρους DRX/DTX των διαφόρων επιπέδων, γνωρίζοντας ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τα υψηλότερα επίπεδα οδηγούν σε αύξηση των καθυστερήσεων .



Εικόνα 8: Βασική DRX λειτουργία

Οι παράμετροι DRX μπορούν να ρυθμιστούν και να ενημερωθούν για ένα συγκεκριμένο τερματικό μέσω της RRC σηματοδότησης, ενώ μεταφέρονται στα τερματικά μέσω των στοιχείων ελέγχου του MAC μπλοκ μεταφοράς [2]. Υψηλός ρυθμός ενημερώσεων οδηγεί σε αύξηση της σηματοδότησης, αλλά επιτρέπει την ταχύτερη προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της ροής δεδομένων και κατά συνέπεια στην βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας. Προφανώς η εκ των προτέρων γνώση της κίνησης δεδομένων μεταξύ του κόμβου eNodeB και του τερματικού μπορεί να αποτελέσει το κλειδί για την επίτευξη υψηλών επιδόσεων, με παραμέτρους που προσαρμόζονται δυναμικά στα στις στιγμιαίες καταστάσεις του δικτύου. Οι HARQ αναμεταδόσεις δεν πραγματοποιούνται εντός των DRX κύκλων, γιατί εκτελούνται σε τυχαία στιγμές, γεγονός που θα αναγκάσει τους DRX παραμέτρους να ρυθμίζονται για τα χειρότερα δυνατά σενάρια. Επίσης οι εκθέσεις κατάστασης του καναλιού CQI και SRS μπορούν να συσχετιστούν με τις DRX παραμέτρους όταν η περιοδικότητα και η φάση τους είναι ίση με ένα DRX κύκλο. Σε διαφορετική περίπτωση δεν δίδονται αποκλειστικοί πόροι για CQI σηματοδότηση στο τερματικό, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της αποδοτικότητας του δικτύου.

3.8. M2M Εφαρμογές

Η επικοινωνία M2M καλύπτει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις. Έξυπνα συστήματα μεταφορών, επιτήρηση και έλεγχος κάθε είδους, εφαρμογές έξυπνου σπιτιού, εφαρμογές υγείας εξ' αποστάσεως είναι μερικά μόνο παραδείγματα. Στο [12] ομαδοποιούνται τα σενάρια M2M επικοινωνίας στις εξής κατηγορίες:

- Συστήματα έξυπνων μεταφορών που ορίζουν την επικοινωνία των οχημάτων και των υποδομών μεταφορών με απομακρυσμένους servers ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος παραμέτρων όπως ο χρόνος μετακίνησης, η αποφυγή συγκρούσεων, η ασφάλεια, η κατανάλωση καυσίμου.
- Έξυπνα συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης που έχουν εφαρμογές βιομηχανικές, περιβάλλοντος, ενέργειας και άλλων τύπων.
- Υγειονομική περίθαλψη από απόσταση, με την επικοινωνία μεταξύ ασθενούς και του οργανισμού περίθαλψης να είναι M2M.

3.9. M2M εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις εφαρμογές έξυπνων συστημάτων ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης. Ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου/μέτρησης/παρακολούθησης είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μπορεί να ελέγξει/μετρήσει/παρακολουθήσει κάποιο μέγεθος, όπως την κατανάλωση ενέργειας, προσθέτοντας περισσότερες πληροφορίες από συμβατικές συσκευές και μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με τη χρήση μιας μορφής ηλεκτρονικής επικοινωνίας. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των έξυπνων αυτών συσκευών είναι η δυνατότητα να παρέχουν αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του τελικού καταναλωτή/χρήστη και του παρόχου της υπηρεσίας ή διαχειριστή του δικτύου. Ένα έξυπνο σύστημα αυτού του είδους θα πρέπει επίσης να προωθεί την ανάπτυξη υπηρεσιών που δημιουργούν προστιθέμενη αξία, ώστε να είναι εμπορικά ελκυστική για υλοποίηση.

Η βασική διαφοροποίηση εντός της συγκεκριμένης κατηγορίας και η οποία μπορεί να αλλάξει τις απαιτήσεις εφαρμογής αφορά τον διαχωρισμό σε εφαρμογές που καλύπτουν ένα ευρύ γεωγραφικό χώρο με την ανάπτυξη μεγάλου πλήθους συσκευών και αυτές για τις οποίες απαιτείται ανάπτυξη μικρού αριθμού MTC συσκευών σε περιορισμένο γεωγραφικά χώρο. Έτσι διαχωρίζουμε τις:

- Εφαρμογές ευρείας κλίμακας, που είναι συνηθέστερα:
 1. Περιβαλλοντικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν ένα μεγάλη αριθμό αισθητήρων για παρακολούθηση πυρκαγιών, στάθμης υδάτων, περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε σωματίδια και άλλων παρόμοιων εγκαταστάσεων. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και οι γεωργικές εφαρμογές παρακολούθησης και βελτιστοποίησης καλλιεργειών μεγάλης κλίμακας βέβαια οι αισθητήρες απαιτούν απομακρυσμένο έλεγχο και μπορούν να μεταδώσουν και διαφορές μετρήσεις στους διαχειριστές.
 2. Βιομηχανικές εφαρμογές όπως η διαχείριση αποθεμάτων με τη χρήση αισθητήρων για τα αποθηκευμένα είδη αλλά και η παρακολούθηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων που μετέχουν στην παραγωγική διαδικασία ενός εργοστασίου για παράδειγμα. Ο συνεχής έλεγχος και η απομακρυσμένη ρύθμιση και βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων μπορεί να ωφελήσει ιδιαίτερα την απόδοση της παραγωγής.
- Εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας, που μπορεί να είναι:
 1. Εφαρμογές έξυπνου σπιτιού που μπορεί να περιλαμβάνουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας συσκευών του σπιτιού, τον

απομακρυσμένο έλεγχο του φωτισμού, τις μετρήσεις θερμοκρασίας, κατανάλωσης ενέργειας, νερού, την παρακολούθηση των συστημάτων ασφάλειας, κτλ.

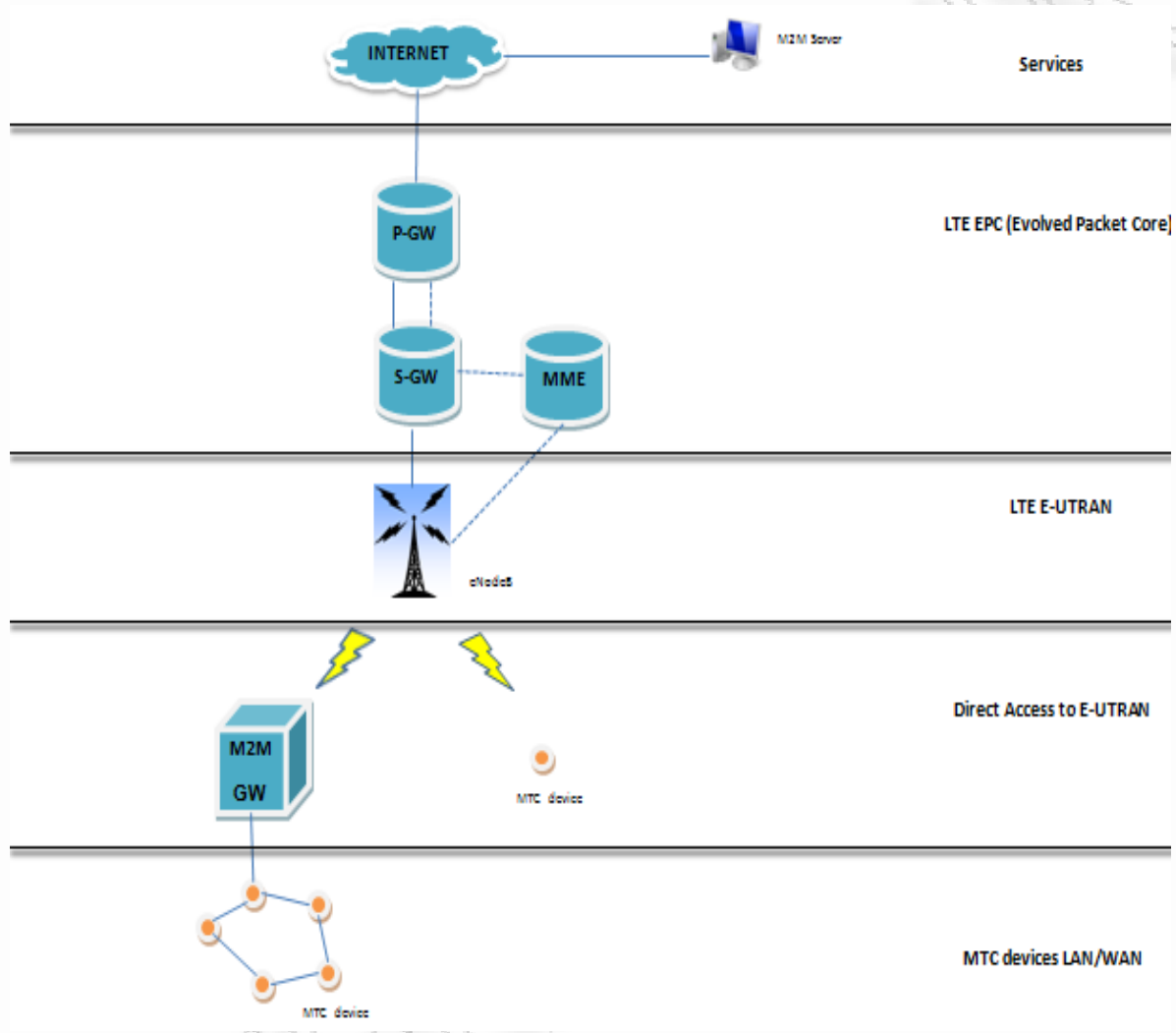
2. Βιομηχανικές εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας όπως η απομακρυσμένος έλεγχος συγκεκριμένων μηχανημάτων ή και ολοκλήρων μονάδων, έλεγχος πρόσβασης για λόγους ασφαλείας, έλεγχος φωτισμού και παρακολούθηση και έλεγχος αυτόματων διαδικασιών.
3. Έξυπνες μετρήσεις ενέργειας που επιτρέπουν στους ενεργειακούς παρόχους και διαχειριστές την απομακρυσμένη διαχείριση των μετρητών αλλά και την παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών, στα πρότυπα των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ανάλογα με το προφίλ κατανάλωσης ενέργειας του πληθυσμού ή και να εστιάσει σε συγκεκριμένες ομάδες του πληθυσμού. Αντίστοιχα οι καταναλωτές μπορούν να ελέγχουν ανά πάσα στιγμή και όπου και αν βρίσκονται τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση του σπιτιού τους αλλά και των συσκευών τους ξεχωριστά. Έξυπνοι μετρητές κατανάλωσης ενέργειας με δυνατότητες δικτύωσης ήδη κυκλοφορούν στην αγορά εδώ και αρκετά χρόνια.
4. Εφαρμογές ασφαλείας όπως η επιτήρηση κτιρίων με τη χρήση βίντεο, η χρήση αισθητήρων ασφαλείας, όπως οι αισθητήρες κίνησης και η παρακολούθηση κλεμμένων αντικειμένων.

3.9.1. Αρχιτεκτονική του δικτύου

Το γενικό μοντέλο αυτών των εφαρμογών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Οι MTC συσκευές επικοινωνούν με το δίκτυο κορμού για την αποστολή ή τη λήψη δεδομένων, είτε απευθείας με τη χρήση του δικτύου πρόσβασης του LTE, είτε ομαδοποιούνται σε cluster που επικοινωνούν με το δίκτυο κορμού μέσω ενός Gateway. Στη συνέχεια το δίκτυο LTE μέσω του στοιχείου EPC (Evolved Packet Core) συνδέεται με το Internet, όπου βρίσκεται ο M2M server που ελέγχει την εκάστοτε M2M εφαρμογή. Το Gateway θα πρέπει να έχει δύο διεπαφές, μία προς το δίκτυο πρόσβασης και κορμού του LTE και μια δεύτερη προς το τοπικό δίκτυο που αποτελούν οι MTC συσκευές της εκάστοτε εφαρμογής, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να ενεργεί και σαν συλλέκτης (aggregator) των δεδομένων των MTC συσκευών.

Στην περίπτωση χρήσης Gateway οι MTC συσκευές θα πρέπει να αποτελούν ένα τοπικό δίκτυο (Local Area Network-LAN) που θα επικοινωνεί με την πύλη για τη μετάδοση/λήψη δεδομένων προς τον M2M server. Το τοπικό αυτό δίκτυο μπορεί να είναι WLAN IEEE 802.11, IEEE 802.15.4, LTE με τη χρήση Femtocell ή οποιοδήποτε άλλο δίκτυο μπορεί να εξασφαλίσει την τοπική συνδεσιμότητα των MTC συσκευών με το Gateway προς το δίκτυο πρόσβασης και κορμού του LTE. Οποιαδήποτε τεχνολογία και να χρησιμοποιηθεί είναι απαραίτητο να υπάρχει end to end (E2E) επικοινωνία μεταξύ οποιασδήποτε MTC συσκευής και του M2M server, παρόλη τη συλλογή και ομαδοποίηση των δεδομένων από το συλλέκτη του τοπικού δικτύου. Επίσης πολλά τοπικά δίκτυα MTC συσκευών κοινής εφαρμογής μπορεί να αποτελέσουν ένα δίκτυο ευρείας περιοχής (Wide Area Network-WAN) για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που απαιτούν την κάλυψη μεγάλων περιοχών.

Στην συνέχεια της εργασίας θα μελετηθούν οι απαιτήσεις λειτουργίας των M2M εφαρμογών έλεγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης όσον την τεχνολογία που καλύπτει το φυσικό και το επίπεδο ζεύξης για το πρότυπο 3GPP LTE.



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική δικτύου M2M

4. Απαιτήσεις λειτουργίας M2M υπηρεσιών και βιβλιογραφική ανασκόπηση

Για να επιτευχθεί η μελέτη και υλοποίηση της επικοινωνίας μηχανή με μηχανή για εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης είναι απαραίτητο να αναλυθούν οι βασικές και ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται στα αντίστοιχα δίκτυα. Η μελέτη των απαιτήσεων διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: τις γενικές απαιτήσεις για την επίτευξη επικοινωνίας μηχανή με μηχανή και τις ειδικότερες που αφορούν συγκεκριμένα περιπτώσεις χρήσης για σενάρια ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης. Για κάθε μια από αυτές περιγράφεται η λειτουργικότητα και οι σχετικοί μηχανισμοί που ορίζονται στο πρότυπο 3GPP LTE. Από την μελέτη των απαιτήσεων θα διαφανεί κατά πόσο το πρότυπο 3GPP LTE με την υπάρχουσα μορφή του (Release 10) μπορεί να προσφέρει τους μηχανισμούς εκείνους που θα κάνουν εφικτή τη δυνατότητα υλοποίησης περιπτώσεων χρήσης ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης αλλά τα σημεία εκείνα όπου χρειάζεται η προσθήκη επιπρόσθετης λειτουργικότητας.

4.1. Οι generic απαιτήσεις των M2M εφαρμογών και το πρότυπο 3GPP LTE

Οι απαιτήσεις γενικού χαρακτήρα αφορούν τα generic χαρακτηριστικά ενός δικτύου, ώστε να είναι σε θέση να υποστηρίξει M2M επικοινωνίες στο σύνολο τους. Η επικοινωνία μηχανής με μηχανή μπορεί καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης, αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, κινητικότητας, δομής δικτύου κτλ. Οι εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης αποτελούν ένα μόνο κομμάτι αυτού που ονομάζεται M2M επικοινωνία. Συνεπώς αρχικά αναπτύσσονται όλες εκείνες οι απαιτήσεις που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη οποιαδήποτε M2M εφαρμογής.

4.1.1. Κατανεμημένη αρχιτεκτονική προσέγγιση.

Αφορά κυρίως την απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών και όχι απαραίτητα διαμέσου ενός κεντρικού server, τη δυνατότητα Peer-to-Peer και ad-hoc επικοινωνίας καθώς επίσης και τη δυνατότητα σχηματισμού δυναμικών ομάδων δικτύου.

Η απευθείας επικοινωνία μεταξύ των MTC συσκευών στο 3GPP LTE δεν υποστηρίζεται ακόμα. Ωστόσο, στα [13], [14] προτείνεται μια νέα προσέγγιση στην Peer-to-Peer επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε κοντινή απόσταση. Το κύριο δίκτυο (πρόσβασης και κορμού) δεν χρειάζεται να συμμετέχει στη μεταφορά δεδομένων αλλά μόνο στη διαδικασία σηματοδότησης της σύνδεσης μεταξύ των MTC συσκευών, τιμολόγησης και πολιτικών ορθής χρήσης των χρηστών. Ο σταθμός βάσης eNodeB θα είναι σε θέση να ελέγχει την μέγιστη ισχύ μετάδοσης σε περιπτώσεις επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (Device to Device-D2D). Επιπλέον, ο σταθμός eNodeB αναθέτει πόρους OFDMA για όλες τις D2D συνδέσεις στο κελί του που μοιράζονται uplink και downlink πόρους του κυψελωτού δικτύου. Ακόμη προτείνεται ένας νέος μηχανισμός ελέγχου της ισχύος για D2D συνδέσεις που μοιράζονται uplink πόρους, ο οποίος περιορίζει τη μέγιστη ισχύ εκπομπής σε περίπτωση D2D επικοινωνίας. Αυτού του είδους η επικοινωνία συσκευής με συσκευή σαν υπόστρωμα στο LTE-A είναι μια ελκυστική λύση για την εκπλήρωση αυτής της απαίτησης.

Στο [15] προτείνεται η MTC συσκευή να έχει δύο μόντεμ. Ένα M2M μόντεμ για τη δημιουργία Ad-hoc δικτύων με γειτονικές MTC συσκευές και ένα 4G μόντεμ για τη σύνδεση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Η επιπλέον πολυπλοκότητα της MTC συσκευής που εισάγει η πρόταση αυτή και που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας εξισορροπείται με την προοπτική κάθε MTC συσκευή να υλοποιεί μόνο τα φυσικό επίπεδο και το επίπεδο εφαρμογής (physical, application layer) της στοίβας πρωτοκόλλων του LTE και η μετάδοση να γίνεται μόνο στο κανάλι PRACH.

4.1.2. Αποφυγή συμφόρησης

Η πιθανότητα συμφόρησης φαίνεται να είναι μεγάλη σε M2M δίκτυα, λόγω του αναμενόμενου μεγάλου αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών. Γι' αυτόν το λόγο απαιτείται η αποφυγή ταυτόχρονης προσπέλασης του δικτύου από ένα τεράστιο αριθμό των συσκευών M2M.

Στο 3GPP LTE το φυσικό κανάλι ελέγχου στο downlink (PDCCH) αποτελείται από τα πρώτα 1, 2, ή 3 OFDM σύμβολα ενός subframe του 1 ms. Αυτή η περιοχή του subframe αποτελείται από ορισμένα στοιχεία ελέγχου καναλιού (Control Channel Elements - CCEs), τα οποία είναι η ελάχιστη μονάδα μεταφοράς πληροφοριών ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψη για παράδειγμα ότι ο αριθμός των CCEs που διατίθενται για το PDCCH είναι 20 για 5MHz BW, που είναι μια τυπική τιμή, και το PDCCH είναι τύπου 1 (πληροφορίες ελέγχου για μία MTC συσκευή μεταδίδονται σε δύο συνεχόμενων CCEs), μόνο το 10 MTC συσκευές μπορούν να εξυπηρετηθούν σε ένα subframe. Μια σχεδίαση αυτού του είδους δεν μπορεί να υποστηρίξει ένα μεγάλο αριθμό MTC συσκευών και κινητών τηλεφώνων ταυτόχρονα [16]. Ένα άλλο κομμάτι του LTE όπου μπορεί να εμφανιστούν φαινόμενα συμφόρησης στο πλαίσιο M2M επικοινωνίας είναι το κανάλι τυχαίας πρόσβασης (RACH). Έρευνες στο 3GPP δείχνουν ότι και οι MTC συσκευές και τα κινητά τηλέφωνα μπορεί να υποστούν συνεχείς συγκρούσεις στο RACH, όταν εμπλέκεται ένας μεγάλος αριθμός MTC συσκευών. Για το ενδεχόμενο αυτό πρόβλημα τέσσερις πιθανές λύσεις έχουν συζητηθεί στο 3GPP [17].

Σύστημα βασισμένο στο backoff: η χρονική διάρκεια του backoff των κινητών τηλεφώνων ορίζεται σε μια μικρή τιμή (π.χ. 20ms), ενώ η χρονική διάρκεια του backoff των MTC συσκευών ορίζεται σε μια μεγάλη τιμή (π.χ. 960ms).

Ξεχωριστοί πόροι στο RACH: οι πόροι χρόνου και συχνότητας στο RACH χωρίζονται για τα κινητά τηλέφωνα και τις MTC συσκευές. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί η χρησιμοποίηση ενός κοινού preamble σε κοινούς πόρους χρόνου – συχνότητας ταυτόχρονα από ένα μεγάλο αριθμό συσκευών (κινητά ή MTC).

Δυναμική κατανομή των πόρων του RACH: ο σταθμός eNodeB κατανέμει δυναμικά πρόσθετους πόρους στο RACH με βάση τα επίπεδα συμφόρησης και τη συνολική κίνηση δεδομένων στο δίκτυο του.

Φραγή πρόσβασης ανά κατηγορία (Access Class Barring - ACB): το σύστημα ACB είχε αρχικά σχεδιαστεί για τον έλεγχο πρόσβασης των UE. Στο ACB, υπάρχουν 16 κατηγορίες πρόσβασης (Access Classes - ACs). Οι κατηγορίες AC 0-9 αντιπροσωπεύουν τα κινητά τηλέφωνα, η κατηγορία AC 10 αφορά την έκτακτη ανάγκη, και οι κατηγορίες AC 11-15 αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες υπηρεσίες υψηλής προτεραιότητας. Η φραγή πρόσβασης ανά κατηγορία επιτυγχάνεται με την ευρεία μετάδοση από το σταθμό eNodeB μιας

πιθανότητας p και ενός χρόνου φραγής AC για τα κινητά τηλέφωνα της κυψέλης που αντιστοιχούν σε κατηγορίες AC 0-9. Το UE ορίζει ταυτόχρονα μια τυχαία τιμή q , με $0 \leq q \leq 1$. Αν $q \leq p$, το κινητό τηλέφωνο προχωρά στη διαδικασία πρόσβασης στο RACH. Σε αντίθετη περίπτωση η πρόσβαση απαγορεύεται για χρονικό διάστημα ίσο με το χρόνο φραγής AC. Τα συστήματα που βασίζονται στη φραγή πρόσβασης ανά κατηγορία μπορούν να αντιμετωπίσουν υψηλά επίπεδα συμφόρησης στο RACH θέτοντας μια εξαιρετικά μικρή τιμή στον παράγοντα p . Ωστόσο, ένα μικρό p οδηγεί σε απaráδεκτα μεγάλη καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση του αιτήματος πρόσβασης. Επιπλέον, αν η συμφόρηση συμβεί ξαφνικά και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από μια κατάσταση ομαλής λειτουργίας, το σύστημα που βασίζεται στο ACB δεν μπορεί να προσαρμόσει την τιμή του p αρκετά γρήγορα ώστε να αντιμετωπιστούν οι νέες συνθήκες συμφόρησης.

4.1.3. Μείωση του όγκου των δεδομένων και του φορτίου στο δίκτυο.

Η μείωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης μέσω τεχνικών μείωσης του overhead αποτελεί ένα από τους πλέον σημαντικούς στόχους προς υλοποίηση καθώς η μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών πρέπει να αντισταθμιστεί από την μείωση των επιπρόσθετων από την πληροφορία δεδομένων που μεταδίδονται από κάθε συσκευή.

Στο πρότυπο 3GPP LTE η επιβάρυνση αυτή εισάγεται για μηχανισμούς όπως το ARQ και το HARQ ή για τεχνικές ανίχνευσης του καναλιού και ανάθεσης πόρων σε κάθε subframe του 1 ms. Θα πρέπει βέβαια να διακριθούν οι επιβαρύνσεις σε δύο ειδών: αυτές που εισάγονται από τα πρωτόκολλα των τελευταίων δύο επιπέδων σε κάθε IP PDU που έρχεται από ανώτερα επίπεδα και σε αυτές που εισάγονται από τα επίπεδα 1 και 2 στα uplink και downlink αποτελώντας είτε κανάλια ελέγχου (PUCCH, PDCCH), είτε σήματα συγχρονισμού, αναφοράς και εκτίμησης. Μια πολύ καλή ανάλυση του protocol overhead γίνεται στο [18], όπου αναλύεται η επιβάρυνση σε bytes που εισάγουν τα πρωτόκολλα των επιπέδων 1 και 2 για υπηρεσίες TCP και VoIP.

Protocol Layer	TCP/IP with RLC AM		VoIP with RLC UM AMR-WB codec 12.65 kb/s
	TCP segment	TCP ACK	
Application-, Transport-, and IP Layer	1460 + 40 bytes	40 bytes	33 + 40 bytes
PDCP ROHC	40 bytes to ~8 bytes	40 bytes to ~8 bytes	40 bytes to ~3 bytes
PDCP SDU	~1468 bytes	~8 bytes	~36 bytes
PDCP Header	2 bytes 12 bits SN		1 byte 7 bits SN
RLC Header	4 bytes 12 bits SN and framing sub-header for concatenation		1 byte 5 bits SN
MAC Header	1 byte		1 byte
L1 CRC	3 bytes		3 bytes
Total Overhead L2 + L1 on Shared Channel	10 bytes		6 bytes
Net overhead reduction including ROHC	22 of 1500 bytes (-1.5%)	22 of 40 bytes (-55%)	31 of 73 (-42%)

Εικόνα 10: Επιβάρυνση σηματοδοσίας [18]

Όπως φαίνεται παραπάνω ο αριθμός των bit σηματοδοσίας του επιπέδου 3 μειώνεται με τη χρησιμοποίηση του πρωτοκόλλου PDCP (Packet Converged Data Protocol) στο επίπεδο 2. Το πρωτόκολλο PDCP συμπιέζει την IP κεφαλίδα για να μειώσει τον αριθμό των bit που πρέπει να σταλούν από το μέσο μετάδοσης. Ο μηχανισμός συμπίεσης που χρησιμοποιείται ονομάζεται Robust Header Compression (ROHC) [19]. Έτσι για μια απλή TCP μετάδοση η τυπική επιβάρυνση των 40 byte που εισάγουν τα πρωτόκολλα TCP και IP, ο μηχανισμός ROHC συμπιέζει την επικεφαλίδα στα 4 bytes. Η κεφαλίδα του PDCP είναι 2 bytes, του RLC 4 bytes, του MAC 1 byte και του PHY 10 bytes. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτού του είδους η επιβάρυνση εισάγεται σε πακέτα που μεταδίδονται στα κανάλια κοινής χρήσης του uplink και downlink. Συνολικά δηλαδή 10 bytes (80 bit) είναι η επιπρόσθετη σηματοδοσία που εισάγουν τα επίπεδα 1 και 2 στα κοινά κανάλια στο 3GPP LTE για TCP μεταδόσεις. Η ανάλυση της επιβάρυνσης που εισάγεται από τα κανάλια ελέγχου αλλά και από τα σήματα ελέγχου στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη αναλύθηκε στο κεφαλαίο 3.5. Με βάση τις εκεί παρατηρήσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός των resource elements σε κάθε resource block που χρειάζονται για σηματοδοσία ελέγχου και όχι μετάδοσης δεδομένων σε κάθε είδος ζεύξης. Ο παρακάτω υπολογισμός γίνεται για ένα σύστημα με εύρος ζώνης 20 MHz και διαμόρφωση 16-QAM και στις δύο κατευθύνσεις.

Ανερχόμενη ζεύξη: Ο συνολικός αριθμός των resource elements σε ένα μπλοκ είναι 168. Από αυτά τα 24 χρησιμοποιούνται για demodulation reference signals και τα υπόλοιπα 144 για τη μετάδοση πληροφορίας που έρχεται από το επίπεδο 3. Αν χρησιμοποιηθεί 16-QAM διαμόρφωση, κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε 4 bit, με αποτέλεσμα τα 144 στοιχεία να αντιστοιχούν σε 576 bit. Βέβαια η πραγματική πληροφορία επιπέδου εφαρμογής που μεταδίδεται σε κάθε μπλοκ περιορίζεται από την εισαγόμενη επιβάρυνση των επιπέδων

TCP/IP/MAC/PHY (144 bit). Άρα σε κάθε resource block μεταδίδονται τελικά 432 bit πληροφορίας επιπέδου εφαρμογής.

	RB	DRS	Data	TCP/IP/MAC/PHY	Pure Data
RE	168	24	144	-	-
Bits (16-QAM)	-	-	576	144	432
Bytes	-	-	72	18	54

Πίνακας 7: Κατανομή πληροφορίας σε resource block (Uplink)

Κατερχόμενη ζεύξη: Όπως και στην ανερχόμενη ζεύξη ο συνολικός αριθμός των resource elements σε ένα μπλοκ είναι 168. Θεωρώντας ότι και τα τρία πρώτα OFDM σύμβολα του μπλοκ καταλαμβάνονται για τα κανάλια ελέγχου, τότε απ' ευθείας τα διαθέσιμα στοιχεία μειώνονται κατά 36. Ακόμη αν υποθεθεί ότι στο συγκεκριμένο μπλοκ, όπως και στα περισσότερα, υπάρχουν μόνο cell specific reference signals, τότε ο αριθμός των RE μειώνεται ακόμη κατά 6. Αν χρησιμοποιηθεί 16-QAM διαμόρφωση, κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε 4 bit, με αποτέλεσμα τα υπόλοιπα 126 στοιχεία να αντιστοιχούν σε 504 bit. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω η πραγματική πληροφορία επιπέδου εφαρμογής που μεταδίδεται σε κάθε μπλοκ περιορίζεται από την εισαγόμενη επιβάρυνση των επιπέδων TCP/IP/MAC/PHY (144 bit). Άρα ο αριθμός των bit πληροφορίας που μεταδίδονται σε κάθε resource block είναι 360 bit επιπέδου εφαρμογής.

	RB	PDDCH	RS	Data	TCP/IP/MAC/PHY	Pure Data
RE	168	36	6	126		
Bits(16-QAM)				504	144	360
Bytes				63	18	45

Πίνακας 8: Κατανομή πληροφορίας σε resource block (Downlink)

4.1.4. Βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση πολυάριθμων MTC συσκευών με μικρές απαιτήσεις bandwidth

Από τη στιγμή που το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, μια αύξηση των ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών επιβάλλει μείωση της χρήσης του εύρους ζώνης ανά συσκευή. Η απαίτηση αυτή συμβαδίζει με τη φύση των περισσότερων από τις εφαρμογές M2M, δηλαδή, που χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Στο 3GPP LTE τα δεδομένα του χρήστη στην κατεύθυνση του uplink μεταδίδονται στο PUSCH, το οποίο έχει σαν βασική δομή μετάδοσης της πληροφορίας το frame των 10 ms και βασίζεται στην κατανομή πόρων χρόνου και συχνότητας με ανάλυση 1 ms και 180 KHz αντίστοιχα. Η κατανομή των πόρων γίνεται από τον scheduler που βρίσκεται στο σταθμό eNodeB. Έτσι δεν υπάρχουν σταθεροί πόροι για τους χρήστες και χωρίς προηγούμενη

σηματοδότηση και ανάθεση συγκεκριμένων πλαισίων από το σταθμό eNodeB, μόνο πόροι τυχαίας πρόσβασης μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Για το λόγο αυτό, η συσκευή πρέπει να παρέχει στον scheduler πληροφορίες για τις απαιτήσεις της μετάδοσης που επιθυμεί να ξεκινήσει (buffer status report) καθώς και για τις ενεργειακές απαιτήσεις αυτής [2]. Αυτό σημαίνει ότι με κατάλληλες πληροφορίες που παρέχονται από την MTC συσκευή και την κατάλληλη ανάθεση πόρων από το MAC επίπεδο, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός resource block ανατίθεται στις MTC συσκευές. Ο αριθμός αυτός μπορεί να αντιστοιχεί σε χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανάλογα με την εφαρμογή M2M.

Ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη για μπλοκ του 1 ms εξαρτάται από το είδος της διαμόρφωσης, τον αριθμό των resource block που διατίθενται, από το ύψος του overhead που εισάγεται καθώς και από το ρυθμό της κωδικοποίησης καναλιού. Ο στιγμιαίος αυτός ρυθμός κυμαίνεται μεταξύ 700 kbps και 86 Mbps (πλήρης χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης συστήματος από έναν χρήστη). Δεν ορίζεται μετάδοση πολλαπλών κεραιών από τον πομπό της συσκευής στο LTE Release 8, καθώς η χρήση περισσότερων του ενός πομπών σε ένα UE δεν θεωρείται ελκυστική από πλευράς κόστους και πολυπλοκότητας. Ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για ένα UE στην ανερχόμενη ζεύξη του LTE εξαρτάται από [2]:

- Το είδος διαμόρφωσης που εφαρμόζεται, με 2, 4 ή 6 bits ανά σύμβολο διαμόρφωση QPSK, 16QAM και 64QAM αντίστοιχα.
- Το εύρος ζώνης του καναλιού. Για 1,4 MHz, το overhead είναι μεγαλύτερο λόγω των κοινών καναλιών και σημάτων συγχρονισμού. Το στιγμιαίο εύρος ζώνης για ένα UE μπορεί φυσικά να κυμανθεί μεταξύ της ελάχιστης κατανομής των 12 subcarriers (ένα resource block των 180 kHz) και του εύρους ζώνης ολόκληρου του συστήματος, που αντιστοιχεί σε 1200 subcarriers με εύρος ζώνης 20 MHz.
- Το ρυθμό κωδικοποίησης του καναλιού.
- Από την κατανομή πόρων στο πεδίο του χρόνου.

Τα δεδομένα προς τον χρήστη στην κατεύθυνση του downlink μεταδίδονται στο PDSCH. Η κατανομή πόρων του 1ms ισχύει επίσης και για την κατεύθυνση του downlink. Τα subcarriers κατανέμονται πάντα σε ομάδες των 12 στο πεδίο της συχνότητας, δημιουργώντας τη βασική δομή ομάδας πόρων των 180 KHz. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω η βασική και ελάχιστη μονάδα κατανομής πόρων χρόνου και συχνότητας του δικτύου στο downlink είναι το resource block διάρκειας 1 ms και εύρους ζώνης 180 kHz. Στο PDSCH, καθώς η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης είναι το OFDMA, ο ρυθμός δεδομένων εξαρτάται από τον αριθμό των χορηγούμενων resource block ή subcarriers για ένα συγκεκριμένο χρήστη. Ο σταθμός eNodeB πραγματοποιεί την κατανομή των πόρων βάσει του Δείκτη Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Indicato -CQI) που αποστέλλεται από το τερματικό. Το PDCCH ενημερώνει τη συσκευή για τα ποια resource block κατανέμονται σε αυτή, δυναμικά με ανάλυση ακόμη και 1 ms. Τα δεδομένα του PDSCH καταλαμβάνουν μεταξύ 3 και 6 συμβόλων για κάθε θυρίδα των 0,5 ms ενός resource block ανάλογα με τη αριθμό των συμβόλων που χρησιμοποιούνται στο μπλοκ για τα δεδομένα του PDCCH και ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται εκτεταμένο ή βραχύ κυκλικό πρόθεμα (extended/short cyclic prefix). Εντός του 1 ms σε ένα subframe, μόνο η πρώτη θυρίδα των 0,5 ms περιλαμβάνει δεδομένα του PDCCH ενώ τα επόμενα 0,5 ms προορίζεται αποκλειστικά για τα δεδομένα του PDSCH. Όταν χρησιμοποιείται εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα 6 σύμβολα

περιλαμβάνονται στη θυρίδα των 0,5 ms, ενώ με βραχύ κυκλικό πρόθεμα 7 σύμβολα μπορούν να τοποθετηθούν αντίστοιχα. Τα δεδομένα ελέγχου του PDCCH καταλαμβάνουν τα πρώτα 1-3 OFDM subcarriers σε ένα subframe.

Η στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο downlink εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες [2]:

- Διαμόρφωση, με τους ίδιους μηχανισμούς που είναι διαθέσιμοι και στο uplink.
- Αριθμός των χορηγούμενων subcarriers. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο downlink το resource block δεν έχει απαραίτητα συνεχή κατανομή στο πεδίο της συχνότητας, όπως συμβαίνει στο uplink. Το εύρος της κατανομής για ένα τερματικό και σε 1 ms μπορεί να κυμανθεί από 12 subcarriers (ένα resource block των 180 kHz) μέχρι και το εύρος ζώνης του συστήματος με 1200 subcarriers.
- Ρυθμός της κωδικοποίησης του καναλιού.
- Αριθμός κεραιών μετάδοσης σε λειτουργία MIMO.

Ο στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων για την κατερχόμενη ζεύξη (υποθέτοντας ότι όλοι οι πόροι κατανέμονται σε έναν μόνο χρήστη χρησιμοποιώντας μόνο πόρους του φυσικού επιπέδου) κυμαίνεται μεταξύ 0,7 Mbps και 170 Mbps. Ακόμα και 300 Mbps ή και παραπάνω θα μπορούσαν να επιτευχθούν εάν με τη χρησιμοποίηση MIMO με 4 κεραιές στην εκπομπή και στη λήψη. Δεν υπάρχει όριο για τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

Γενικά μπορεί να υποθεθεί ότι σε μια συγκεκριμένη περιοχή που δεν καλύπτεται ειδικά για M2M εφαρμογές, το εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί για την M2M επικοινωνία θα μοιράζεται με άλλους χρήστες φωνής ή δεδομένων στην περιοχή. Πλήρης συχνοτικά αμφίδρομη λειτουργία με FDD καταναλώνει περισσότερους πόρους από τη χρήση TDD και ίσως είναι πιο αποτελεσματική για M2M επικοινωνία η χρήση TDD. Βέβαια το κόστος μιας τέτοιας επιλογής είναι η ενσωμάτωση στην MTC συσκευή ενός προηγμένου μηχανισμού για αλλαγή της λειτουργίας από Tx σε Rx και αντίστροφα σε συγχρονισμό με το σταθμό eNodeB, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας της MTC συσκευής και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, η χρήση του μικρότερου διαθέσιμου εύρους ζώνης συστήματος των 1,4 MHz δε θα μειώσει αποτελεσματικά το συνολικό εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από τις MTC συσκευές, δεδομένου ότι το εύρος ζώνης που καταναλώνεται από κάθε συσκευή καθορίζεται από τις οδηγίες του scheduler και από τον αριθμό των resource block που διατίθενται κατεύθυνση του uplink και του downlink. Επιπλέον, όπως περιγράφεται στο [2], όταν χρησιμοποιείται η χαμηλότερη διαμόρφωση BW του 1,4 MHz, το overhead σε σύγκριση με τη μεταδιδόμενη πληροφορία είναι το μεγαλύτερο μεταξύ όλων των δυνατών ευρών ζώνης συστήματος. Στη λειτουργία των 1,4 MHz, ο πόροι που ανατίθενται για το PDCCH είναι 2, 3 ή 4 σύμβολα εντός ενός subframe για να εξασφαλίσουν ένα ανεκτό μέγεθος φορτίου (payload) στο ίδιο subframe σε συνδυασμό με ένα ικανό αριθμό πόρων PDCCH, ώστε να καλύψουν όλα τα δυνατά σενάρια σηματοδότησης. Για παράδειγμα, στην ανερχόμενη κατεύθυνση, αν χρησιμοποιηθεί διαμόρφωση Q-PSK με $\frac{1}{2}$ κωδικοποίηση και θεωρηθεί overhead 14,3% [2], χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σηματοδότηση στο PUCCH, τότε αν μόνο ένα resource block έχει εκχωρηθεί στο UE, ο στιγμιαίος ρυθμός είναι 154 kbps.

Εναπόκειται επομένως στους μηχανισμούς προγραμματισμού του MAC να υλοποιήσουν την ευελιξία του εύρους ζώνης που προσφέρει το φυσικό επίπεδο του LTE για να

πληρωθούν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης των M2M εφαρμογών. Έτσι θα πρέπει να εφαρμοστούν κατάλληλες λειτουργίες για τη σωστή διαχείριση πόρων (Radio Resource Management-RRM) των MTC συσκευών. Ο ρόλος του RRM είναι κυρίως να εξασφαλίσει ότι οι πόροι του δικτύου αξιοποιούνται αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες τεχνικές προσαρμογής και να εξυπηρετήσει τους χρήστες ανάλογα με την ποιότητα εξυπηρέτησης τους (QoS). Αν θεωρήσουμε για παράδειγμα κατανομή πόρων επιπέδου 3 στο downlink, κάθε M2M bearer θα πρέπει να έχουν ένα συγκεκριμένο QoS προφίλ με βάση ένα νέο QCI (QoS Class Identifier) ειδικό για M2M εφαρμογές, με GBR (Guaranteed Bit Rate) λίγων kbps, προτεραιότητας εξαρτώμενης από την εφαρμογή (π.χ. υψηλή προτεραιότητα για την παρακολούθηση πυρκαγιών) και χαλαρών απαιτήσεων όσον αφορά την καθυστέρηση πακέτου. Οι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής (admission control algorithms) δεν προσδιορίζονται στο πρότυπο LTE, αλλά καθορίζονται και υλοποιούνται από τον κατασκευαστή. Το ενδεχόμενο πρόβλημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής μπορεί να εμποδίσει την αποδοχή MTC bearer, αν για παράδειγμα πολλές συσκευές MTC αποφασίσουν να μεταδώσουν δεδομένα ταυτόχρονα. Ένας κατάλληλος αλγόριθμος αποδοχής θα πρέπει να διερευνηθεί.

Ένα ακόμη μηχανισμός μείωσης της επιβάρυνσης σηματοδοσίας και του εύρους ζώνης ανά συσκευή που προσφέρει το LTE είναι ο semi-persistent scheduling. Η επικοινωνία VoIP ακολουθεί ένα συγκεκριμένο πρότυπο, με τα πακέτα φωνής που φθάνουν για μετάδοση ή λήψη σε DL και UL κάθε 20 ms. Αντίστοιχα μπορεί να θεωρηθεί ότι η κίνηση δεδομένων σε M2M εφαρμογές, όπως για εφαρμογές επιτήρησης και μετρήσεων, ακολουθεί κάποιο μοτίβο. Αν αυτό το μοτίβο είναι γνωστό μπορεί να εφαρμοστεί ένας συνδυασμός semi-persistent scheduling μαζί με τη χρήση DRX κύκλων, όπως και στο VoIP. Ωστόσο οι περίοδοι άφιξης πακέτων σε M2M επικοινωνία μπορεί να κυμαίνονται από 10ms έως αρκετά λεπτά, λόγω των ενδεχόμενων μη συχνών μεταδόσεων. Οι εν λόγω διαφορετικές απαιτήσεις QoS περιπλέκουν τον σχεδιασμό των αλγορίθμων κατανομής πόρων σε επικοινωνία M2M, ώστε να παρέχεται μια εγγυημένη απόδοση όσον αφορά το jitter. Ο σταθμός eNodeB αρχίζει να διαβιβάζει τα πακέτα στο downlink σε ορισμένα χρονικά frames και σε συγκεκριμένα και γνωστά εκ των προτέρων resource block και με συγκεκριμένη διαμόρφωση. Αν η MTC συσκευή αναγνωρίζει την πρώτη μετάδοση, τότε η μετάδοση θα συνεχίσει να είναι επίμονη (persistent). Φυσικά, η αναμεταδόσεις HARQ συμβαίνουν με δυναμικό προγραμματισμό από τον scheduler. Με τη χρήση του semi-persistent scheduling η επιβάρυνση σηματοδοσίας στο κανάλι ελέγχου που προκαλείται από το δυναμικό προγραμματισμό μειώνεται και οι πόροι που ελευθερώνονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες συνδέσεις στην ίδια κυψέλη. Με αυτόν τον τρόπο ακόμη το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για τις εφαρμογές M2M μπορεί να διαμορφωθεί εκ των προτέρων σε ένα χαμηλό επίπεδο. Όταν δεδομένα από πολλές συσκευές MTC μεταδίδονται ταυτόχρονα και τα διαθέσιμα resource block στο συγκεκριμένο διάστημα μετάδοσης του ενός 1 ms δεν είναι αρκετά για να εξυπηρετήσουν σε ένα TTI όλες τις MTC συσκευές, τότε ο scheduler θα πρέπει να εκχωρήσει resource block στις MTC συσκευές σε διαδοχικά TTI, ώστε όλες οι συσκευές MTC να εξυπηρετηθούν, έστω και με καθυστέρηση. Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε TTI θα υπάρχουν πάντα διαθέσιμοι πόροι για άλλα είδη επικοινωνίας, με πιο αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς. Σε κρίσιμες εφαρμογές M2M, ο scheduler θα πρέπει να εξετάσει

την QoS προτεραιότητα (QCI) του κάθε bearer και να εκχωρήσετε δυναμικά τους πόρους για τις MTC συσκευές στο uplink και στο downlink.

4.1.5. Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Απαιτείται η εξυπηρέτηση ενός τεράστιου αριθμού συσκευών (MTC και μη) με ανάγκες συγχρονισμού, προγραμματισμού και παραμετροποίησης.

Στο 3GPP LTE πολλές από τις σχετικές με την απαίτηση αυτή παραμέτρους, όπως ο έλεγχος της συμφόρησης, τα QoS προφίλ και η κατανομή των πόρων έχουν αναφερθεί στις παραπάνω απαιτήσεις. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου είναι πώς ένας μεγάλος αριθμός συσκευών MTC με διαφοροποιημένες QoS ανάγκες θα μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τυχόν αλλαγές στους μηχανισμούς του φυσικού επιπέδου είναι δύσκολο να υλοποιηθούν, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η ανάπτυξη έξυπνων μηχανισμών κατανομής των πόρων αποκλειστικά για M2M επικοινωνία. Κάποιοι από του μηχανισμούς κατανομής πόρων (RRM) μπορούν να βελτιωθούν και ο σταθμός eNodeB που αναλαμβάνει την υλοποίηση στην πράξη των μηχανισμών αυτών μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί. Ένα παράδειγμα μιας βελτίωσης αυτού του είδους προτείνεται από τους [20]. Οι συγγραφείς προτείνουν έναν μηχανισμό που βασίζεται στη δημιουργία ομάδων, όπου οι MTC συσκευές που μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης ομαδοποιούνται βάσει κοινού ρυθμού άφιξης πακέτων γ και ανώτατο ορίου jitter δ . Σε κάθε ομάδα κατανέμονται συγκεκριμένα χρονικά frames δυνατότητας πρόσβασης (Access Grants Time Intervals – AGTI), ανάλογα με το ρυθμό άφιξης πακέτων και το μέγιστο jitter των συσκευών της ομάδας. Κάθε AGTI έχει σταθερό μήκος τ για όλες τις ομάδες. Για παράδειγμα ορισμένες MTC συσκευές έχουν περίοδο άφιξης πακέτων 20 ms ενώ άλλες 1 min. Επομένως οι δύο διαφορετικές αυτές υπηρεσίες επιβάλλουν τη διαμόρφωση δύο διαφορετικών ομάδων. Σε κάθε AGTI ένας συγκεκριμένο αριθμό resource block θα διατεθεί για τις MTC συσκευές της ομάδας. Όταν μια MTC συσκευή συνδέεται με επιτυχία στο σταθμό eNodeB και επιθυμεί τη μετάδοση δεδομένων, αποστέλλει το ζεύγος παραμέτρων (γ, δ) μέσω του RACH στο σταθμό eNodeB για να ζητήσει πόρους του δικτύου. Φυσικά η ταυτόχρονη χρήση του RACH από πολλές MTC συσκευές ταυτόχρονα μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση στο RACH. Οι σχετικές έρευνες στο 3GPP σχετικά με το πώς αυτό μπορεί να αποφευχθεί αναφέρονται παραπάνω. Εάν υπάρχει ήδη μια ομάδα MTC συσκευών με το συγκεκριμένο ζεύγος παραμέτρων (γ, δ), ο σταθμός eNodeB ελέγχει μόνο αν υπάρχουν αρκετά resource blocks στο συγκεκριμένο AGTI ώστε να μπορέσει η ομάδα να υποστηρίξει τη νέα MTC συσκευή. Η νέα MTC συσκευή μπορεί να εξυπηρετηθεί αν υπάρχουν επαρκείς πόροι εντός του χρονικού πλαισίου του AGTI της ομάδας. Τότε η νέα συσκευή γίνεται μέλος της ομάδας. Αν δεν υπάρχει ομάδα με το ακριβές ζεύγος (γ, δ) που απαιτεί η συσκευή, ο σταθμός eNodeB υπολογίζει το όριο jitter δ και αν ισχύει $\delta^* \leq \delta$ για τη νέα συσκευή και για όλες τις υπάρχουσες ομάδες, τότε ο σταθμός eNodeB δημιουργεί μια νέα ομάδα για τη συσκευή, η οποία μπορεί πλέον να εξυπηρετηθεί. Σε αυτήν την πρόταση όμως δεν λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα του καναλιού, που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Αυτό γίνεται στο [21], όπου προτείνονται δύο αλγόριθμοι scheduling για την ανερχόμενη ζεύξη του LTE, σε περιπτώσεις όπου πρέπει να εξυπηρετηθούν στο ίδιο κελί τόσο κινητές συσκευές UE, όσο και MTC συσκευές. Οι

αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες του καναλιού αλλά και τη μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση μετάδοσης της κάθε συσκευής και αποδεικνύεται ότι ο αριθμός των MTC συσκευών που εξυπηρετούνται αυξάνεται με τη γνώση της επιτρεπόμενης καθυστέρησης. Αντίθετα ο διαχωρισμός των συσκευών ανάλογα με ένα περιορισμένο αριθμό QoS κατηγοριών οδηγεί στην υποβάθμιση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

4.1.6. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ανά συσκευή

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι απαραίτητη καθώς οι MTC συσκευές θα πρέπει να αντέχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα με μία μόνο μπαταρία και χωρίς σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Στο πρότυπο 3GPP LTE η κίνηση των δεδομένων ενός τερματικού δεν ακολουθεί ένα συγκεκριμένο μοντέλο. Υπάρχουν περιστασιακές περίοδοι έντονης δραστηριότητας που ακολουθούνται από μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα χωρίς καμία δραστηριότητα. Η συνεχής παρακολούθηση του καναλιού ελέγχου της κατερχόμενης ζεύξης (PDCCH) από το τερματικό για uplink grants ή downlink μεταδόσεις σίγουρα εμποδίζει τις όποιες καθυστερήσεις, καθώς το τερματικό αντιδρά άμεσα σε οποιαδήποτε εντολή από το σταθμό eNodeB. Βέβαια αυτό έχει κάποιο κόστος σε όρους κατανάλωσης ενέργειας του τερματικού. Το κύκλωμα του δέκτη σε ένα τυπικό τερματικό αντιπροσωπεύει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας στο τερματικό, το πρότυπο LTE περιλαμβάνει μηχανισμούς ασυνεχούς λήψης (DRX), που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Υπενθυμίζεται ότι ο βασικός μηχανισμός αποτελείται από ένα ρυθμιζόμενο DRX κύκλο στο τερματικό. Όταν το τερματικό ρυθμίζεται να ακολουθεί έναν DRX κύκλο, τότε παρακολουθεί το PDCCH μόνο σε ένα subframe (1 ms) ανά DRX κύκλο. Στα υπόλοιπα subframes το κύκλωμα λήψης απενεργοποιείται και το τερματικό βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει μια σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας: όσο μεγαλύτερος είναι ο κύκλος, τόσο χαμηλότερη είναι η κατανάλωση ενέργειας. Φυσικά, αυτό συνεπάγεται περιορισμούς στον προγραμματισμό του κινητού από το σταθμό eNodeB, καθώς το τερματικό μπορεί να προγραμματιστεί για μια λειτουργία μόνο στα ενεργά subframe. Ορισμένες υπηρεσίες, όπως το VoIP, χαρακτηρίζονται από περιόδους παροδικής μετάδοσης, ακολουθούμενες από περιόδους χωρίς ή πολύ μικρής δραστηριότητας. Για τη διαχείριση αυτών των υπηρεσιών, ένας δεύτερος σύντομος κύκλος DRX μπορεί προαιρετικά να χρησιμοποιηθεί προσθετικά με το μεγάλο DRX κύκλο που περιγράφεται παραπάνω. Κανονικά το τερματικό ακολουθεί το μεγάλο DRX κύκλο, αλλά αν έχει πρόσφατα προγραμματιστεί σε ένα subframe ακολουθεί το σύντομο κύκλο DRX για κάποιο χρονικό διάστημα. Για VoIP σενάρια αυτό μπορεί να γίνει με τον καθορισμό του σύντομου κύκλου DRX έως 20 ms, καθώς σε VoIP μεταδόσεις τα πακέτα φωνής μεταδίδονται συνήθως ανά 20 ms. Μια τυπική τιμή του μεγάλου DRX κύκλου μπορεί να είναι τα 100 ms, ενώ ο inactivity timer θα μπορούσε να λάβει τιμές από 10 έως 50 ms. Ο κατάλληλος ορισμός αυτών των τιμών ανάλογα με το κάθε σενάριο εφαρμογής μπορεί να οδηγήσει σε ένα βέλτιστο ισοζύγιο μεταξύ της ανάγκης για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και της απαιτούμενης απόδοσης. Για παράδειγμα οι [22] μελέτησαν τη βελτιστοποίηση αυτών των τιμών για web browsing σενάρια και κατέληξαν στις τιμές 100 ms για το μεγάλο DRX κύκλο και 25-50 ms για τον inactivity timer. Με αυτές τις ρυθμίσεις, το τερματικό είχε

μείωση 95% στην κατανάλωση ενέργειας, επιτυγχάνοντας παράλληλα 90% της μέγιστης δυνατής απόδοσης (maximum throughput). Σύμφωνα με τα παραπάνω για συγκεκριμένα M2M σενάρια είναι δυνατός ο ορισμός των κατάλληλων τιμών DRX κύκλων και inactivity timers για τις συσκευές MTC, ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας σε συνδυασμό με βέβαια με το ορισμένο GBR για τη συγκεκριμένη M2M εφαρμογή. Θα μπορούσε ακόμη να οριστούν σύντομοι DRX κύκλοι σε συνδυασμό με μηχανισμούς semi-persistent scheduling, όπως και στο VoIP, για να συνδυαστεί η μικρή κατανάλωση ενέργειας με το περιορισμό επιφόρτου σηματοδοσίας.

4.1.7. Μείωση των παρεμβολών και αποφυγή έντονης ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης

Είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός τρόπου διαχείρισης των παρεμβολών. Οι δικτυωμένες συσκευές πρέπει να συνδέονται και να μεταδίδουν μόνο όταν χρειάζεται και μην είναι συνέχεια συνδεδεμένες στο δίκτυο, καταναλώνοντας πόρους που δεν χρειάζονται. Επίσης πρέπει να οριστούν νέοι κανονισμοί για την επιτρεπόμενη ισχύ μετάδοσης, για την πρόληψη της ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης.

Ο τρόπος με τον οποίο το πρότυπο IEE LTE μπορεί να εξασφαλίσει ότι η κάθε συσκευή θα συνδέεται μόνο όταν πρέπει να μεταδώσει δεδομένα παρουσιάστηκε παραπάνω με την περιγραφή της ασυνεχούς λήψης (DRX). Η ιδιότητα αυτή μπορεί να αποδειχτεί πολύ χρήσιμη και στη γενική μείωση των παρεμβολών με την ανάπτυξη των M2M που θα συνοδευτεί με τη σύνδεση ενός πολύ μεγάλου αριθμού συσκευών στα κινητά δίκτυα. Αν αυτές οι συσκευές στην πλειονότητα τους έχουν μεγάλους κύκλους αδράνειας, όπως ισχύει για τα σενάρια που πραγματεύονται εδώ, τότε η αυτόματη απενεργοποίηση τους στο διάστημα που δε μεταδίδουν μειώνει πάρα πολύ τη πιθανότητα παρεμβολών αλλά και ηλεκτρομαγνητικής ρύπανσης γενικά.

4.1.8. Συνύπαρξη με άλλες μη-M2M υπηρεσίες.

Τα δίκτυα M2M δεν θα πρέπει να υποβαθμίσουν την απόδοση των μη-M2M υπηρεσιών.

Η εκπλήρωση της απαίτησης αυτής αναμένεται να είναι δύσκολη, λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό των συσκευών MTC που αναμένεται να συνδεθούν στα ήδη εγκατεστημένα δίκτυα. Ορισμένες πτυχές αυτής της απαίτησης καλύφθηκαν παραπάνω αλλά μόνο πραγματικές προσομοιώσεις και ανάπτυξη πραγματικών M2M δικτύων που θα γίνουν από τους κατασκευαστές και τους παρόχους μπορούν να παράσχουν σωστά αποτελέσματα.

4.2. Απαιτήσεις ειδικού χαρακτήρα για M2M εφαρμογές ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης

Εκτός από τις απαιτήσεις γενικού χαρακτήρα που αναπτύχθηκαν παραπάνω και αποτελούν προϋπόθεση για την ανάπτυξη και λειτουργία οποιουδήποτε είδους M2M εφαρμογής χρησιμοποιώντας το κυψελωτό δίκτυο, στην ενότητα αυτή αναπτύσσονται αναλυτικότερα περισσότερο εξειδικευμένες και σημαντικές απαιτήσεις για ειδικές M2M εφαρμογές έλεγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης. Κάθε απαίτηση αναλύεται με βάση το διαχωρισμό που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όπου υπάρχει ανάγκη εξειδίκευσης της απαίτησης για συγκεκριμένη εφαρμογή, αυτή αναφέρεται.

4.2.1. Αριθμός συνδεδεμένων MTC συσκευών

Στις εφαρμογές ευρείας κλίμακας ο αριθμός αναμένεται να είναι πού μεγάλος, δηλαδή από πολλές δεκάδες μέχρι και χιλιάδες. Ένα εργοστάσιο με εκατοντάδες μηχανήματα, όπου το κάθε μηχάνημα απαιτεί διάφορες μετρήσεις για να εκπέμψει την κατάσταση λειτουργίας του (πίεση, θερμοκρασία, αναφορές λειτουργίας κτλ.) απαιτεί την εγκατάσταση χιλιάδων αισθητήρων συνολικά που εξυπηρετούν την ίδια εφαρμογή. Σε εφαρμογές logistics επίσης, κάθε μικρό ή μεγάλο δέμα προς μεταφορά και αποθήκευση μπορεί να διαθέτει αισθητήρα παρακολούθησης και ελέγχου τοποθεσίας. Το συνολικό μέγεθος της εφαρμογής μπορεί να είναι από μερικές εκατοντάδες μέχρι αρκετές χιλιάδες MTC συσκευές.

Όσον αφορά τις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας ο αριθμός των συνδεδεμένων MTC συσκευών είναι σχετικά μικρός προς μέσο, δηλαδή μέχρι λίγες δεκάδες. Οι μετρητές κατανάλωσης ενέργειας σε μια μονοκατοικία μπορεί να είναι από ένας μέχρι 10 για παράδειγμα, χωρίς να αποκλείονται μεγαλύτερες τιμές βέβαια. Τα συστήματα ασφαλείας που μεταδίδουν δεδομένα αντίστοιχα είναι δύσκολο να ξεπερνούν και αυτά τις μερικές δεκάδες .

4.2.2. Μέγεθος περιοχής ανάπτυξης της εφαρμογής

Για τις εφαρμογές ευρείας κλίμακας η περιοχή κάλυψης μπορεί να είναι μεσαία και μεγάλου μεγέθους. Είναι λιγότερο πιθανό μια εφαρμογή να απαιτεί την εγκατάσταση εκατοντάδων αισθητήρων ή μετρητών σε μια περιοχή λίγων τετραγωνικών μέτρων. Μια πεδιάδα διάσπαρτη με αισθητήρες περιβαλλοντικών μετρήσεων ή ένα εργοστάσιο που εκτείνεται σε τετραγωνικά χιλιόμετρα μπορεί να δώσει την αίσθηση της γεωγραφικής κλίμακας αυτών των εφαρμογών. Όσο αυξάνει η έκταση της εγκατάστασης και ο αριθμός των αισθητήρων τόσο μειώνεται η δυνατότητα άμεσης φυσικής επέμβασης σε κάθε συσκευή και απαιτείται η όσο το δυνατόν πιο οργανωμένη απομακρυσμένη διαχείριση και λειτουργία.

Στις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας η περιοχή κάλυψης είναι μεσαίου και μικρού μεγέθους. Ο χώρος αυτός μπορεί να είναι ένα δωμάτιο ή μια αποθήκη με μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας ή νερού, αλλά και ο συνολικός χώρος ενός μεσαίου οικοπέδου με διάφορα συστήματα ασφαλείας. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις, όπου απαιτείται η ανάπτυξη σχετικά μικρού αριθμού MTC συσκευών σε μεγάλη γεωγραφικά περιοχή (π.χ. περιμετρικοί αισθητήρες ασφαλείας ενός φωτοβολταϊκού πάρκου). Στις εφαρμογές περιορισμένη κλίμακας μπορεί η απευθείας επέμβαση σε κάθε συσκευή να φαίνεται δυνατή αλλά υπάρχει η περίπτωση η εγκατάσταση να έχει γίνει σε χώρο μη εύκολα προσβάσιμο. Για παράδειγμα σε ένα κέντρο ελέγχου πυρκαγιών μέσα σε ένα δάσος, πολλά χιλιόμετρα μακριά από τον κοντινότερο πυροσβεστικό σταθμό, όπου ο επιτηρητής της εφαρμογής ελέγχει την κατάσταση λειτουργίας. Επομένως χρειάζεται οπωσδήποτε και σε αυτήν την περίπτωση η απομακρυσμένη διαχείριση της κάθε MTC συσκευής, που περιλαμβάνει αναφορές κατάστασης, διόρθωση σφαλμάτων, αναβάθμιση λογισμικού κ.α.

4.2.3. Συνεχής συνδεσιμότητα

Η συνεχής συνδεσιμότητα αφορά την ανάγκη κάθε να είναι συνεχώς σε ενεργή κατάσταση. Καταγράφοντας πληροφορίες, αποστέλλοντας μηνύματα κατάστασης του καναλιού στον σταθμό βάσης και παρακολουθώντας συνέχεια τα κανάλια ελέγχου για δεδομένα που τις

αφορούν. Τα κινητά τερματικά συνήθως βρίσκονται σε συνεχή συνδεσιμότητα. Για τις M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας όμως δεν είναι απαραίτητη εκτός από κρίσιμες εφαρμογές, όπως η μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου η τιμή τους μπορεί να αλλάξει πολύ γρήγορα. Γενικά οι MTC συσκευές μπορούν να βρίσκονται σε ανενεργή κατάσταση (το RF κομμάτι τους) μέχρι τη στιγμή που είναι απαραίτητο να λάβουν ή να μεταδώσουν δεδομένα. Αυτό βέβαια δεν αποκλείει τη δυνατότητα κάποιες M2M εφαρμογές να απαιτούν συνεχή συνδεσιμότητα των συσκευών τους. Το πρότυπο 3GPP LTE μπορεί να καλύψει και τις δύο περιπτώσεις με τη χρησιμοποίηση ή όχι του DRX μηχανισμού.

Το ίδιο ισχύει και για τις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας. Η συνεχής συνδεσιμότητα μπορεί να είναι απαραίτητη σε εφαρμογές ασφαλείας με τη χρήση ζωντανού βίντεο, αλλά γενικά η συσκευή μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση ύπνου, με ελάχιστη επικοινωνία με το δίκτυο, εκτός αν ενεργοποιηθεί από άλλο αίτιο.

4.2.4. QoS: Προτεραιότητα/Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων/Καθυστέρηση

Οι απαιτήσεις QoS αφορούν τη δυνατότητα ορισμού για κάθε MTC bearer συγκεκριμένων τιμών προτεραιότητας, ρυθμού μετάδοσης και καθυστέρησης. Στις εφαρμογές ευρείας κλίμακας απαιτείται κατά κύριο λόγο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με χαλαρή ανοχή στην καθυστέρηση, εκτός από περιπτώσεις κρίσιμη παρακολούθησης (π.χ. παρακολούθηση πυρκαγιών), όπου απαιτείται ελάχιστη καθυστέρηση κατά την επικοινωνία. Η προτεραιότητα στο δίκτυο είναι συνήθως χαμηλή, εκτός πάλι κρίσιμων εφαρμογών και μετρήσεων. Απαιτείται δηλαδή από το δίκτυο να μπορεί να διαχειριστεί εφαρμογές με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις στην καθυστέρηση πακέτων, που μπορεί να είναι ανεκτή για λίγα ms έως και πολλά min. Το πρότυπο LTE, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, παρέχει συγκεκριμένες τιμές QCI, που αντιστοιχίζονται σε προκαθορισμένες τιμές εγγυημένου ρυθμού δεδομένων και καθυστέρησης για διάφορες εφαρμογές. Οι τιμές αυτές όμως δε μπορούν να καλύψουν τις πολύ διαφορετικές απαιτήσεις των M2M εφαρμογών. Πλέον ο κάθε πάροχος των M2M υπηρεσιών, σε συνεργασία με τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, θα μπορεί να ορίσει συγκεκριμένα QCI ανάλογα με τις παρεχόμενες M2M εφαρμογές.

Για τις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας απαιτείται γενικά χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, εκτός από εφαρμογές παρακολούθησης με τη χρήση ζωντανού βίντεο. Η ανεκτή καθυστέρηση μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη ενώ η προτεραιότητα στο δίκτυο χαμηλή. Όπως και παραπάνω οι απαιτήσεις αυτές καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών αλλά δεν αποκλείουν και την ύπαρξη εφαρμογών με διαφορετικές απαιτήσεις QoS. Ένα LTE δίκτυο με κατάλληλη παραμετροποίηση θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις όλων των εφαρμογών.

4.2.5. Κινητικότητα (Mobility)

Η κινητικότητα των MTC συσκευών τόσο σε εφαρμογές ευρείας όσο και σε περιορισμένης κλίμακας είναι μηδενική ή πολύ περιορισμένη, μέχρι 10-15 km/h. Η εφαρμογές που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία αφορούν κυρίως τη χρήση αισθητήρων ή μετρητών που βρίσκονται τοποθετημένοι σε σταθερά σημεία. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως στο team tracking (ομάδες διάσωσης, αστυνομών ή πυροσβεστών), επιτρέπεται η μικρή

κινητικότητα των μελών της ομάδας, καθώς οι μικρές ταχύτητες δεν επηρεάζουν έντονα τους μηχανισμούς του προτύπου LTE που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των εφαρμογών αυτών. M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας με μεγάλες απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και ελάχιστης καθυστέρησης, όπως οι εφαρμογές αυτοκίνητο-με-αυτοκίνητο για την αποφυγή συγκρούσεων και τον έλεγχο της κυκλοφοριακής κίνησης δε συμπεριλαμβάνονται στη εφαρμογές που μελετώνται στο παρόν.

4.2.6. Ενεργειακή απόδοση

Στις εφαρμογές ευρείας κλίμακας η δυνατότητα μεγάλης διάρκειας ζωής των MTC συσκευών με τη χρήση της ίδιας μπαταρίας είναι απαραίτητη για εφαρμογές περιβαλλοντικού έλεγχου όπου οι συσκευές δε μπορούν να έχουν συνεχή ηλεκτροδότηση από το δίκτυο και η αλλαγή μπαταρίας είναι δύσκολη. Το ίδιο ισχύει και για κάθε εφαρμογή ανάπτυξης μεγάλου αριθμού συσκευών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η λύση που προσφέρει το πρότυπο 3GPP LTE για την εξοικονόμηση ενέργειας των MTC συσκευών είναι η χρήση του μηχανισμού DRX/DTX, όπου η κάθε συσκευή μπορεί να απενεργοποιείται για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και να ενεργοποιείται μόνο όταν έχει δεδομένα προς μετάδοση ή όταν πρέπει να παρακολουθήσει το κανάλι ελέγχου για να εντοπίσει αν έχει δεδομένα προς λήψη.

Για τις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας, όπως για παράδειγμα στις εφαρμογές έξυπνου σπιτιού, η ενεργειακή απόδοση δεν είναι κρίσιμος παράγοντας, καθώς οι συσκευές μπορούν να συνδεθούν στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Αυτό και πάλι δεν αποκλείει την υλοποίηση εφαρμογών, όπου οι συσκευές πρέπει να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με μπαταρία, όπως οι εφαρμογές ελέγχου απομακρυσμένων μηχανημάτων και μονάδων.

4.3. Χαρακτηριστικά της τηλεπικοινωνιακής κίνησης M2M εφαρμογών

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω οι M2M εφαρμογές μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που θεωρούνται ευρείας κλίμακας (διαχείριση στόλου, περιβαλλοντικές μετρήσεις και παρακολούθηση, βιομηχανικές εφαρμογές επιτήρησης) και στις εφαρμογές μικρής κλίμακας (αυτοματισμοί σπιτιού, ασφάλεια, τηλεϊατρική, έλεγχος βιομηχανικών διαδικασιών). Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών αυτών μπορεί να διαφέρουν πάρα πολύ και να χαρακτηρίζονται είτε από συνεχή ροή πακέτων σε υψηλές ταχύτητες, είτε από ξεσπάσματα κίνησης που ακολουθούνται από μεγάλα διαστήματα αδράνειας, είτε από τη μετάδοση ελάχιστου αριθμού πακέτων σε αραιά διαστήματα. Για να καταστεί δυνατή η ανάλυση της απαιτούμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί και ο προτεινόμενος μηχανισμός εφαρμογής, θα πρέπει να οριστούν τα εξής δεδομένα: είδος μηνυμάτων, μέγεθος και συχνότητα μετάδοσης πακέτων, μοντέλο καταστάσεων των MTC συσκευών σε κάθε εφαρμογή.

Γενικά θεωρείται ότι η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ της MTC συσκευής, η οποία βρίσκεται στο δίκτυο πρόσβασης του παρόχου της υπηρεσίας και ενός M2M server ο οποίος βρίσκεται είτε στο δίκτυο κορμού ή πρόσβασης του παρόχου είτε είναι συνδεδεμένος από οποιοδήποτε απομακρυσμένο σημείο στο διαδίκτυο.



Εικόνα 11: Βασικό μοντέλο δικτύου για M2M κίνηση δεδομένων

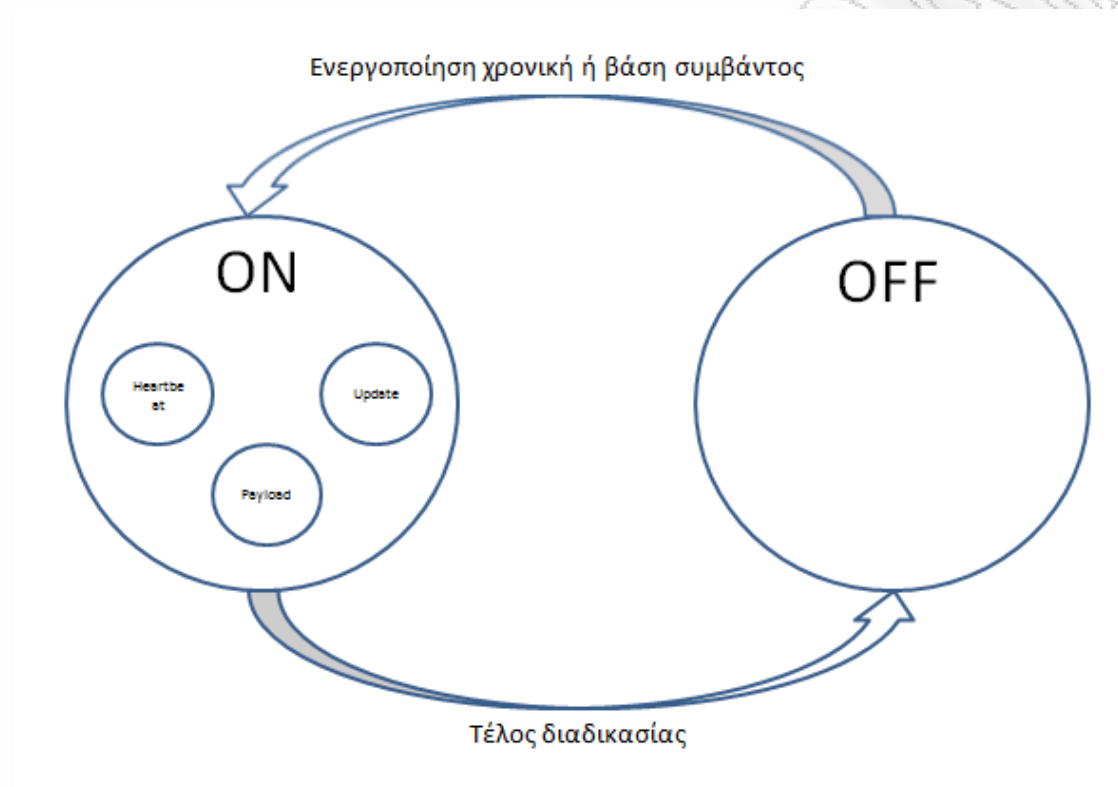
Το είδος των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ της MTC συσκευής και του M2M server παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Είδος μηνύματος	Περιγραφή
Heartbeat	Μπορούν να θεωρηθούν keep alive μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ της συσκευής και του server, σταθερού όγκου και συχνότητας. Εάν ο server βρίσκεται εντός δικτύου του παρόχου, τότε δεν είναι απαραίτητη η πολύ συχνή μετάδοση τέτοιου είδους μηνυμάτων. Εάν ο server βρίσκεται συνδεδεμένος στο διαδίκτυο, τότε χρειάζονται συχνά keep alive μηνύματα, ώστε να διατηρηθεί η επικοινωνία διαμέσου διαφόρων firewalls και NAT. Συχνά keep alive μηνύματα επηρεάζουν αρνητικά την ενεργειακή απόδοση των συσκευών.
Update	Αποτελούν μηνύματα ανανέωσης πληροφορίας ή κατάστασης και εκκινούν είτε από την MTC συσκευή ή τον server. Αν ξεκινούν από την συσκευή μπορεί να είναι μηνύματα ανανέωσης τοποθεσίας ή κατάστασης. Αν ξεκινούν από τον server μπορεί να είναι μηνύματα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των συσκευών αλλά και ανανέωσης του software/firmware της συσκευής. Το μέγεθος των πακέτων και ο συνολικός όγκος πληροφορίας είναι γνωστός εκ των προτέρων. Η συχνότητα μετάδοσης είναι και αυτή γνωστή ή καθορίζεται ανά περίπτωση από τον server.
Payload	Αποτελούν πληροφορίες ελέγχου μετρήσεων και παρακολούθησης. Μπορεί να είναι σταθερού μεγέθους, προκαθορισμένου εκ των προτέρων (γνωστά μηνύματα ελέγχου ή μετρήσεων). Μεταβαλλόμενου όπως στη περίπτωση μετάδοσης εικόνων ή εξαιρετικών

γεγονότων σε περιπτώσεις παρακολούθησης. Αλλά και να αποτελούν ροές δεδομένων, όπως το σήμα από μια κάμερα ασφαλείας.

Πίνακας 9: Είδη κίνησης M2M εφαρμογών

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρουσιάζεται ένα απλό διάγραμμα καταστάσεων μιας MTC συσκευής που έχει ενσωματωμένο και τον αντίστοιχο αισθητήρα.



Εικόνα 12: Βασικό μοντέλο ON-OFF για M2M κίνηση δεδομένων

Ο συνολικός όγκος δεδομένων που μεταδίδεται από MTC συσκευές σε συγκριμένο χρονικό διάστημα υπολογίζεται για κάθε περίπτωση που αναφέρθηκε παραπάνω σύμφωνα με τους εξής τύπους [23]:

- *Heartbeat/update*

$$T = N \times F_{heartbeat} \times (P_{overhead} + P_{payload})$$

T : Ο συνολικός όγκος δεδομένων σε bytes που μεταδίδονται από N MTC συσκευές σε ένα χρονικό διάστημα εξαρτώμενο από τον παράγοντα $F_{heartbeat}$.

N : Ο συνολικός αριθμός των MTC συσκευών που εξυπηρετούν μια εφαρμογή.

$F_{heartbeat}$: Η συχνότητα μετάδοσης των heartbeat μηνυμάτων

$P_{overhead}$: Η επιβάρυνση σηματοδοσίας που εισάγουν σε κάθε πακέτο τα πρωτόκολλα κάτω από το επίπεδο εφαρμογής

$P_{payload}$: Ο αριθμός των bytes κάθε μηνύματος heartbeat (δεδομένα πληροφορίας)

- *Payload/update*

$$T = N \times F_{event} \times F_{sequence}(P_{overhead} + P_{payload})$$

Οι παράμετροι T , N , $P_{overhead}$, $P_{payload}$ ορίζονται όπως παραπάνω.

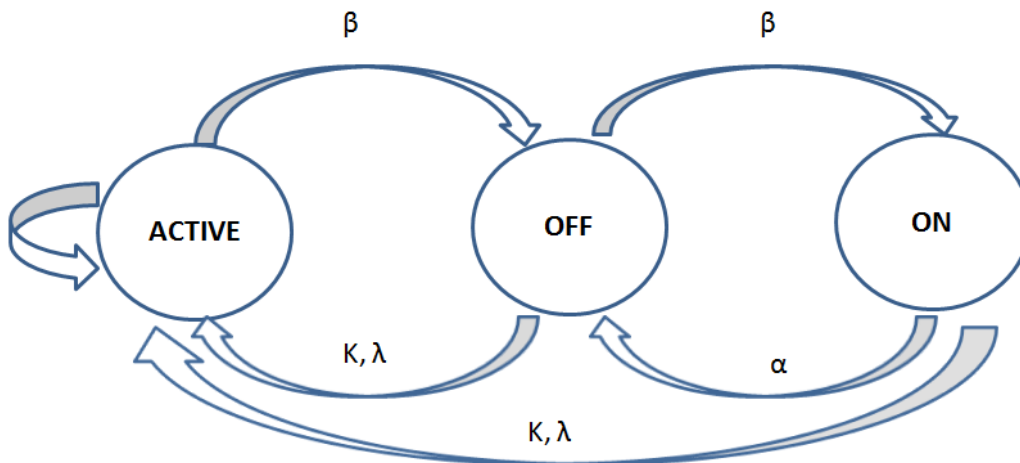
F_{event} : Αφορά τη συχνότητα εμφάνισης ενός συμβάντος που ενεργοποιεί τον αισθητήρα μιας MTC συσκευής. Μόλις συμβεί ένα συγκριμένο γεγονός που εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή ο αισθητήρας αρχίζει να συλλέγει δεδομένα. Για παράδειγμα σε βιομηχανικές εφαρμογές επιτήρησης το μέγεθος αυτό αναφέρεται στη συχνότητα κατά την οποία η μέτρηση θερμοκρασίας ή πίεσης υπερβαίνει κάποιο όριο. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί η παρακολούθηση σε εφαρμογές σπιτιού, όπου το μέγεθος αυτό αντιπροσωπεύει τη συχνότητα κατά την οποία ενεργοποιείται ο αισθητήρας πυρκαγιών ή πόσο συχνά μεταδίδει μετρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος ο αισθητήρας του μετρητή. Η τιμή του μεγέθους μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων ή να προβλεφθεί ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, ώστε να είναι δυνατή η παραμετροποίηση των αντίστοιχων μηχανισμών που χρησιμοποιούνται.

$F_{sequence}$: Είναι η συχνότητα μετάδοσης/λήψης μηνυμάτων από τις MTC συσκευές αφού έχει συμβεί κάποιο γεγονός, το οποίο εμφανίζεται κάθε F_{event} . Αφού έχει συμβεί το αρχικό γεγονός το μέγεθος αυτό δείχνει πόσες φορές ακόμη πρέπει η MTC συσκευή να ενεργοποιηθεί για να μεταδώσει/λάβει δεδομένα εντός ενός σύντομου χρονικού διαστήματος. Αν η συσκευή ξυπνήσει και προλάβει να στείλει όλα τα δεδομένα που έχει στο buffer εντός ενός μηνύματος ή πακέτου, τότε προφανώς το $F_{sequence}$ δεν έχει πρακτικό νόημα αφού ταυτίζεται με το F_{event} . Το $F_{sequence}$ χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ειδοποιήσεων (alarms), όπου ο αισθητήρας, αφού συμβεί κάποιο γεγονός, όπως η υπέρβαση κάποιας τιμής πίεσης, θα μεταδώσει την τιμή αυτή αλλά και θα συνεχίσει να μεταδίδει τιμές πίεσης για ένα συγκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι να αλλάξει αυτή η κατάσταση. Επίσης σε εφαρμογές ασφαλείας, κάποιο γεγονός (ενεργοποίηση αισθητήρα κίνησης) μπορεί να ενεργοποιήσει τις κάμερες ασφαλείας, οι οποίες θα μεταδίδουν δεδομένα από εκείνο το σημείο και έπειτα μέχρι να υπάρξει κάποια αλλαγή της κατάστασης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι καταστάσεις μιας MTC συσκευής σε M2M εφαρμογές ελέγχου, παρακολούθησης και μετρήσεων μπορεί να είναι οι εξής:

- Ανενεργή (OFF)
- Ενεργή για τη μετάδοση heartbeat/update δεδομένων με συγκριμένη συχνότητα και μέγεθος πακέτων (ON)
- Ενεργή για τη συνεχή μετάδοση δεδομένων πληροφορίας μετά από κάποιο γεγονός μέχρι να επανέλθει στην κατάσταση OFF/ON (ACTIVE)

Συνεπώς το διάγραμμα καταστάσεων που παρουσιάστηκε παραπάνω πρέπει να τροποποιηθεί αναλόγως:



Εικόνα 13: Μοντέλο ON-ACTIVE-OFF για M2M κίνηση δεδομένων

Χρησιμοποιώντας τις Μαρκοβιανές αλυσίδες για να προσομοιώσουμε την εναλλαγή καταστάσεων της MTC συσκευής, το απλό μοντέλο ON/OFF μπορεί να εφαρμοστεί για τις μεταβάσεις από την ανενεργή κατάσταση στην ενεργή για μετάδοση heartbeat πληροφορίας. Το χρονικό διάστημα στις καταστάσεις ON/OFF είναι εκθετικά κατανομημένο με μέσες τιμές α και β αντίστοιχα. Αντίθετα για τη μετάδοση μηνυμάτων έπειτα από κάποιο συμβάν, τα πακέτα μεταδίδονται στην ενεργή κατάσταση σύμφωνα με κάποιο κατανομή, η οποία εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και μπορεί να είναι εκθετική, κανονική, Poisson, Weibull [24].

Με βάση την παραπάνω ανάλυση η εργασία εστιάζεται σε δύο διαφορετικά μοντέλα κίνησης δεδομένων, τα οποία ταιριάζουν στο είδος των εφαρμογών ελέγχου, μετρήσεων και παρακολούθησης που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Η πρώτη εφαρμογή είναι η μια γενική εφαρμογή ειδοποιήσεων και ανίχνευσης γεγονότων και η δεύτερη μια εφαρμογή επιτήρησης και ελέγχου που αναφέρεται ως αυτόματος πιλότος [24].

4.3.1. Εφαρμογές ειδοποιήσεων και ανίχνευσης γεγονότων (περιορισμένης κλίμακας)

Υπάρχουν εφαρμογές, όπου αισθητήρες μεταδίδουν μικρό όγκο δεδομένων σε αραιά χρονικά διαστήματα. Παράδειγμα αυτού του είδους αισθητήρων αποτελούν οι αισθητήρες θερμοκρασίας, οι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας, οι αισθητήρες κρίσιμων παραμέτρων στη βιομηχανία κ.α. Ένα είδος εφαρμογών με παρόμοια δεδομένα κίνησης αποτελούν οι εφαρμογές ανίχνευσης γεγονότων που απαιτούν άμεση αντίδραση. Οι ανιχνευτές καπνού, οι μετρητές πίεσης και τα συστήματα ασφαλείας είναι εφαρμογές αυτού του είδους, που ενεργοποιούνται με βάση κάποιο γεγονός (ανίχνευση καπνού, υπέρβαση ορίου πίεσης, ανίχνευση κίνησης) και ξεκινούν τη συνεχή μετάδοση δεδομένων προς κάποιο κέντρο ελέγχου. Και στα δύο παραπάνω είδη εφαρμογών οι MTC συσκευές μεταδίδουν γενικά keep alive μηνύματα στο κέντρο ελέγχου τα οποία δηλώνουν την κατάσταση της συσκευής και μπορεί να περιέχουν ελάχιστα δεδομένα (μια τιμή μέτρησης για παράδειγμα). Όταν συμβεί κάποιο ιδιαίτερο γεγονός το κέντρο ελέγχου μεταδίδει προς τον οργανισμό ευθύνης δεδομένα με συγκεκριμένη συχνότητα, που είναι εκ των προτέρων γνωστή ή μπορεί να

προβλεφθεί, μέχρι να αρθούν οι όροι που επιβάλλουν την μετάδοση. Έτσι οι δύο τύποι δεδομένων που ορίζονται είναι οι εξής:

Keep alive: Μηνύματα με πολύ μικρό ρυθμό μετάδοσης που μεταδίδονται από τις MTC συσκευές στο κέντρο ελέγχου (GPS, φωτογραφίες, κείμενο και ώρα).

Ριπές δεδομένων: Μηνύματα με μικρό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από το κέντρο ελέγχου στον οργανισμό ευθύνης (GPS, φωτογραφίες, αποσπάσματα βίντεο, κείμενο και ώρα).

Η οντότητα κέντρο ελέγχου που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να μην υπάρχει, με αποτέλεσμα και τα δύο είδη κίνησης να εξυπηρετούνται από τις MTC συσκευές. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα μηνύματα keep alive αποτελούν τα heartbeat δεδομένα και οι ριπές δεδομένων είναι payload μηνύματα. Σύμφωνα με τον [23] οι τυπικές τιμές $F_{heartbeat}$, $F_{sequence}$, F_{event} , T , N , $P_{payload}$ για συγκεκριμένες εφαρμογές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του $P_{payload}$ για την heartbeat πληροφορία έχει γίνει με βάση συγκριμένο μηχανισμό του IEEE 802.15.4 και αν αλλάξει ο μηχανισμός πρόσβασης, πρέπει να υπολογιστεί και πάλι αυτή η τιμή.

- Heartbeat

Είδος αισθητήρα	Αριθμός συσκευών N	$P_{payload}$ (bytes)	$F_{heartbeat}$
Αισθητήρας καπνού	2 έως 8	1	$2 \cdot 10^{-2}$ Hz
Σύστημα ασφαλείας	1	1	$2 \cdot 10^{-2}$ Hz
Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας	1	1	$6 \cdot 10^{-4}$ Hz
Θερμοκρασία	3 έως 10	1	$6 \cdot 10^{-4}$ Hz

Πίνακας 10: Δεδομένα Heartbeat (εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας)

- Payload

Είδος αισθητήρα	Αριθμός συσκευών N	$P_{payload}$ (bytes)	F_{event}	$F_{sequence}$
Αισθητήρας καπνού	2 έως 8	4	$1,2 \cdot 10^{-3}$ (φορές/χρόνο)	$2 \cdot 10^{-1}$ Hz
Σύστημα ασφαλείας	1	100	144	-
Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας	1	100	144	-
Θερμοκρασία	3 έως 10	4	5	-

Πίνακας 11: Δεδομένα Payload (εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας)

Το πρώτο είδος κίνησης από τα παραπάνω μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας το μοντέλο κίνησης ON-OFF με σταθερή περίοδο άφιξης πακέτων για να εξομοιώσει την περιοδική φύση των μηνυμάτων Keep alive. Το δεύτερο είδος κίνησης δεδομένων μπορεί να προσομοιωθεί σαν ένα μοντέλο ACTIVE-OFF κατανομή Weibull με μέσο ρυθμό λ και σχήμα κ .

4.3.2. Αυτόματος πιλότος (ευρείας κλίμακας)

Το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμογής περιγράφεται αναλυτικά στο [24] και αποτελεί ένα σενάριο εντοπισμού και αποφυγής σύγκρουσης οχημάτων και τι μέτρα λαμβάνονται σε περίπτωση έκτακτου συμβάντος. Το σενάριο βασίζεται στην ύπαρξη MTC συσκευών ενσωματωμένων σε αυτοκίνητα αλλά και στο γύρω περιβάλλον τους, για τη δημιουργία ενός συστήματος αυτοματισμού της οδήγησης. Οι συσκευές αυτές (αυτοκίνητων, σημάτων, καμερών κτλ.) μεταδίδουν πληροφορίες σε ένα κέντρο ελέγχου. Το κέντρο ελέγχου με τη σειρά του μεταδίδει ειδοποιήσεις σε όλα τα οχήματα γύρω από την περιοχή ενός ατυχήματος. Έτσι σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης το κέντρο ελέγχου, είτε αναλαμβάνει τη διαχείριση των συστημάτων του αυτοκινήτου (αυτόματος πιλότος), είτε μεταδίδει σήμα κινδύνου και πληροφορίες στον οδηγό.

Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη εργασία καθώς είναι το μόνο που μπορεί να προσομοιώσει εφαρμογές ελέγχου και επιτήρησης ευρείας κλίμακας, όπου οι κόμβοι του δικτύου μπορεί να έχουν και μια σχετική μικρή ταχύτητα (ομάδες επιτήρησης) ενώ και ο όγκος των μεταδιδόμενων δεδομένων σε περίπτωση ανάγκης μπορεί να είναι μεγάλος (βίντεο από κάμερα), χωρίς όμως να αποκλείεται και η σποραδική μετάδοση πακέτων μικρού όγκου. Δύο είδη κίνησης δεδομένων ορίζονται στο μοντέλο αυτό:

Keep alive: Στην ανερχόμενη ζεύξη αποτελούν μηνύματα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης από τους MTC κόμβους του δικτύου (αυτοκίνητα, πινακίδες κτλ.) προς το κέντρο ελέγχου. Αυτού του είδους τα δεδομένα μπορεί να είναι πληροφορία GPS, ταχύτητα, χρόνος, ώρα κ.α. με το μέγεθος του πακέτου να κυμαίνεται από τα 64 byte έως το 1 Kbyte και με μέσο όρο τα 100 byte. Η συχνότητα μετάδοσης για χαμηλές ταχύτητες είναι 1 πακέτο ανά 100 ms. Στην κατερχόμενη ζεύξη από το κέντρο ελέγχου προς τις MTC συσκευές του δικτύου τα keep alive μηνύματα έχουν μέγεθος 1 Kbyte και συχνότητα μετάδοσης 1 πακέτο ανά 1 s.

Ριπές δεδομένων σε περίπτωση ανάγκης: Όπως είναι φυσικό σε περίπτωση ανάγκης απαιτείται αυξημένος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ώστε να είναι δυνατή και η πληρέστερη ενημέρωση του κέντρου ελέγχου για την κατάσταση στο πεδίο αλλά και ο καλύτερος και αμεσότερος συντονισμός των κόμβων του δικτύου από το κέντρο ελέγχου. Έτσι για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των κόμβων στην ανερχόμενη ζεύξη απαιτείται η μετάδοση ενός πακέτου 1 Kbyte ανά 10 ms, ενώ στην κατερχόμενη ζεύξη απαιτείται η μετάδοση ενός πακέτου 1-2 Kbyte ανά 10 ms.

Όπως και προηγουμένως τα keep alive μηνύματα μπορούν να θεωρηθούν ως heartbeat πληροφορία, ενώ οι ριπές δεδομένων σε περίπτωση ανάγκης ως payload πληροφορία. Σύμφωνα με το [24] οι τυπικές τιμές $F_{heartbeat}$, $F_{sequence}$, T , N , $P_{payload}$ για συγκεκριμένες εφαρμογές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

- Heartbeat

Είδος ζεύξης	Αριθμός συσκευών N	$P_{payload}$ (bytes)	$F_{heartbeat}$	$F_{sequence}$
Ανερχόμενη	50	64 έως 1 Kbyte	10 Hz	-
Κατερχόμενη	50	1 Kbyte	1 Hz	-

Πίνακας 12: Δεδομένα heartbeat (εφαρμογές ευρείας κλίμακας)

- Payload

Είδος ζεύξης	Αριθμός συσκευών N	$P_{payload}$ (bytes)	$F_{heartbeat}$	$F_{sequence}$
Ανερχόμενη	50	1 Kbyte	-	100 Hz
Κατερχόμενη	50	1-2 Kbyte	-	100 Hz

Πίνακας 13: Δεδομένα Payload (εφαρμογές ευρείας κλίμακας)

Το πρώτο είδος κίνησης από τα παραπάνω μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας το μοντέλο κίνησης ON-OFF με σταθερή περίοδο άφιξης πακέτων για να εξομοιώσει την περιοδική φύση των μηνυμάτων Keep alive. Το δεύτερο είδος κίνησης δεδομένων μπορεί να προσομοιωθεί σαν ένα μοντέλο ACTIVE-OFF με εκθετική κατανομή με μέσο ρυθμό καθώς η μετάδοση δεδομένων από τις συσκευές ξεκινά όταν ενεργοποιηθεί ο αισθητήρας εξαιτίας κάποιου συμβάντος.

Βέβαια υπάρχουν στη βιβλιογραφία αρκετές έρευνες και εκτιμήσεις για το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε M2M εφαρμογές εκτός από τις παραπάνω. Ενδεικτικά αναφέρεται η μελέτη των [25] για εφαρμογές μέτρησης κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα έξυπνο δίκτυο (smart grid), όπου δέχονται ότι κάθε έξυπνος μετρητής μεταδίδει κάθε δευτερόλεπτο 4 bytes για ταυτοποίηση της συσκευής, 3 bytes για μετρήσεις ποιότητας και 9 bytes για τις ποσοτικές μετρήσεις της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για αντίστοιχο σενάριο οι [26] θεωρούν ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων κάθε μετρητή είναι 1 TCP πακέτο ανά 50 δευτερόλεπτα.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις εφαρμογής

Από την ανάλυση των απαιτήσεων των M2M εφαρμογών και των μηχανισμών του 3GPP LTE προκύπτει ότι η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η βέλτιστη ανάθεση πόρων σε μεγάλο αριθμό MTC συσκευών, κάθε μια από τις οποίες έχει χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Οι μηχανισμοί του LTE μπορούν να εξυπηρετήσουν τις παραπάνω απαιτήσεις αλλά ταυτόχρονα υπάρχουν σημαντικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν και να δοθούν κατάλληλες λύσεις. Τα βασικά θέματα λοιπόν προς διευθέτηση για να είναι δυνατή η υλοποίηση των εφαρμογών αυτών είναι οι ενεργειακές απαιτήσεις των MTC συσκευών, η μείωση του overhead και η αποφυγή συνθηκών συνωστισμού.

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζεται ο συνδυασμός των μηχανισμών του 3GPP LTE που απαιτούνται ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση M2M εφαρμογών, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω και εξασφαλίζοντας ότι την χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας των συσκευών (DRX/DTX κύκλοι) και τη μείωση του signaling overhead (συνδυασμός DR/DTX με semi-persistent scheduling). Έπειτα οι μηχανισμοί αυτοί παραμετροποιούνται ανάλογα με το μοντέλο κίνησης δεδομένων των M2M εφαρμογών που αναλύεται στο κεφάλαιο 4.3 με ταυτόχρονη ανάλυση της αξιοποίησης (utilization) του καναλιού και της απώλειας πακέτων. Τέλος προτείνεται ένας μηχανισμός για βελτίωση των συνθηκών συνωστισμού στα κανάλια ελέγχου.

5.1. Μείωση καταναλισκόμενης ενέργειας σε M2M εφαρμογές μέσω μηχανισμών του 3GPP LTE.

Παρατηρείται ότι η ταυτόχρονη και προγραμματισμένη χρησιμοποίηση μηχανισμών που υποστηρίζει το πρότυπο LTE και η κατάλληλη παραμετροποίηση μπορεί να καλύψει σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις λειτουργίας M2M εφαρμογών όπως οι έξυπνες μετρήσεις και επιτήρηση μικρής και μεγάλης εμβέλειας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω θα πρέπει να τονιστούν τα εξής:

- Η χρήση του μικρότερου δυνατού εύρους ζώνης συστήματος (1,4 MHz) όχι μόνο δε μειώνει το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης ανά συσκευή, καθώς αυτό καθορίζεται από τον όγκο των πόρων που κατανέμει ο scheduler, αλλά επιβάλλει αναλογικά μεγαλύτερη επιβάρυνση σηματοδοσίας ανά φορτίο δεδομένων.
- Ο μηχανισμός FDD προτιμάται έναντι του TDD καθώς ο δεύτερος εισάγει πολυπλοκότητα στις MTC συσκευές, λόγω των κυκλωμάτων εναλλαγής εκπομπής-λήψης, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας ανά συσκευή.
- Η εργασία πραγματεύεται την λειτουργία των MTC συσκευών που ήδη έχουν ολοκληρώσει τη διαδικασία πρόσβασης στο κανάλι και έχουν ελάχιστη κινητικότητα. Επομένως η διαδικασία random access δεν χρησιμοποιείται. Η χρήση του RACH καναλιού για τη διαδικασία πρόσβασης των συσκευών MTC θα πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω, λόγω μεγάλου κινδύνου συμφόρησης σε περίπτωση που πάρα πολλές συσκευές προσπαθήσουν ταυτόχρονα να επικοινωνήσουν με το δίκτυο κορμού.
- Οι MTC συσκευές θα πρέπει να παρακολουθούν το κανάλι επικοινωνίας μόνο όσο χρειάζεται για να μεταδώσουν και να λάβουν δεδομένα όταν πρέπει και το

υπόλοιπο διάστημα θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου. Γι' αυτό το λόγο η ενσωμάτωση τους εντός ενός μηχανισμού DRX είναι απαραίτητη.

- Για να βρεθεί η κατάλληλη διάρκεια του βραχέως και του μακρού DRX κύκλου θα πρέπει η κάθε συσκευή ή ομάδα συσκευών μιας M2M εφαρμογής να μεταδίδει στον scheduler τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης της μέσω του QCI. Το QCI κάθε συσκευής θα επιλέγεται από διάφορα M2M QoS προφίλ, τα οποία θα αντιστοιχούν σε διαφορετικές ανάγκες μετάδοσης και θα απαιτούν διαφορετικό GBR.
- Έτσι αν τα χαρακτηριστικά κίνησης κάθε εφαρμογής είναι γνωστά είναι δυνατόν να οριστούν συγκεκριμένοι DRX κύκλοι για τις MTC συσκευές μιας M2M εφαρμογής για την παρακολούθηση του PDCCH καναλιού και στη συνέχεια η μετάδοση στο uplink και στο downlink μεταξύ της συσκευής και του σταθμού eNodeB να πραγματοποιείται με τη χρήση semi-persistent scheduling. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και το overhead που θα εισαγόταν αν χρησιμοποιούνταν δυναμική κατανομή πόρων από τον scheduler.
- Σε αυτή την περίπτωση για να αποφευχθεί συμφόρηση στο PDCCH, στην κατάρτιση του DRX κύκλου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη εκτός από τα χαρακτηριστικά της κίνησης και ο αριθμός των MTC συσκευών που εξυπηρετούνται εντός του κελιού. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιείται εύρος ζώνης συστήματος 5 MHz, θεωρώντας ότι ο αριθμός των Control Channel elements είναι 20 και το PDCCH είναι τύπου 1, τότε η πληροφορία για μια MTC συσκευή περιέχεται σε δύο CCE's. Άρα 10 MTC συσκευές μπορούν να εξυπηρετηθούν από το PDCCH σε ένα subframe. Αν θεωρηθεί ότι κάθε συσκευή ελέγχει το κανάλι για 1 ms, τότε αυτό το 1 ms θα μπορούν να ακούν το κανάλι κατά το μέγιστο 10 συσκευές. Θεωρώντας ότι το επόμενο 1 ms θα αφήνεται για άλλες υπηρεσίες (φωνής, δεδομένων) εντός του κελιού και ότι το σύνολο των MTC συσκευών είναι 1000 τότε ο μακρύς DRX κύκλος μπορεί να οριστεί στα 200 ms.
- Η εύρεση του κατάλληλου ισοζυγίου μεταξύ της τιμής του μεγάλου DRX κύκλου και του inactivity timer που θα ταιριάζει στα χαρακτηριστικά μετάδοσης της κάθε M2M εφαρμογής για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή μείωση ενέργειας της συσκευής χωρίς σημαντική πτώση της απαιτούμενης απόδοσης σε συνδυασμό με κατάλληλη σχεδίαση ώστε να μην υπάρξει συμφόρηση στο PDCCH αποτελεί το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί για την εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου.

Τα παραπάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Μηχανισμοί 3GPP LTE για υποστήριξη M2M εφαρμογών

System Bandwidth	> 1.4 MHz
Duplexing	FDD
Channel Access	MTC state: RRC_CONNECTED, low mobility No RACH
Sleep Mode	DRX/DTX

Scheduling	Semi-persistent
Control Channel	PDCCH

Πίνακας 14: LTE/M2M

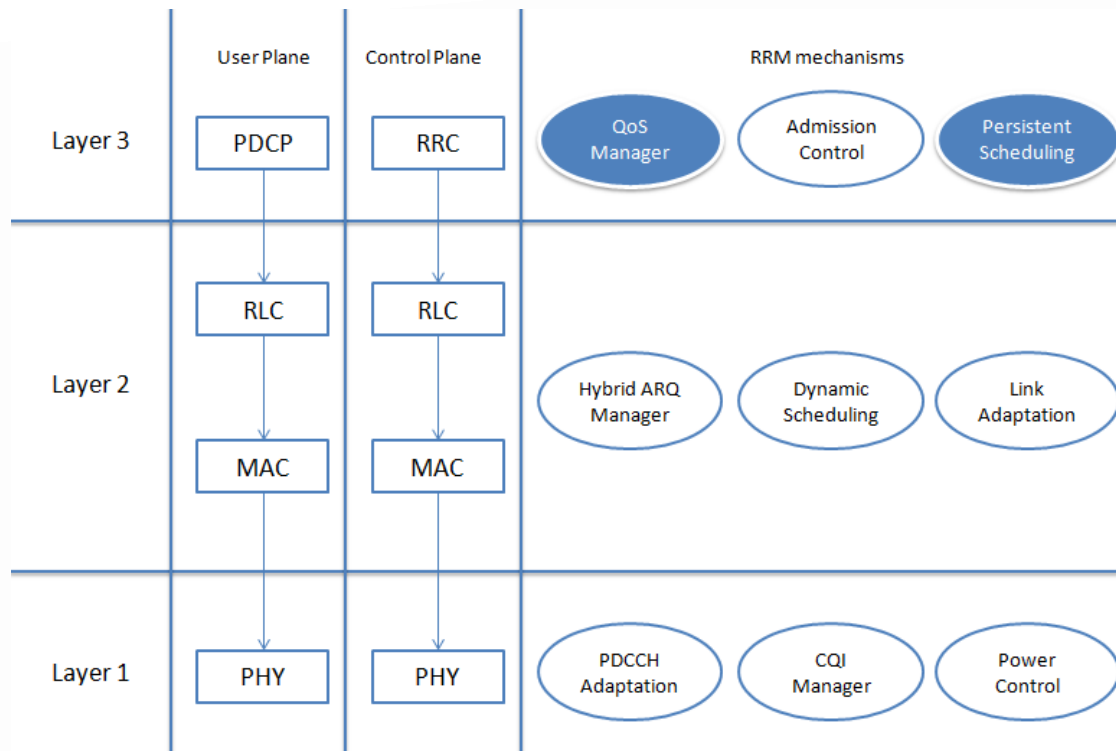
Πιο συγκεκριμένα κάθε MTC συσκευή που συνδέεται στο LTE RAN δίκτυο θα έχει εκ των προτέρων ρυθμισμένο ένα βασικό bearer με το απλούστερο δυνατό QoS προφίλ, ώστε να είναι δυνατή η IP επικοινωνία του με τις υπόλοιπες οντότητες του δικτύου. Το βασικό αυτό bearer παρέχεται στην MTC συσκευή από την οντότητα MME, με βάση τα στοιχεία της συσκευής που βρίσκονται αποθηκευμένα στην οντότητα HSS. Όπως είναι γνωστό κάθε bearer χαρακτηρίζεται από ένα QoS προφίλ που ορίζεται από τους δείκτες QCI (Quality of Service Class Identifier) και ARP (Allocation and Retention Priority). Ο δείκτης ARP αφορά την αποδοχή ή όχι του bearer της MTC συσκευής, που καθορίζεται από τον μηχανισμό αποδοχής του eNodeB. Ο μηχανισμός αυτός εξαρτάται από τον κατασκευαστή και δεν ορίζεται από το πρότυπο. Το QoS προφίλ του αρχικού bearer της συσκευής, μόλις αυτή συνδέεται στο δίκτυο, θα οδηγήσει τον RRM μηχανισμό του eNodeB να θέσει τη συσκευή σε λειτουργία DRX. Οι παράμετροι του DRX (βραχύς, μακρύς κύκλος, inactivity timer) θα ορίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε M2M εφαρμογής, ώστε να υπάρξει το βέλτιστο ισοζύγιο μεταξύ καθυστέρησης και κατανάλωσης ενέργειας.

Επιπροσθέτως η αρχιτεκτονική του LTE δίνει τη δυνατότητα στην MTC συσκευή να επικοινωνήσει απευθείας με τον αντίστοιχο M2M server στο επίπεδο εφαρμογής και να δηλώσει κάποια αλλαγή στις QoS απαιτήσεις που έχει ή για τη δημιουργία ενός νέου bearer με διαφορετικό QoS προφίλ. Ο M2M server έπειτα μπορεί να ενημερώσει το δίκτυο για τα απαιτούμενα bearers που χρειάζεται η εκάστοτε M2M εφαρμογή. Το ίδιο το δίκτυο θα επιλέξει ανάμεσα στα ήδη ορισμένα από την 3GPP QoS Class Identifiers (QCI) ή σε κάποια άλλα που έχουν υλοποιηθεί για τις ανάγκες του συγκεκριμένου δικτύου. Το νέο QoS προφίλ των bearers της συσκευής ορίζεται από την οντότητα PCRF (Policy and Charging Rules Function) του EPC και μεταδίδεται από το P-GW στο S-GW και από εκεί μέσω του MME στο δίκτυο πρόσβασης. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι δεν απαιτείται επιπρόσθετη σηματοδότηση σε χαμηλότερα επίπεδα για την παραμετροποίηση του QoS προφίλ των συσκευών, καθώς το δίκτυο αναλαμβάνει τη διαδικασία αυτή έπειτα από το αίτημα του M2M server που γίνεται στο επίπεδο εφαρμογής. Πολύ σημαντικό είναι και το γεγονός ότι κάθε πάροχος δικτύου μπορεί να ορίσει ειδικότερες κατηγορίες QCI ανάλογα με τις απαιτήσεις των δικτυακών του εφαρμογών. Αυτό μπορεί να δώσει στον πάροχο τη δυνατότητα να εκμεταλλευτεί το δίκτυο του ορίζοντας κατάλληλες κατηγορίες QCI για M2M εφαρμογές και να δημιουργήσει υπεραξία από αυτές.

QCI	GBR/Non GBR	Priority	Delay (ms)	Loss rate	Application
1	GBR	2	100	1e-2	VoIP
2	GBR	4	150	1e-3	Video Call
3	GBR	5	300	1e-6	Streaming

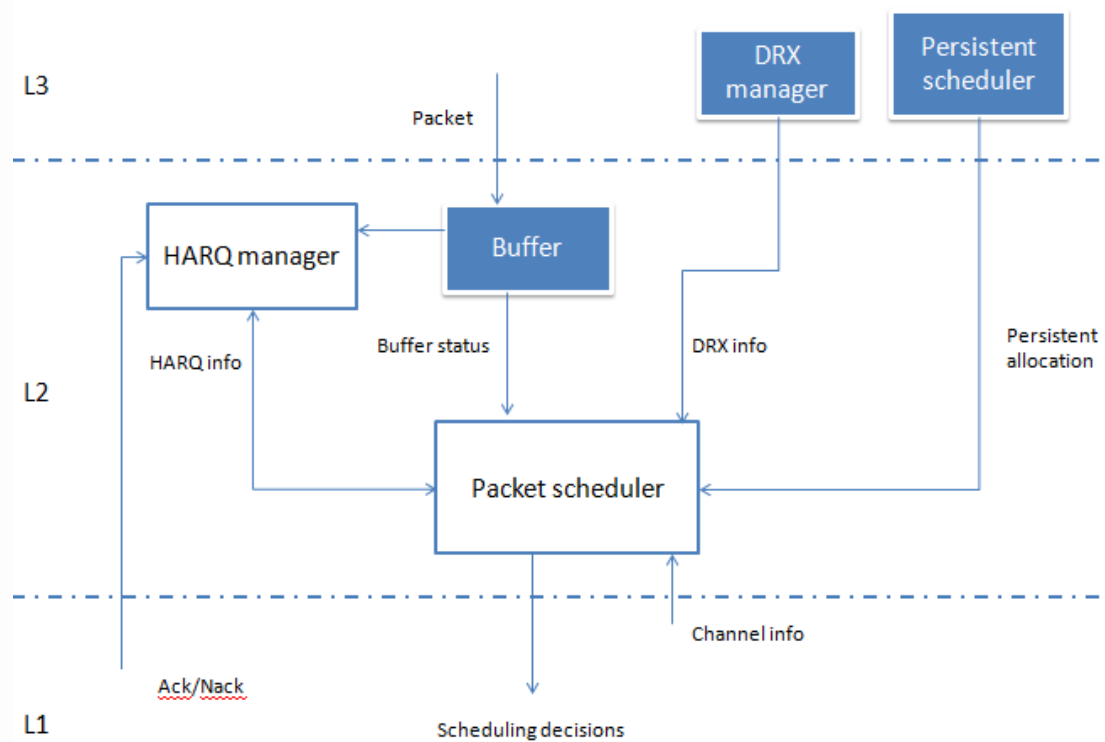
4	GBR	3	50	1e-3	Real time appl
5	Non-GBR	1	100	1e-6	IMS signaling
6	Non-GBR	7	100	1e-3	Interactive gaming
7	Non-GBR	6	300	1e-6	TCP: browsing, e-mail etc.
8	Non-GBR	8			
9	Non-GBR	9			

Πίνακας 15: QCI παράμετροι



Εικόνα 14: Μηχανισμοί υλοποίησης μοντέλου (α)

Στην συνέχεια η εξυπηρέτηση των MTC συσκευών, όσον αφορά την ανάθεση των πόρων που χρειάζονται, ώστε να εκπληρώνονται τα κριτήρια της επικοινωνίας M2M, αναλαμβάνεται από τους RRM μηχανισμούς που υλοποιούνται στον eNodeB. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι βασικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιεί η οντότητα του packet scheduler που υλοποιείται όπως φαίνεται στο σχήμα, χρησιμοποιούν διεργασίες του επιπέδου 3 (QoS διαχείριση, semi-persistent scheduling). Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξάνει την συνολική καθυστέρηση αλλά εξοικονομεί σημαντικό όγκο πόρων συχνότητας και μειώνει την απαιτούμενη σηματοδοσία. Ο packet scheduler αναθέτει πόρους για την εξυπηρέτηση κάθε bearer βασιζόμενος σε πολλούς παράγοντες. Για τα M2M type bearers, η ανάθεση πόρων βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στις πληροφορίες που παίρνει από μηχανισμούς DRX manager και persistent allocation manager του επιπέδου 3 που σχετίζονται τις αποφάσεις με το απαιτούμενο QoS κάθε bearer, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

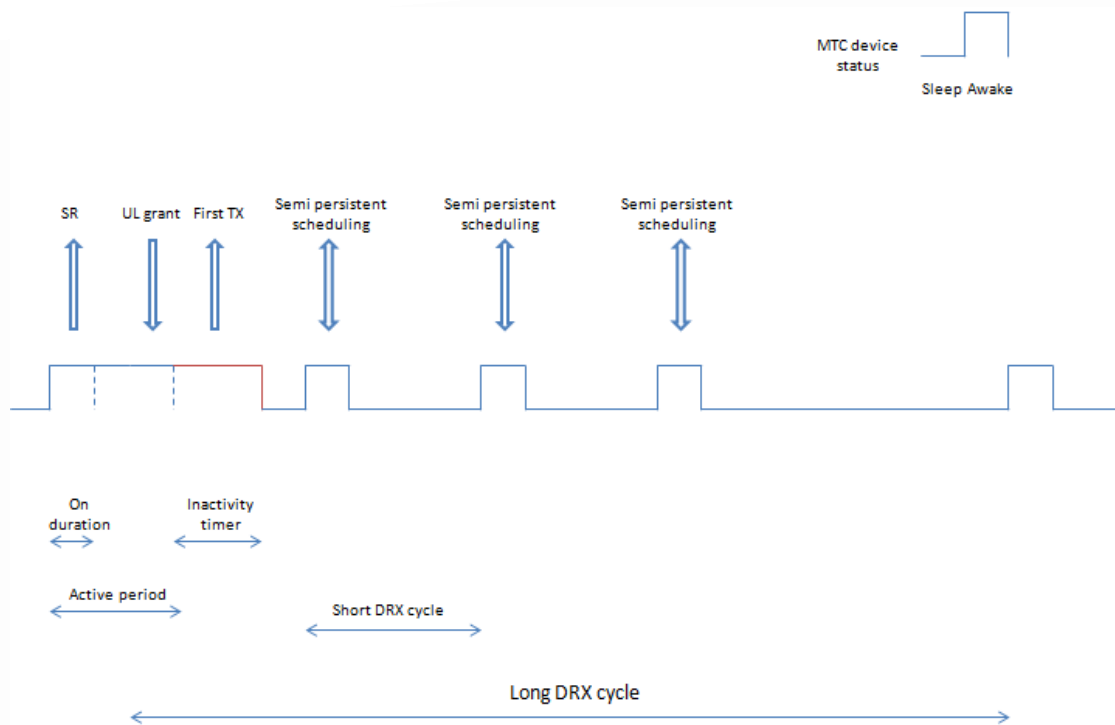


Εικόνα 15: Μηχανισμοί υλοποίησης μοντέλου (β)

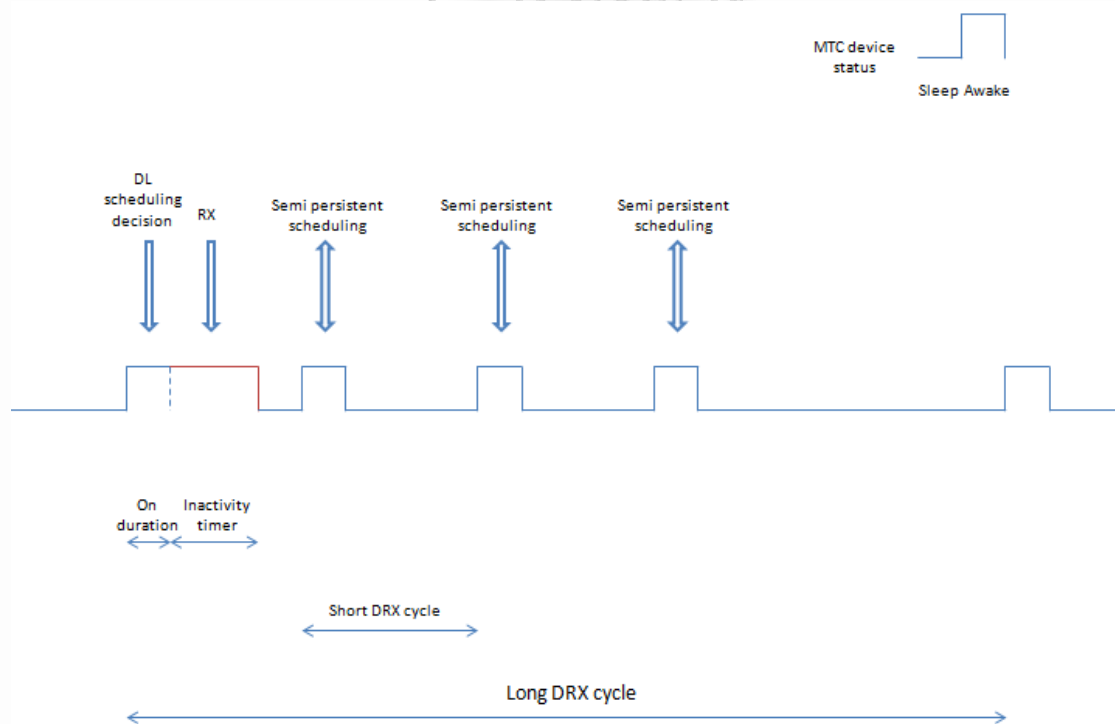
Για κάθε MTC συσκευή ενεργοποιείται ο μηχανισμός DRX και όταν δεν υπάρχει κίνηση δεδομένων το κύκλωμα δέκτη της συσκευής είναι απενεργοποιημένο, ώστε να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Στη περίπτωση που η συσκευή έχει δεδομένα στο buffer της προς αποστολή στον M2M server, ενεργοποιεί το κύκλωμα του πομπού και αποστέλλει ένα αίτημα προγραμματισμού (Scheduling Request - SR) στον eNodeB μέσω του PUCCH. Για την διαδικασία αποστολής SR είναι προτιμότερος ο μηχανισμός του αποκλειστικού αιτήματος προγραμματισμού (Dedicated Scheduling Request), σύμφωνα με τον οποίο σε κάθε συσκευή ανατίθενται παροδικά, κάθε n subframe, πόροι για την αποστολή ενός bit SR μέσω του PUCCH στον eNodeB. Στη συνέχεια εντός του active timer του μακρού DRX κύκλου αποστέλλεται στο PDCCH το uplink grant στην MTC συσκευή για να μπορέσει να ξεκινήσει την αποστολή δεδομένων. Σε FDD λειτουργία, που είναι και η προτεινόμενη για M2M επικοινωνία, η αποστολή δεδομένων μπορεί να ξεκινήσει από την MTC συσκευή μετά από 4 subframe από την λήψη του uplink grant [7]. Έτσι η ενεργή περίοδος της MTC συσκευής παρατείνεται κατά 4 ms ανεξάρτητα από την τιμή που έχει οριστεί ο inactivity timer, όταν έχει μεταδοθεί αίτημα προγραμματισμού. Η πρώτη μετάδοση γίνεται στο UL-SCH και μέσω των στοιχείων ελέγχου buffer status report και power headroom του MAC πεδίου των σταλμένων πακέτων, ο packet scheduler μπορεί να ενημερωθεί για το αν υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή από την συσκευή και αν η συσκευή χρειάζεται να αλλάξει τρόπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης των δεδομένων ώστε να μην καταναλώνει περιττή ενέργεια. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία άλλα και το QoS προφίλ της μετάδοσης, ο Packet scheduler μπορεί να:

- Διακόψει τη μετάδοση μόλις λήξει inactivity timer αν το buffer της συσκευής είναι άδειο και δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση στο uplink. Σε αυτήν την περίπτωση η επόμενη δυνατότητα μετάδοσης είναι στον επόμενο μακρύ DRX κύκλο.
- Εκκινήσει έναν βραχύ DRX κύκλο, που θα έχει παραμετροποιηθεί ανάλογα με το QoS προφίλ της μετάδοσης. Ταυτόχρονα θα ξεκινήσει και η ανάθεση πόρων με τη χρήση του μηχανισμού semi-persistent scheduling, ώστε να μειωθεί η σηματοδότηση που προκαλείται από τη δυναμική ανάθεση πόρων. Τα χρονικά χαρακτηριστικά του μηχανισμού semi-persistent scheduling σαφώς και θα πρέπει να συμπίπτουν με εκείνα του βραχέως DRX κύκλου και του QoS προφίλ της μετάδοσης.

Αντίστοιχα στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα προς λήψη από την συσκευή στο downlink, τότε εντός του on duration timer του μακρού DRX κύκλου μεταδίδεται στο PDCCH το downlink scheduling decision μαζί με τα πρώτα δεδομένα. Η MTC συσκευή συνεχίζει έπειτα να παρακολουθεί το PDCCH για ένα διάστημα ίσο με τον inactivity timer, ώστε να ολοκληρωθεί η λήψη των αρχικών δεδομένων. Στη συνέχεια ο packet scheduler έχοντας γνωστό το buffer status και του σταθμού βάσης αλλά και της συσκευής, είτε θα διακόψει τον inactivity timer και ο μακρύς DRX κύκλος θα συνεχιστεί κανονικά, είτε θα εκκινήσει έναν βραχύ DRX κύκλο ανάλογα με το QoS προφίλ του bearer. Ταυτόχρονα θα ενεργοποιηθεί και ο semi-persistent scheduling για την ανάθεση πόρων χρόνου συχνότητας εντός των ίδιων χρονικών πλαισίων του DRX κύκλου.



Εικόνα 17: Προτεινόμενος DRX μηχανισμός για το Uplink



Εικόνα 16: Προτεινόμενος DRX μηχανισμός για το Downlink

5.2. Παραμετροποίηση μηχανισμών 3GPP LTE για την υποστήριξη συγκεκριμένων M2M εφαρμογών

Από τις εφαρμογές που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.3 παρουσιάζονται ο αισθητήρας καπνού και ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας από τις εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας και ο αυτόματος πιλότος για την προσομοίωση εφαρμογών ευρείας κλίμακας. Στους υπολογισμούς δε λαμβάνονται υπόψη οι επανεκπομπές HARQ και επομένως και η DRX περίοδος επανεκπομπής.

5.2.1. Αισθητήρας καπνού

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρείται κίνηση για δύο τύπους δεδομένων μόνο στην ανερχόμενη ζεύξη : πληροφορία heartbeat μεγέθους 1 byte που αποστέλλεται κάθε 5 s και πληροφορία δεδομένων ύπαρξης καπνού που μπορεί να συμβεί οποιαδήποτε στιγμή. Όταν δηλαδή ο αισθητήρας ανιχνεύσει καπνό αρχίζει και μεταδίδει δεδομένα σε πακέτα 4 byte ανά 5 s, μέχρι να σταματήσει το αρχικό αίτιο πυροδότησης ή μέχρι τη στιγμή που έχει ρυθμιστεί να σταματήσει την αποστολή δεδομένων.

Θεωρώντας το εύρος ζώνης συστήματος ίσο με 20 MHz, ο συνολικός αριθμός των resource elements σε ένα μπλοκ είναι 168. Η επιλογή μικρότερου εύρους ζώνης, για παράδειγμα 5 MHz, δε συμφέρει από πλευράς αύξησης της σηματοδοσίας για την κατερχόμενη ζεύξη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Από αυτά τα 24 χρησιμοποιούνται για demodulation reference signals και τα υπόλοιπα 144 για τη μετάδοση πληροφορίας που έρχεται από το επίπεδο 3. Αν χρησιμοποιηθεί QPSK διαμόρφωση, κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε 2 bit, με αποτέλεσμα να μεταδίδονται λίγα αναλογικά bit πληροφορίας σε κάθε μπλοκ σε σχέση με την επιβάρυνση σηματοδοσίας. Για αυτόν το λόγο επιλέγεται διαμόρφωση 16-QAM, όπου κάθε στοιχείο αντιστοιχίζεται σε 4 bit. Η πραγματική πληροφορία που μεταδίδεται σε κάθε μπλοκ περιορίζεται από την εισαγόμενη επιβάρυνση των επιπέδων TCP/IP/MAC/PHY (144 bit). Η κωδικοποίηση καναλιού 1/3 δε λαμβάνεται υπόψη. Σε κάθε resource block το uplink μπορεί να μεταφέρει 432 bit (54 byte) πληροφορίας επιπέδου εφαρμογής. Επίσης στην ανερχόμενη ζεύξη μπορεί να ανατεθούν σε μια MTC συσκευή μόνο διαδοχικά μπλοκ στο πεδίο της συχνότητας σε κάθε subframe. Για τη μετάδοση του αρχικού αιτήματος προγραμματισμού απαιτείται ένα μόνο resource block στο PUCCH. Το μπλοκ αυτό μπορεί να συνυπάρχει με άλλα μπλοκ του PUSCH στο ίδιο subframe. Πολλές MTC συσκευές μπορεί να μεταδώσουν SR στο ίδιο resource block καθώς υπάρχει η δυνατότητα πολυπλεξίας στο PUCCH.

Με βάση τα παραπάνω και μη λαμβάνοντας υπόψη την κωδικοποίηση καναλιού είναι προφανές ότι και η πληροφορία heartbeat (1 byte) αλλά και η πληροφορία payload (4 byte) μπορούν να μεταδοθούν σε ένα resource block. Επομένως ο inactivity timer μπορεί να έχει τη διάρκεια ενός υπό-πλασίου (1 ms). Σύμφωνα με τα δεδομένα κίνησης είναι επίσης προφανές ότι ο DRX κύκλος σε RRC_CONNECTED κατάσταση πρέπει να τεθεί στη μέγιστη διάρκεια του, δηλαδή ίσος με 2.56 s. Με αυτόν τον τρόπο όποτε υπάρχει πληροφορία για heartbeat στο buffer της MTC συσκευής, στην επόμενη ενεργή περίοδο θα αποστέλλεται ένα SR. Καθώς υπάρχει εκκρεμής αίτηση προγραμματισμού η ενεργής περίοδος παρατείνεται μέχρι να ληφθεί το uplink grant (n ms). Μετά τη λήψη του uplink grant απαιτούνται 4 subframe μέχρι να εκκινήσει η συσκευή τη μετάδοση [7]. Άρα απαιτείται η

ρύθμιση ενός inactivity timer τουλάχιστον 5 ms. Η συνολική μέγιστη καθυστέρηση από τη στιγμή που βρίσκεται στο buffer της συσκευής μέχρι την αποστολή του heartbeat είναι $2,565s + n \text{ ms}$. Όταν ο αισθητήρας ανιχνεύσει καπνό θα μεταδίδει ένα πακέτο των 4 byte κάθε 5 s. Επομένως δεν χρειάζεται η ρύθμιση βραχέως DRX κύκλου, αλλά η πληροφορία θα μεταδίδεται εντός του μακρού DRX κύκλου των 2.56 ms εντός ενός resource block με μέγιστη καθυστέρηση $2.565s + n \text{ ms}$.

Παράμετροι αισθητήρα καπνού

DRX μακρύς κύκλος	2.56 s
On duration timer	1 ms
Inactivity timer	5 ms
DRX βραχύς κύκλος	-
Περίοδος βραχέως DRX	-
Διαμόρφωση	16-QAM
Bits/RB	432
RB's/Heartbeat packet	1
RB's/Payload packet	1

Πίνακας 16: Παράμετροι αισθητήρα καπνού

5.2.2. Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο εφαρμογή του μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας αφορά την αποστολή δεδομένων στην ανερχόμενη ζεύξη από μια MTC συσκευή που μετρά την κατανάλωση ενέργειας στον μετρητή του πελάτη και μεταδίδει τις μετρήσεις στον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Η συσκευή μεταδίδει 1 byte πληροφορίας heartbeat κάθε 27 min (1666,6 s), ενώ μεταδίδει πακέτα των 100 byte, που περιέχουν τις μετρήσεις ενέργειας, κάθε 10 min (600 s).

Όπως και στον αισθητήρα καπνού, έτσι και εδώ, παρατηρείται ότι η ανάγκη μετάδοσης δεδομένων είναι πολύ λιγότερο συχνή από τη μικρότερη συχνότητα του μακρού DRX κύκλου. Αναγκαστικά λοιπόν τίθεται σε λειτουργία μόνον ο μακρύς DRX κύκλος με τη μέγιστη περίοδο του (2.56 s). Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα το αίτημα προγραμματισμού μεταδίδεται σε ένα μόνο resource block διάρκειας 1 ms στο PUCCH. Αν χρησιμοποιηθεί εύρος ζώνης συστήματος 20 MHz, 16-QAM διαμόρφωση, χωρίς κωδικοποίηση, 144 bit εισαγόμενη επιβάρυνση των επιπέδων TCP/IP/MAC/PHY, τότε σε κάθε resource block μπορεί να μεταδοθούν 432 bit πληροφορίας επιπέδου εφαρμογής. Συνεπώς, αν θεωρηθεί πάλι on duration timer ίσος με 1 ms, η πληροφορία του heartbeat μεταδίδεται σε ένα μόνο resource block, ενώ τη μετάδοση του πακέτου των 100 byte απαιτεί 2 resource block. Μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτά τα δύο resource block που απαιτούνται για τη μετάδοση της πληροφορίας θα ανατεθούν στη συσκευή στο ίδιο subframe και θα είναι διαδοχικά στο πεδίο της συχνότητας, καθώς πρόκειται για uplink μετάδοση. Με αυτόν τον τρόπο όποτε υπάρχει πληροφορία για heartbeat στο buffer της

MTC συσκευής (κάθε 27 min), στην επόμενη ενεργή περίοδο θα αποστέλλεται ένα SR. Καθώς υπάρχει εκκρεμής αίτηση προγραμματισμού η ενεργής περιόδος παρατείνεται μέχρι να ληφθεί το uplink grant (n ms). Μετά τη λήψη του uplink grant απαιτούνται 4 subframe μέχρι να εκκινήσει η συσκευή τη μετάδοση [7]. Άρα απαιτείται η ρύθμιση ενός inactivity timer τουλάχιστον 5 ms. Η συνολική μέγιστη καθυστέρηση μέχρι την αποστολή του heartbeat είναι $2,565s + n \text{ ms}$. Όποτε ο αισθητήρας έχει δεδομένα μετρήσεων προς μετάδοση θα μεταδίδει ένα πακέτο των 100 byte, καταλαμβάνοντας 2 resource block εντός ενός subframe, κάθε 10 min. Επομένως δεν χρειάζεται η ρύθμιση βραχέως DRX κύκλου, αλλά η πληροφορία θα μεταδίδεται εντός του μακρού DRX κύκλου των 2.56 ms εντός ενός resource block με μέγιστη καθυστέρηση $2.565s + n \text{ ms}$.

DRX παράμετροι μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας

DRX μακρύς κύκλος	2.56 s
On duration timer	1 ms
Inactivity timer	5 ms
DRX βραχύς κύκλος	-
Ενεργή περίοδος βραχέως DRX	-
Διαμόρφωση	16-QAM
Bits/RB	432
RB's/Heartbeat packet	1
RB's/Payload packet	2

Πίνακας 17: DRX παράμετροι μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας

5.2.3. Αυτόματος πιλότος

Στην εφαρμογή αυτή θεωρείται ότι μεταδίδονται δεδομένα στο uplink και στο downlink. Η πληροφορία heartbeat μεταδίδεται στην ανερχόμενη ζεύξη κάθε 100 ms με πακέτα των 160 byte [24] κατά μέσο όρο. Όταν συμβεί κάποιο έκτακτο γεγονός, αρχίζει η μετάδοση πακέτων των 1000 byte από την MTC συσκευή στο σταθμό βάσης ανά 10 ms. Στην κατερχόμενη ζεύξη από το κέντρο ελέγχου προς τις MTC συσκευές του δικτύου τα keep alive μηνύματα έχουν μέγεθος 1 Kbyte και συχνότητα μετάδοσης 1 πακέτο ανά 1 s. Όταν συμβεί κάποιο έκτακτο γεγονός απαιτείται η μετάδοση ενός πακέτου 1-2 Kbyte ανά 10 ms.

Αρχικά υπολογίζονται οι απαιτήσεις σε resource block για τη μετάδοση της πληροφορίας και στις δύο ζεύξεις, όποτε ξυπνούν οι συσκευές. Αν χρησιμοποιηθεί εύρος ζώνης συστήματος 20 MHz, 16-QAM διαμόρφωση, 144 bit εισαγόμενη επιβάρυνση των επιπέδων TCP/IP/MAC/PHY, τότε σε κάθε resource block μπορεί να μεταδοθούν 432 bit πληροφορίας επιπέδου εφαρμογής στο uplink και 360 bit στο downlink. Συνεπώς για την ανερχόμενη ζεύξη η πληροφορία heartbeat (160 byte) απαιτεί 3 resource block ενώ η πληροφορία payload (1 Kbyte) απαιτεί 19 resource block. Στην κατερχόμενη ζεύξη η πληροφορία

heartbeat (1000 Kbyte) απαιτεί 23 resource block ενώ η πληροφορία payload (max 2000 Kbyte) απαιτεί 45 resource block.

Χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης των 20 MHz σε FDD λειτουργία σε κάθε subframe είναι διαθέσιμα 100 resource block σε κάθε κατεύθυνση. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι αν υπάρχει στην περιοχή του κελιού μια μόνο MTC συσκευή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά μετάδοσης, αυτή θα μπορεί να εξυπηρετηθεί με ανάθεση resource block εντός ενός subframe, όποτε ξυπνάει. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον μηχανισμό μειώνεται η καθυστέρηση καθώς δεν απαιτείται αύξηση της διάρκειας του inactivity timer αλλά δημιουργείται πρόβλημα στην περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός MTC συσκευών εντός του ίδιου κελιού. Η παράμετρος αυτή θα αναλυθεί παρακάτω, καθώς στο συγκεκριμένο παράδειγμα θεωρείται μία μόνο MTC συσκευή με τα παραπάνω χαρακτηριστικά κίνησης και επιδιώκεται η ελάχιστη καθυστέρηση. Ορίζεται μακρύς DRX κύκλος διάρκειας 100 ms. Η δέκατη επανάληψη του μακρού DRX κύκλου με βάση το uplink συμπίπτει με τη στιγμή που πρέπει να ξυπνήσει η συσκευή για να λάβει το μήνυμα keep alive από το σταθμό eNodeB, έτσι ώστε να μη χρειάζεται η συσκευή να ξυπνά δύο φορές σε κοντινά χρονικά διαστήματα. Ο on duration timer ορίζεται στο 1 ms. Εντός αυτής στο uplink μεταδίδει το SR, η ενεργή περίοδος παρατείνεται κατά n ms μέχρι να ληφθεί το uplink grant και έπειτα από 4 ms μεταδίδει το uplink heartbeat σε τρία διαδοχικά resource block. Για να συμβεί αυτό απαιτείται η ρύθμιση του inactivity timer στα 5 ms. Στο downlink κάθε 1 s η MTC συσκευή, καθώς είναι ήδη ξύπνια λόγω του μακρού DRX κύκλου στο uplink, παρακολουθεί το PDCCH κανάλι και ο σταθμός eNodeB μεταδίδει το downlink heartbeat εντός του ίδιου subframe με το scheduling assignment χρησιμοποιώντας 19 resource blocks.

Όταν συμβεί κάποιο έκτακτο γεγονός είτε στην ανερχόμενη είτε στην κατερχόμενη ζεύξη, εκκινεί ο βραχύς DRX κύκλος διάρκειας 10 ms καθώς η συχνότητα μετάδοσης μηνυμάτων είναι 100 Hz και για τις δύο κατευθύνσεις. Στην περίπτωση που η επικοινωνία θα ξεκινήσει από την MTC συσκευή λόγω ύπαρξης δεδομένων στο buffer της, τότε η συσκευή θα μεταδώσει στο uplink το SR, η ενεργή περίοδος παρατείνεται κατά n ms μέχρι να ληφθεί το uplink grant, το οποίο λαμβάνεται από της συσκευή στο PDCCH μαζί με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του semi-persistent scheduling (C-RNTI semi-persistent scheduling). Η περιοδικότητα του semi-persistent scheduling, δηλαδή 10 subframe, έχει καθοριστεί εκ των προτέρων μεταξύ MTC συσκευής και σταθμού βάσης eNodeB με τη χρήση RRC σηματοδότησης. Στην περίπτωση που η έκτακτη επικοινωνία ξεκινήσει από το σταθμό eNodeB, λόγω μετάδοσης δεδομένων από το κέντρο ελέγχου, τότε η MTC συσκευή παρακολουθώντας το PDCCH εντός του μακρού DRX κύκλου θα λάβει την απόφαση προγραμματισμού από τον σταθμό eNodeB για την εκκίνηση του βραχέως DRX κύκλου μαζί με τα χαρακτηριστικά του semi-persistent scheduling μηχανισμού (10 subframe). Αυτό θα συμβεί εντός 1 ms που διαρκεί ο on duration timer του μακρού DRX κύκλου. Στη συνέχεια και στις δύο περιπτώσεις η συσκευή θα ξυπνά κάθε 10 ms για να μεταδώσει δεδομένα σε 19 διαδοχικά resource block στο uplink και σε 45 resource block στο downlink, εντός ενός subframe.

DRX παράμετροι αυτόματου πιλότου

DRX μακρύς κύκλος	100 ms
On duration timer	1 ms
Inactivity timer	-
DRX βραχύς κύκλος	10 ms
Ενεργή περίοδος βραχέως DRX	1 ms
Διαμόρφωση	16-QAM
Bits/RB _{UL}	432
RB's/Heartbeat packet _{UL}	3
RB's/Payload packet _{UL}	19
Bits/RB _{DL}	360
RB's/Heartbeat packet _{DL}	23
RB's/Payload packet _{DL}	45

Πίνακας 18: DRX παράμετροι αυτόματου πιλότου

5.2.4. Συμπεράσματα και υπολογισμός των παραμέτρων packet loss/channel utilization για χρήση απλού DRX κύκλου

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι το μοντέλο του αυτόματου πιλότου ταιριάζει πολύ καλύτερα στο μηχανισμό DRX του 3GPP LTE σε RRC_CONNECTED κατάσταση συσκευής. Δηλαδή για τις M2M εφαρμογές περιορισμένης εμβέλειας με μικρό αριθμό συσκευών και πολύ μικρή συχνότητα μετάδοσης δεδομένων η εφαρμογή του DRX μηχανισμού δεν είναι αποδοτική. Ο κυριότερος λόγος είναι η μέγιστη τιμή της διάρκειας του μακρού DRX κύκλου, που δεν υπερβαίνει τα 2.56 s. Στις περιπτώσεις όμως του μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας και αισθητήρα καπνού, η συσκευή υπό κανονικές συνθήκες απαιτείται να μεταδίδει/λαμβάνει δεδομένα σε πολύ πιο αραιά διαστήματα, της κλίμακας λεπτών. Ακόμη και σε περιπτώσεις έκτακτων συμβάντων, όπως ο αισθητήρας καπνού, η περίοδος μετάδοσης διαδοχικών πακέτων είναι σχεδόν διπλάσια από τον μέγιστο μακρύ DRX κύκλο. Το αποτέλεσμα είναι οι MTC συσκευές να ενεργοποιούνται και να παρακολουθούν το PDCCH κανάλι πολύ πιο συχνά από όσο χρειάζεται και να καταναλώνουν άσκοπα ενέργεια.

Επίσης σε περιπτώσεις που το μέγεθος πακέτου προς αποστολή/λήψη είναι της τάξης του ενός byte, όπως στις περιπτώσεις heartbeat και keep alive μηνυμάτων, η επιβάρυνση επιφόρτου είναι ποσοστιαία πολύ μεγάλη και δεν δικαιολογείται για τόσο μικρό όγκο μετάδοσης δεδομένων. Για παράδειγμα στην περίπτωση του αισθητήρα καπνού για τη μετάδοση 8 bit δεδομένων heartbeat στην ανερχόμενη ζεύξη σε ένα resource block απαιτούνται 144 bit σηματοδοσίας επιπέδων TCP/IP/MAC/PHY ενώ τα υπόλοιπα 424 bit

του μπλοκ μένουν ανεκμετάλλευτα. Αρχικά βέβαια το resource block έχει επιβαρυνθεί και με σηματοδοσία SRS ίση με 14%.

Η προσθήκη ενός μηχανισμού που θα μπορούσε να περιπλέξει δεδομένα πολλών M2M συσκευών μιας συγκριμένης εφαρμογής σε ένα resource block, ώστε να είναι δυνατή η μέγιστη εκμετάλλευση της σηματοδοσίας αλλά και των διαθέσιμων πόρων σε κάθε μπλοκ, αποτελεί ένα εφικτό στόχο ώστε να μπορέσει το πρότυπο 3GPP LTE να υποστηρίξει M2M εφαρμογές όλων των ειδών.

Βέβαια το πρότυπο 3GPP LTE παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του DRX κύκλου σε RRC_IDLE κατάσταση της συσκευής. Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει τον ορισμό πολύ μεγαλύτερων DRX κύκλων, έτσι ώστε η συσκευή να μη ξυπνά όταν δεν χρειάζεται. Πρέπει βέβαια να μελετηθεί κατά πόσο μπορεί αυτός ο μηχανισμός να προσφέρει τα κατάλληλα αποτελέσματα όσον αφορά και την καθυστέρηση όταν συμβεί κάποιο έκτακτο γεγονός, όπως η ανίχνευση καπνού από ένα αισθητήρα. Επίσης στον μηχανισμό αυτό, καθώς κατά τη διάρκεια των DRX κύκλων οι συσκευές είναι σε RRC_IDLE κατάσταση, όταν ξυπνούν χρησιμοποιούν το PRACH κανάλι για πρόσβαση στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει πως τα προβλήματα συνωστισμού του PRACH, όπως έχουν αναφερθεί παραπάνω, πρέπει να μελετηθούν, αν και σε σχέση με το πώς ορίστηκαν οι M2M εφαρμογές περιορισμένης εμβέλειας στην εργασία αυτή, δηλαδή με μικρό αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, φαίνεται ότι δεν θα υπάρχει σχετικό πρόβλημα.

Αντίθετα με τα παραπάνω, για τις M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας, που αναπαρίστανται με το μοντέλο του αυτόματου πιλότου, ο DRX μηχανισμός μπορεί να παραμετροποιηθεί με τέτοιο τρόπο που να ταιριάζει απόλυτα στις απαιτήσεις των εφαρμογών αυτών. Δηλαδή ο βραχύς και ο μακρύς DRX κύκλος μπορούν να παραμετροποιηθούν ακριβώς ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις επικοινωνίας της εφαρμογής και η κάθε συσκευή να ξυπνά μόνο όταν έχει δεδομένα προς μετάδοση, εξασφαλίζοντας έτσι το καλύτερο ισοζύγιο κατανάλωσης ενέργειας-καθυστέρησης. Επίσης η εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων σε κάθε μπλοκ είναι πολύ καλύτερη καθώς τα πακέτα μετάδοσης είναι αρκετά μεγαλύτερα, εξασφαλίζοντας έτσι ότι και το ποσοστό επιφόρτου σηματοδοσίας προς δεδομένα μετάδοσης είναι ανεκτό. Το πρόβλημα του συνωστισμού του PDDCH όταν μεγάλος αριθμός MTC συσκευών βρίσκεται στο ίδιο κελί αναλύεται παρακάτω, όπου προτείνεται και μια αποδοτική λύση.

Packet loss και channel utilization σε σχέση με το χρόνο ζωής πακέτου

Η μέχρι τώρα ανάλυση δείχνει ότι ο RRC_CONNECTED DRX μηχανισμός που ορίζει το πρότυπο 3GPP LTE μπορεί να εξυπηρετήσει εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστη κίνηση δεδομένων σε αραιά χρονικά διαστήματα (όπως αντιπροσωπεύτηκαν παραπάνω από τα μοντέλα του μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας και του αισθητήρα καπνού), αλλά δεν το κάνει με τον βέλτιστο τρόπο όσον αφορά την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής και του overhead που επιβαρύνει το φορτίο στο δίκτυο για ελάχιστη κίνηση δεδομένων. Αντίθετα φαίνεται ότι ο μηχανισμός ανταποκρίνεται καλύτερα για μεγαλύτερο αριθμό συσκευών που μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα μεγαλύτερου όγκου σε πιο πυκνά χρονικά διαστήματα (της τάξης των ms). Το μοντέλο του αυτόματου πιλότου είναι αυτό που αντιπροσωπεύει αυτές τις εφαρμογές.

Σε κάθε περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί ότι η μετάδοση της heartbeat πληροφορίας μερικών resource block σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, παράμετροι εκ των προτέρων γνωστοί, για πακέτα με γνωστές QoS απαιτήσεις και συγκεκριμένο χρόνο ζωής μπορεί εύκολα να οργανωθεί από τον packet scheduler με κατάλληλο τρόπο ώστε οι συσκευές να εξυπηρετούνται εντός DRX κύκλου χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερο packet loss. Όσο όμως ο αριθμός των προς εξυπηρέτηση MTC συσκευών μιας εφαρμογής αυξάνεται, η διάρκεια του DRX κύκλου μειώνεται και αντίστοιχα τα μεγέθη των πακέτων είναι μεγαλύτερα και με διαφορετικούς χρόνους ζωής, τότε εγείρεται το ερώτημα κατά πόσον μπορεί ο DRX μηχανισμός να εξυπηρετήσει τις ανάγκες αυτές χωρίς μεγάλο packet loss αφήνοντας βέβαια και resources, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από άλλες non M2M υπηρεσίες του δικτύου.

Για λόγους απλούστευσης και να είναι δυνατή η προσομοίωση, η συγκεκριμένη κατάσταση εξομοιώνεται με το μοντέλο του αυτόματου πιλότου για την μετάδοση δεδομένων payload στο downlink σε περίπτωση έκτακτου γεγονότος. Υπενθυμίζονται τα δεδομένα του μοντέλου για την κατάσταση αυτή:

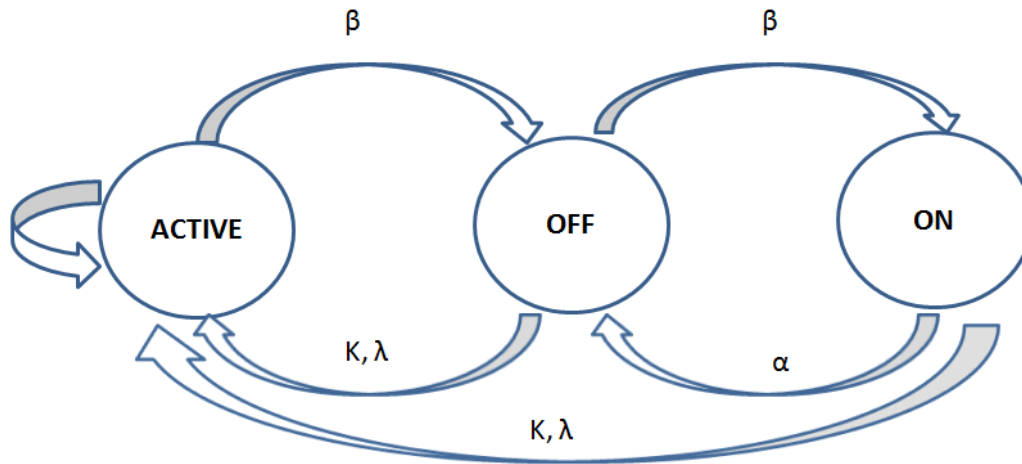
Είδος ζεύξης	Αριθμός συσκευών N	$P_{payload}$ (bytes)	$F_{heartbeat}$	$F_{sequence}$
Κατερχόμενη	50	1-2 Kbyte	-	100 Hz

Πίνακας 19: Δεδομένα αυτόματου πιλότου για κατάσταση έκτακτης ανάγκης

Σε κάθε περίπτωση ορίζεται DRX κύκλος 10 ms, χωρίς τη χρήση inactivity timer, ο οποίος αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών. Η παράμετρος on duration ορίζεται στο 1 ms. Κάθε συσκευή δηλαδή ενεργοποιείται για 1 ms, μεταδίδει ένα πακέτο των 2 Kbytes εντός ενός subframe, πέφτει σε κατάσταση ύπνου για 10 ms και έπειτα ενεργοποιείται πάλι για το επόμενο 1 ms. Αν ολόκληρο το πακέτο των 2 Kbytes δε χωράει στα ελεύθερα resource blocks του subframe, τότε ο σταθμός βάσης θα προσπαθήσει να μεταδώσει το πακέτο στο επόμενο on duration μετά την παρέλευση του DRX κύκλου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να τελειώσουν τα πακέτα που υπάρχουν στο buffer του σταθμού βάσης προς την συγκεκριμένη συσκευή. Κάθε πακέτο βέβαια έχει και έναν συγκεκριμένο χρόνο ζωής, εντός του οποίου πρέπει να εξυπηρετηθεί, διαφορετικά χάνεται. Η εξυπηρέτηση των χρηστών γίνεται με βάση μόνο το χρόνο άφιξης του πρώτου πακέτου προς μια συσκευή. Δηλαδή εξυπηρετείται με προτεραιότητα αυτός που ζητάει πρώτος πόρους. Η μετάδοση θα είναι ντετερμινιστική από το σημείο αυτό και έπειτα, καθώς ο σταθμός βάσης γνωρίζει τον αριθμό των πακέτων προς μετάδοση και μπορεί να υπολογίσει σε ποια subframes θα δεσμεύσει πόρους για τη μετάδοση τους. Θεωρείται επίσης ότι οι συσκευές της συγκεκριμένης εφαρμογής ανταγωνίζονται μόνο μεταξύ τους για τη δέσμευση των πόρων και οι εναπομείναντες διατίθενται δυναμικά στους υπόλοιπους χρήστες άλλων υπηρεσιών του κελιού. Είναι προφανές ότι η παραπάνω υλοποίηση του μηχανισμού ευνοεί τις συσκευές για τις οποίες υπάρχουν πακέτα προς μετάδοση νωρίτερα από τις υπόλοιπες. Επίσης δε λαμβάνει υπόψη στην κατανομή των πόρων το χρόνο ζωής των πακέτων με αποτέλεσμα για μεγάλο αριθμό συσκευών με πολύ μικρό χρόνο ζωής πακέτων να χάνεται μεγάλος αριθμός πακέτων. Στην περίπτωση αυτή βέβαια δε θα μπορούσε να

χρησιμοποιηθεί ο μηχανισμός DRX γενικά, οπότε δεν θεωρείται ότι επηρεάζει έντονα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το μοντέλο κατάστασης των MTC συσκευών μπορεί να απεικονιστεί με το μοντέλο OFF-ACTIVE-ON:



Εικόνα 18: Μοντέλο καταστάσεων

Η μετάβαση από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται τυχαία, καθώς οι συσκευές ενεργοποιούνται για τη λήψη δεδομένων με βάση μια ομοιόμορφη κατανομή εντός του αρχικού χρονικού διαστήματος της προσομοίωσης. Στη συνέχεια η συσκευή μεταβαίνει ντετερμινιστικά στην ACTIVE κατάσταση και εναλλάσσεται μεταξύ των καταστάσεων ACTIVE-OFF και πάλι ντετερμινιστικά καθώς ο DRX κύκλος είναι εξ' αρχής ορισμένος και σταθερός.

Ο αριθμός των πακέτων που φθάνουν στο σταθμό βάσης για μετάδοση σε κάθε MTC συσκευή είναι ένα ακέραιος αριθμός μεταξύ 1 και 10 με την κατανομή της πιθανότητας να αντιστοιχίζεται ενός από αυτούς τους αριθμούς σε μια συσκευή να είναι και πάλι ομοιόμορφη. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η απώλεια πακέτων και αξιοποίησης των πόρων του καναλιού δεν εξαρτάται από μια αρχική ντετερμινιστική ανάθεση συγκεκριμένου αριθμού πακέτων σε κάθε συσκευή.

Για τον ίδιο λόγο τυχαίος με ομοιόμορφη κατανομή είναι και ο χρόνος ζωής των πακέτων κάθε συσκευής. Από τη στιγμή που υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός πακέτων, όπως ορίστηκε προηγουμένως, στο buffer του σταθμού βάσης για μια συσκευή, ξεκινά και μετρά ο χρόνος ζωής των πακέτων που προορίζονται για αυτή τη συσκευή. Αν το πακέτο δε δύναται να προγραμματιστεί για μετάδοση εντός του χρόνου ζωής του, τότε θεωρείται χαμένο.

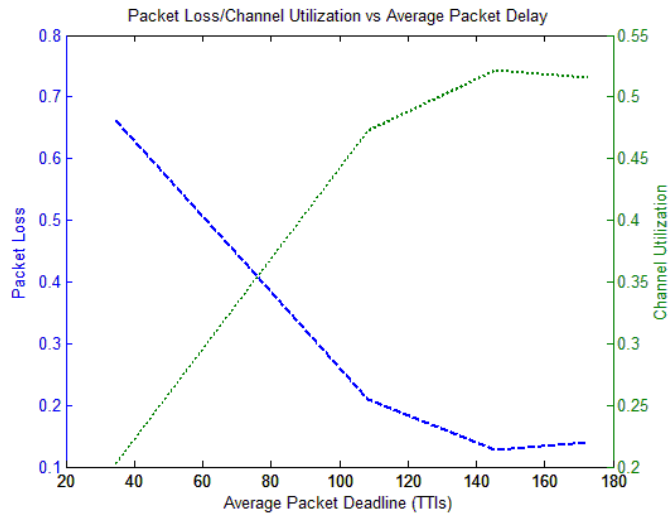
Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για αυξανόμενο χρόνο ζωής των πακέτων, ώστε να φανεί αν μπορεί αυτή η απλή υλοποίηση του DRX μηχανισμού μπορεί να πλησιάσει χαμηλές τιμές packet loss και για ποιο ποσοστό αξιοποίησης των πόρων του καναλιού. Τελικά επιστρέφεται σε κάθε διάγραμμα η μέση τιμή του packet loss και του channel utilization όλων των συσκευών της εφαρμογής για μια μέση τιμή χρόνου ζωής πακέτου, η οποία είναι αυξανόμενη. Καθώς κάθε πακέτο στην ουσία είναι ένας αριθμός resource

blocks, η μέση τιμή του packet loss ορίζεται ως ο λόγος των resource blocks που χάθηκαν λόγω της απώλειας ενός πακέτου προς τον συνολικό αριθμό των resource blocks εντός του χρονικού διαστήματος της προσομοίωσης. Το channel utilization ορίζεται ως ο λόγος των resource blocks του εύρους ζώνης που ανατέθηκαν σε κάποια συσκευή προς τα συνολικά resource blocks εντός του χρονικού διαστήματος της προσομοίωσης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα του μοντέλου και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

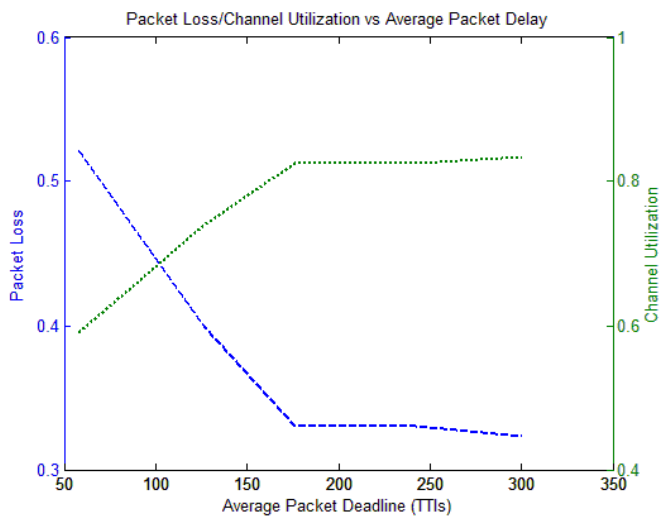
Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης

Εύρος ζώνης συστήματος	100, 75, 50 MHz
Διαμόρφωση	16-QAM
Είδος ζεύξης	Downlink
Μέγεθος πακέτου	2 Kbytes
Πακέτα/συσκευή	Τυχαίος $N \in [1,10]$
Χρόνος ζωής πακέτου	Τυχαίος (ομοιόμορφη κατανομή)
RBs/πακέτο	45
Αριθμός συσκευών	50
DRX κύκλος	10 ms
On duration	1 ms
Simulation time	200, 250 ms
Average packet loss	$\frac{RBs \text{ που χάθηκαν}}{\text{Συνολικά RBs}} \in (0,1)$
Average channel utilization	$\frac{RBs \text{ που ανατέθηκαν σε συσκευές}}{\text{Συνολικά RBs προσομοίωσης}} \in (0,1)$

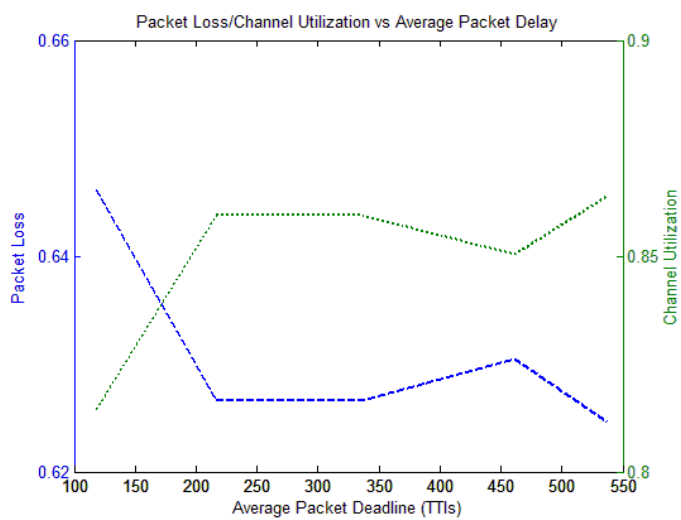
Πίνακας 20: Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης



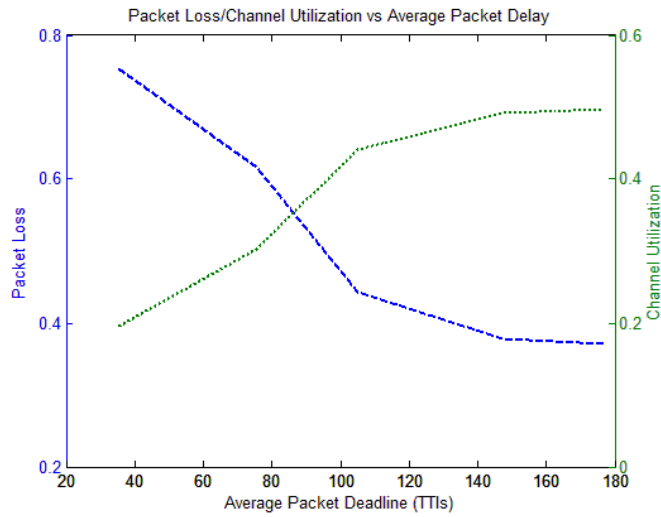
Εικόνα 19: System BW 20 MHz-50 MTC συσκευές



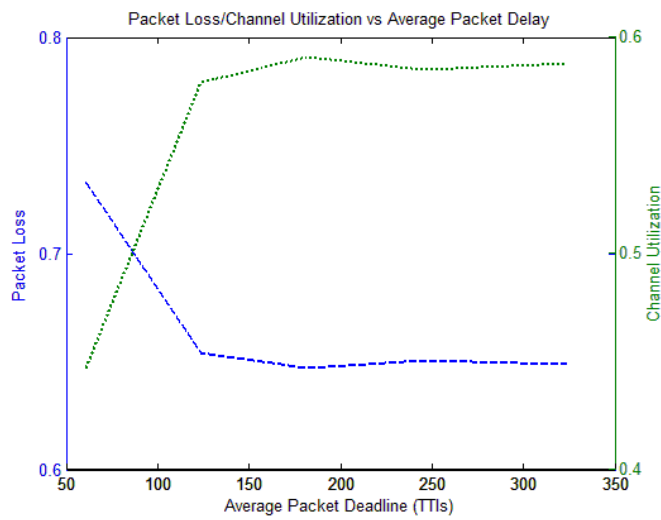
Εικόνα 20: System BW 20 MHz-100 MTC συσκευές



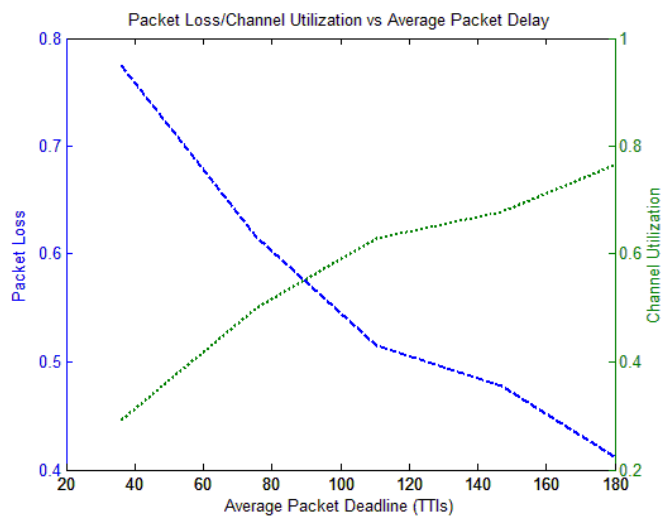
Εικόνα 21: System BW 20 MHz-200 MTC συσκευές



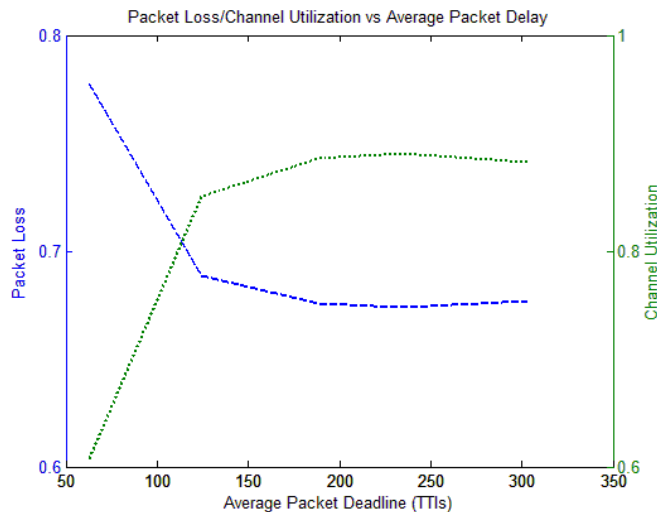
Εικόνα 22: System BW 15 MHz-50 MTC συσκευές



Εικόνα 23: System BW 15 MHz-100 MTC συσκευές



Εικόνα 24: System BW 10 MHz-50 MTC συσκευές



Εικόνα 25: System BW 10 MHz-100 MTC συσκευές

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση συγκεντρώνονται παρακάτω:

- Θεωρώντας το μέγιστο δυνατό εύρος ζώνης συστήματος (20 MHz), packet loss της τάξης του 0,1 μπορεί να επιτευχθεί για ένα channel utilization γύρω στο 0,5. Οι τιμές αυτές επιτυγχάνονται για ένα μέσο χρόνο ζωής πακέτου της εφαρμογής γύρω στα 140 ms. Δηλαδή με τη χρήση του μέγιστου εύρους ζώνης συστήματος και για ένα μεσαίου μεγέθους αριθμό MTC συσκευών που ενεργοποιούνται σε πολύ κοντινά χρονικά διαστήματα, ο απλός DRX μηχανισμός μπορεί να δώσει ένα packet loss της τάξης του 10% καταλαμβάνοντας τους μισούς πόρους του συστήματος για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, χωρίς όμως να προκαλεί φαινόμενα bottleneck
- Packet loss 10% γενικά δε θεωρείται αποδεκτό ούτε για VoIP εφαρμογές αλλά στη συγκεκριμένη προσομοίωση δε λαμβάνονται υπόψη άλλοι μηχανισμοί παραπάνω επιπέδων που θα μπορούσαν να μειώσουν το packet loss, ενώ η χρήση ακόμη και του inactivity timer θα μπορούσε να μειώσει κατά πολύ το ποσοστό του packet loss, σε βάρος βέβαια της ενεργειακής απόδοσης των συσκευών και της πιθανότητας φαινομένων bottleneck. Η προσομοίωση επίσης δίνει προτεραιότητα στη συσκευή που ζητά πρώτη πόρους. Ένας αλγόριθμος που θα λάμβανε υπόψη και το χρόνο ζωής των πακέτων θα έδινε πολύ καλύτερα αποτελέσματα για το packet loss ακόμη και για μικρούς χρόνους ζωής πακέτων
- Είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των MTC συσκευών που ζητούν προγραμματισμό σε κοντινά χρονικά διαστήματα, τόσο αυξάνεται το packet loss, φθάνοντας και σε τιμές πάνω από 50% ακόμη και για μεγάλες τιμές χρόνου ζωής πακέτων. Η χρησιμοποίηση μηχανισμών όπως ο inactivity timer και η ανάπτυξη αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη το χρόνο ζωής των πακέτων είναι κάτι παραπάνω από απαραίτητη όσο ο αριθμός των MTC συσκευών που πρέπει να εξυπηρετηθούν σε κοντινά χρονικά διαστήματα αυξάνεται
- Όσο μειώνεται το εύρος ζώνης συστήματος τόσο ο DRX μηχανισμός καταναλώνει περισσότερους πόρους, οδηγώντας σε φαινόμενα bottleneck για μεγάλο αριθμό συσκευών. Εδώ καταδεικνύεται η ανάγκη χρησιμοποίησης του μέγιστου εύρους

ζώνης συστήματος από παρόχους σε περιοχές με εγκατεστημένες M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι ακόμη και ο συγκεκριμένος απλός DRX αλγόριθμος, που δεν χρησιμοποιεί inactivity timer αλλά ούτε κατανέμει τους πόρους ανάλογα με το packet deadline και μεταδίδει όλα τα RBs ενός πακέτου συνεχόμενα σε ένα subframe, μπορεί υπό συνθήκες να δώσει ανεκτά αποτελέσματα για M2M εφαρμογές με ελαστικό packet deadline (της τάξης των 140-160 ms). Βέβαια πρέπει χρησιμοποιηθεί το μέγιστο εύρος ζώνης συστήματος (100 MHz) για επιτευχθεί packet loss της τάξης του 10% και αφήνοντας πόρους αρκετούς για τις υπόλοιπες non-M2M εφαρμογές. Πρέπει βέβαια να αναπτυχθούν νέοι αλγόριθμοι κατανομής πόρων σε DRX κύκλους που να λαμβάνουν υπόψη το χρόνο ζωής κάθε πακέτου χρησιμοποιώντας του διαθέσιμους μηχανισμούς των DRX εφαρμογών. Αυτό συμβαίνει γιατί οι M2M εφαρμογές ενδέχεται να έχουν πολύ μεγάλες διαφορές όσον αφορά την ανεκτή καθυστέρηση και χρόνο ζωής των πακέτων. Οι ιδιαιτερότητες αυτές οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι ο τηλεπικοινωνιακός πάροχος είναι αυτός που πρέπει να προσφέρει τις M2M εφαρμογές στους χρήστες του δικτύου του, ώστε να παραμετροποιήσει κατάλληλα και τους αναγκαίους μηχανισμούς με βάση τις αντοχές και το ισοζύγιο με άλλες εφαρμογές.

5.3. Έλεγχος συνωστισμού στο κανάλι ελέγχου PDCCH για M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας

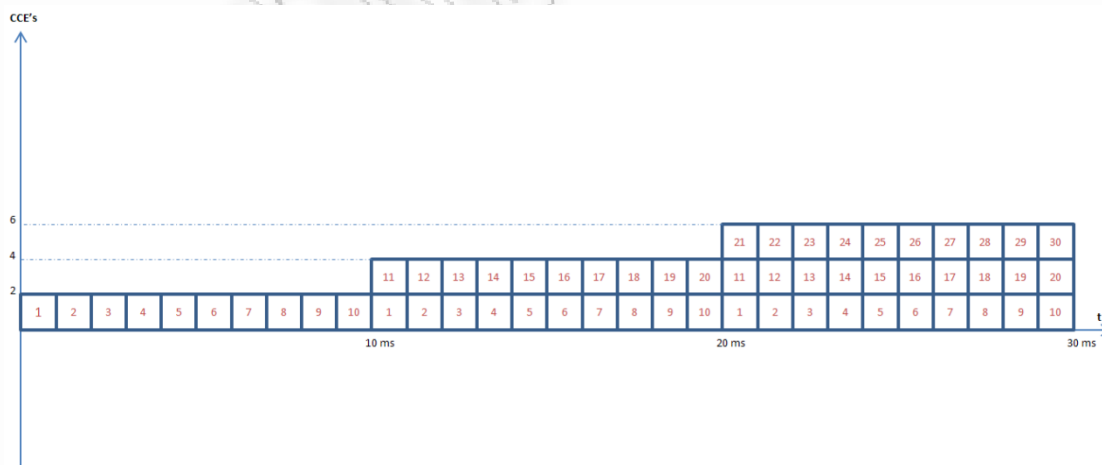
Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά παραπάνω ο βασικός προτεινόμενος μηχανισμός για M2M εφαρμογές ευρείας κλίμακας περιλαμβάνει τη σύνδεση τους σε δίκτυο LTE του τηλεπικοινωνιακού παρόχου σε κατάσταση RRC_CONNECTED και την ένταξη τους εντός του μηχανισμού DRX με τη κατάλληλη ρύθμιση του μακρού και βραχέως DRX κύκλου και των άλλων παραμέτρων του μηχανισμού αλλά και του μηχανισμού semi-persistent scheduling εντός του βραχέως DRX κύκλου. Σε κάθε περίπτωση όλες οι MTC συσκευές ξυπνούν εντός της ενεργής περιόδου και παρακολουθούν το κανάλι PDCCH. Στο κανάλι αυτό μεταδίδονται από τον σταθμό eNodeB αποφάσεις προγραμματισμού των MTC συσκευών για λήψη δεδομένων στο downlink αλλά και uplink grants για αποστολή δεδομένων στο uplink μαζί με το σχήμα διαμόρφωσης/κωδικοποίησης. Με βάση αυτές τις οδηγίες κάθε MTC συσκευή θα μεταδώσει ή θα λάβει δεδομένα heartbeat, keep alive ή payload είτε στο PUSCH, είτε στο PDSCH. Ο συνωστισμός στα κανάλια αυτά είναι πολύ δυσκολότερο να συμβεί από ότι στο PDCCH, καθώς υπάρχει πολύ μεγαλύτερος αριθμός διαθέσιμων resource block, μεγαλύτερη ευελιξία στην ανάθεση πόρων και ειδικότερα αν οι DRX κύκλοι και ο μηχανισμός semi-persistent scheduling παραμετροποιηθούν ώστε να μην συμπίπτουν στο ίδιο subframe για κάθε συσκευή (όπως αναλύθηκε παραπάνω).

Όταν πρόκειται μια συσκευή να μεταδώσει δεδομένα στο uplink, τότε πρέπει να στείλει αρχικά ένα scheduling request στο PUCCH και έπειτα να μείνει ενεργή παρακολουθώντας το PDCCH μέχρι να λάβει το uplink grant. Ο συνωστισμός του PUCCH είναι εκτός του σκοπού αυτής της εργασίας αν και θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να συμβεί καθώς το SR είναι ένα μόνο bit ενώ τα SR's πολλών τερματικών μπορούν να πολυπλεχθούν εντός ενός PUCCH, που καταλαμβάνει ένα resource block [2]. Αντίθετα η ανάθεση πόρων στο PDCCH γίνεται με τη χρήση των Control Channel Elements (CCE's). Ανάλογα με το PDCCH format η πληροφορία

ελέγχου για κάθε συσκευή μπορεί να μεταδοθεί σε 1,2,4 ή 8 διαδοχικά CCE's. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων ελέγχου εξαρτάται από το μέγεθος της περιοχής ελέγχου σε ένα subframe, το εύρος ζώνης του συστήματος και τους πόρους που χρησιμοποιούνται στο PICH.

Αν για μια συγκεκριμένη M2M εφαρμογή οι MTC συσκευές ξυπνούν για να παρακολουθήσουν το PDCCH στο ίδιο subframe, τότε ενδέχεται να υπάρξει πρόβλημα συνωστισμού στο κανάλι. Θωρώντας εύρος ζώνης συστήματος ίσο με 20 MHz, έναν μέσο αριθμό στοιχείων ελέγχου ίσο με 20 και PDCCH format 1 (2 CCE/MTC συσκευή), τότε μπορούν εξυπηρετηθούν μέχρι 10 MTC συσκευές εντός ενός subframe καθώς εξαντλούνται τα διαθέσιμα στοιχεία ελέγχου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις στην εξυπηρέτηση κρίσιμων αιτημάτων προγραμματισμού αλλά και να επηρεάσει την επικοινωνία συμβατικών τερματικών εντός του ίδιου κελιού, ειδικά αν ο αριθμός των διαθέσιμων MTC συσκευών είναι πολύ μεγάλος.

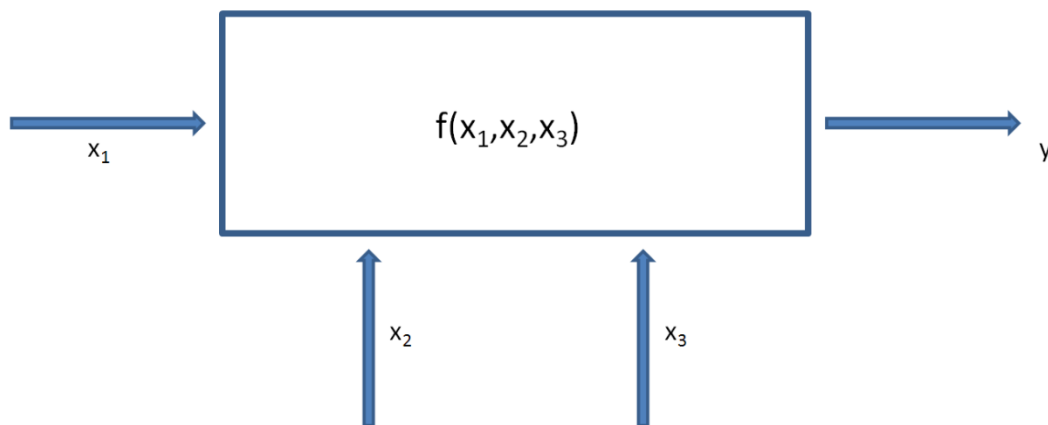
Λύση στο παραπάνω πρόβλημα μπορεί να δοθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των DRX κύκλων της κάθε συσκευής της εφαρμογής έτσι ώστε να συμπίπτουν όσο το δυνατόν λιγότερες ενεργές περιόδους MTC συσκευών εντός του ίδιου subframe. Με αυτόν τον τρόπο καταλαμβάνονται τα λιγότερα στοιχεία ελέγχου από τις MTC συσκευές σε κάθε subframe. Με βάση την περίοδο του DRX κύκλου, που είναι κοινός για όλες τις συσκευές της ίδιας εφαρμογής, κάθε συσκευή με αύξων αριθμό n μπορεί να ξυπνά και να παρακολουθεί το PDCCH κανάλι στο επόμενο χρονικά subframe από την συσκευή με αύξων αριθμό $n-1$. Ο μηχανισμός αυτός για 30 MTC συσκευές με DRX κύκλο 10 ms και PDCCH format 1 παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ο αύξων αριθμός κάθε συσκευής εικονίζεται με κόκκινο χρώμα και δείχνει σε ποιο ακριβώς subframe προγραμματίζεται κάθε συσκευή αν όλες ακολουθούν DRX κύκλο ίσο με 10 ms. Στον κάθετο άξονα αντιστοιχίζεται ο αριθμός των στοιχείων ελέγχου που καταλαμβάνουν οι συσκευές σε κάθε subframe. Αν χρησιμοποιηθούν δηλαδή 30 MTC συσκευές ο μέγιστος αριθμός απαιτούμενων στοιχείων ελέγχου εντός ενός υπό-πλασίου θα είναι 6.



Εικόνα 26: Μηχανισμός διαχείρισης πόρων PDCCH

5.3.1. Μοντέλο μηχανισμού ανάθεσης πόρων στο PDCCH εντός DRX κύκλου και συμπεράσματα

Παρακάτω παρατίθενται το σύστημα, οι παράμετροι και οι παραδοχές του μοντέλου.



Εικόνα 27: Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης

x_1 : Τιμές εισόδου του συστήματος. Είναι ο αριθμός των MTC συσκευών της εξυπηρετούμενης εφαρμογής μετρημένος σε δεκάδες (10, 20, 30, ...) για τις ανάγκες της προσομοίωσης. Ισχύει:

$$x_1 = 10 \cdot i, \text{ όπου } i = 1, 2, 3 \dots, 20$$

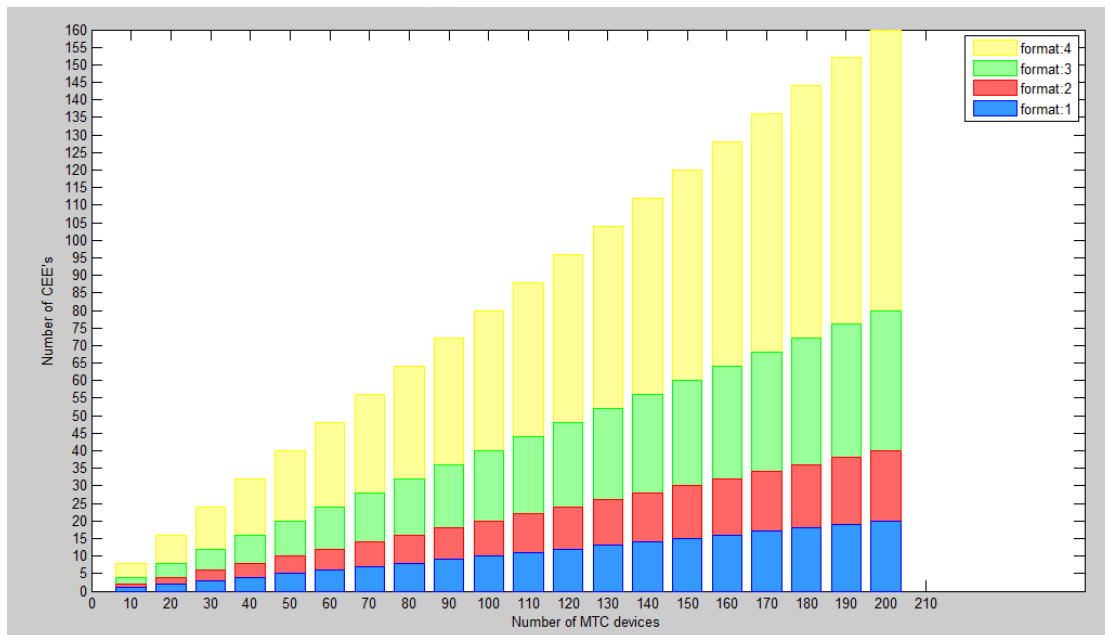
x_2 : Αριθμός διαθέσιμων υπό-πλασιών εντός του DRX κύκλου. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρείται βραχύς DRX κύκλος 10 ms. Επομένως $x_2=10$.

x_3 : PDCCH format. Δηλαδή ο αριθμός των CCE's ανά MTC συσκευή. Οι τιμές που μπορεί να λάβει η μεταβλητή αυτή είναι 1,2,4,8 (format 0,1,2,3 αντίστοιχα).

y : Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων ελέγχου ανά subframe για κάθε δεκάδα νέων MTC συσκευών που προστίθενται στο δίκτυο. Ισχύει:

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = x_3 \cdot \frac{x_1}{x_2} \in \mathbb{N}$$

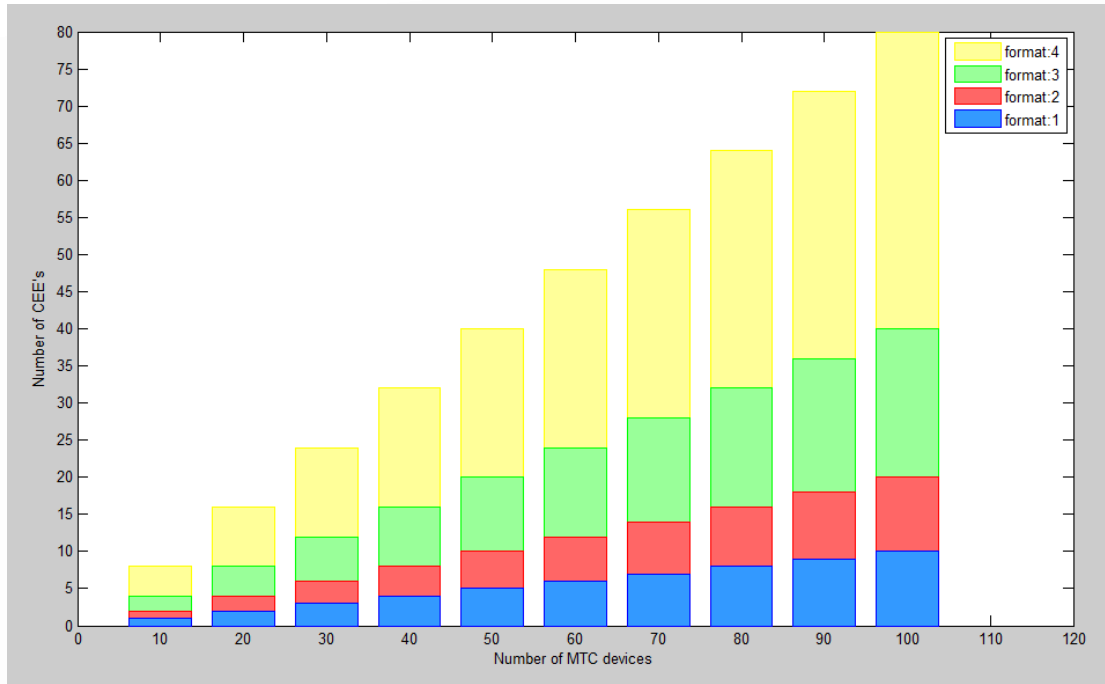
Το παραπάνω σύστημα δέχεται ως δεδομένα εισόδου τον αριθμό MTC συσκευών και έχοντας ως δεδομένο την λειτουργία DRX κύκλου 10 ms, υπολογίζει το μέγιστο αριθμό στοιχείων ελέγχου σε κάθε subframe. Οι τιμές ισχύουν μόνο αν το x_1 είναι πολλαπλάσιο του δέκα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Εικόνα 28: Αριθμός CCE's ανά subframe για διαφορετικό αριθμό MTC συσκευών

Στην εικόνα 19 φαίνεται πως για πολύ μεγάλο αριθμό MTC συσκευών εντός ενός κελιού, ο αριθμός των απαιτούμενων resource elements για τη χρήση του προτεινόμενου μηχανισμού αυξάνεται πάρα πολύ, σε τιμές μάλιστα που δεν μπορεί να υποστηριχθούν από το 3GPP LTE, ειδικά αν χρησιμοποιηθεί PDCCH format 3. Αντίθετα με τη χρήση του PDCCH format 0, ο μηχανισμός αποδίδει πάρα πολύ καλά και φαίνεται ότι μπορεί να υποστηρίξει M2M εφαρμογές με παραπάνω από 200 MTC συσκευές, χωρίς να οδηγεί το PDCCH σε συνωστισμό, αν υποθέσουμε έναν συνολικό αριθμό διαθέσιμων CCE's ίσο με 20 για εύρος ζώνης συστήματος 20 MHz.

Για να συγκριθεί καλύτερα ο μηχανισμός αυτός με την αρχική υπόθεση συνωστισμού του PDCCH παρατίθεται παρακάτω η σύντμηση των αποτελεσμάτων. Παρατηρείται ότι για να εκπληρωθούν οι συνθήκες συνωστισμού εντός δικτύου εύρους ζώνης 20 MHz με 20 διαθέσιμα στοιχεία ελέγχου σε κάθε subframe [16] και PDCCH format 1, πρέπει να συνδεθούν στο δίκτυο εντός του DRX κύκλου των 10 ms, 100 MTC συσκευές. Χωρίς την κατάλληλη διαμόρφωση του μηχανισμού οι συνθήκες συνωστισμού ικανοποιούνται με 10 μόλις συσκευές.



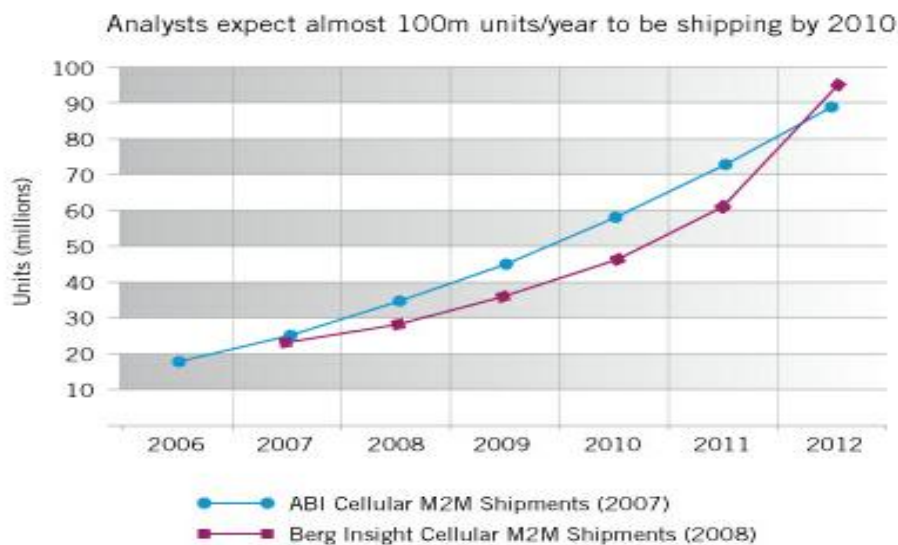
Εικόνα 29: Αριθμός CCE's ανά subframe για διαφορετικό αριθμό MTC συσκευών (σύντηψη)

Επίσης παρατηρείται ότι ο μηχανισμός αυτός δε ευνοεί τη χρησιμοποίηση PDCCH format 2 ,3 καθώς οι συνθήκες συνωστισμού επέρχονται για σχετικά μικρό αριθμό συσκευών (30 για το format 3 και 60 για το format 2). Επομένως απαιτείται ένας καλύτερος αλγόριθμος διαμερισμού των ενεργών περιόδων των DRX κύκλων για να είναι αποδοτικός ο μηχανισμός και σε αυτά τα format. Χρησιμοποιώντας όμως και το format 1 για να υποστηριχθούν 200 MTC συσκευές χρειάζονται θεωρητικά 40 στοιχεία ελέγχου. Αρά εκτός από βελτιστοποίηση του μηχανισμού για εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών εντός του ίδιου κελιού απαιτείται και η σχετική ρύθμιση του αριθμού των στοιχείων ελέγχου από το δίκτυο LTE.

Τέλος το μοντέλο αυτόματου πιλότου που αναλύθηκε παραπάνω για μία συσκευή και έδειξε ότι οι παράμετροι του μπορούν να εξυπηρετηθούν άριστα από τον DRX μηχανισμό, πλέον μπορεί να επεκταθεί και για τον αριθμό των συσκευών του μοντέλου, που είναι 50. Με τη χρήση PDCCH format 1 σε ένα δίκτυο 20 MHz ο μέγιστος αριθμός των χρησιμοποιούμενων στοιχείων ελέγχου, σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, είναι 10. Επομένως η συμφόρηση στο κανάλι ελέγχου αποφεύγεται.

6. Ένα προτεινόμενο business model για την αξιοποίηση M2M εφαρμογών από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους

Αυτήν τη στιγμή υπάρχουν 17 εκατομμύρια M2M εγκατεστημένες εφαρμογές στον αυτοκινητιστικό κλάδο και στις μεταφορές εντός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας στην Αμερική, με μελλοντική δυναμικότητα τις εκατοντάδες εκατομμύρια. Η αγορά στις Η.Π.Α. για M2M εφαρμογές αναμένεται να αναπτυχθεί γενικά από τις 27 εκατομμύρια συνδέσεις σήμερα στις 150 εκατομμύρια το 2017 (πηγή: Compass Intelligence). Ο κλάδος της ηλεκτρικής ενέργειας θα αποτελεί το 61% της συνολικής M2M αγοράς το 2021, ενώ ο αυτοκινητιστικός και ο μεταφορικός κλάδος θα έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο εσόδων από τον αριθμό των συνδέσεων που θα εγκατασταθούν, περίπου 43% (πηγή: Analysis Mason).



Εικόνα 30: Πρόβλεψη M2M παραγγελιών [27]

Τα τελευταία λίγα χρόνια η παραδοσιακή αγορά M2M, κυρίως στον τομέα των επιχειρήσεων, έχει αυξηθεί. Αυτό σημαίνει ότι οι πάροχοι M2M υπηρεσιών θα συνεχίσουν να βλέπουν μια αύξηση του αριθμού των συσκευών που συνδέονται στα δίκτυά τους. Το παραπάνω σχήμα δείχνει την προβλεπόμενη αύξηση των παραγγελιών M2M εφαρμογών και υπηρεσιών [27]. Τα στοιχεία αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη πολλές αγορές όπου οι M2M εφαρμογές έχουν ήδη αναπτυχθεί έντονα, όπως η υγειονομική περίθαλψη και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

Μέχρι σήμερα, ένα μεγάλο μέρος της αγοράς M2M αφορά εξειδικευμένες, μεγάλης κλίμακας εφαρμογές στους τομείς των ευφυών συστημάτων μέτρησης, τον εντοπισμό οχημάτων, καθώς και λύσεις ασφάλειας, ενώ μέχρι πρόσφατα οι μεγαλύτεροι πάροχοι υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας δεν έχουν προχωρήσει στην παροχή M2M υπηρεσιών που να απευθύνονται σε ένα ευρύτερο κοινό. Οι πάροχοι συνειδητοποιούν πλέον τις ευκαιρίες ανάπτυξης για νέες M2M υπηρεσίες που μπορεί να είναι διαθέσιμες χωρίς τεράστιες επενδύσεις κεφαλαίου, καθώς το δίκτυο υπάρχει ήδη. Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μπορούν να συνεχίσουν να αυξάνουν τις συνδεδεμένες συσκευές στο δίκτυό τους, ακόμη και σε μια εποχή όπου η ανάπτυξη επιβραδύνεται στον τομέα της προσωπικής επικοινωνίας λόγω της μεγάλης διεύθυνσης στην αγορά. M2M εφαρμογές μέσω ασύρματων

δικτύων σημαίνει περισσότερα δεδομένα που μεταδίδονται μέσω των ασύρματων δικτύων δηλαδή νέες, αυξανόμενες πηγές εσόδων για τον πάροχο υπηρεσιών. Εντός αυτού του πλαισίου μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών όπως η Sprint στην Αμερική και οι Telenor, Vodafone και Orange παγκόσμια έχουν πάρει εδώ κάποιο διάστημα σοβαρές πρωτοβουλίες για την προώθηση της έρευνας πάνω στην επικοινωνιακή μηχανή με μηχανή αλλά και στη διευκόλυνση της εύρεσης της καλύτερης οδού προς την αγορά [28], [29], [30].

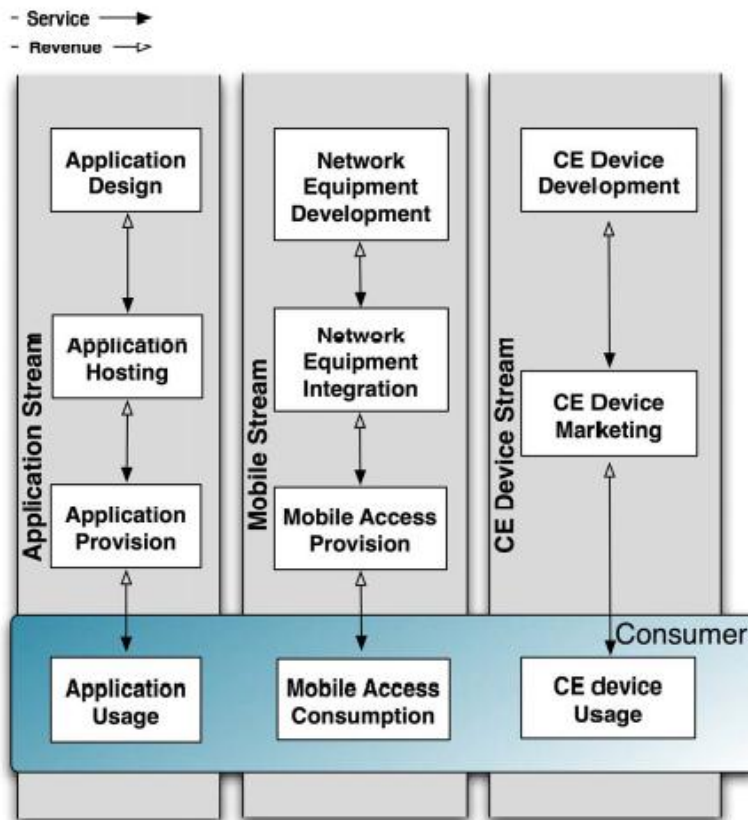
Επιχειρηματικά μοντέλα

Η ουσία ενός επιχειρηματικού μοντέλου είναι ότι καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι υπηρεσίες και τα προϊόντα των επιχειρήσεων προσφέρουν προστιθέμενη αξία στους πελάτες, τους οποίους δελεάζει να πληρώσουν για αυτήν την αξία και τελικά μετατρέπει τις πληρωμές των πελατών σε κέρδος. Ένα επιχειρηματικό μοντέλο αντανακλά κατά συνέπεια τι πιστεύουν τα διευθυντικά στελέχη μιας επιχείρησης για το τι θέλουν οι πελάτες, πώς το θέλουν και πώς μια επιχείρηση μπορεί να οργανωθεί ώστε να καλύψει καλύτερα τις ανάγκες των πελατών, ώστε να πληρωθεί γι' αυτό και να έχει τελικά κέρδος. Μερικά επιχειρηματικά μοντέλα που εφαρμόζονται σε ICT υπηρεσίες είναι το network effect model, το open source model, το subscription model, το collective business models και άλλα πολλά. Στο [31] βλέπουν το επιχειρηματικό μοντέλο σαν ένα τρόπο με τον οποίο ένα δίκτυο εταιρειών σκοπεύει να δημιουργήσει και να συλλάβει αξία από την εκμετάλλευση τεχνολογικών ευκαιριών. Προτείνονται τέσσερις διαφορετικοί τύποι πλατφόρμας υπηρεσιών προσανατολισμένες γύρω από τον σχετικό έλεγχο πάνω στη σχέση με τον πελάτη από τη μία πλευρά και τον έλεγχο υλικών και άυλων περιουσιακών στοιχείων που συνθέτουν την πρόταση αξίας από την άλλη.

Τα διάφορα επιχειρηματικά μοντέλα βασικά χρησιμοποιούν τρία κύρια δομικά στοιχεία: business role, actor, stakeholder. Η οντότητα business role μπορεί να οριστεί ως ένα διακριτό σύνολο από αρμοδιότητες, δράσεις και δραστηριότητες που έχουν από κοινού μια συνεκτική λογική προστιθέμενης αξίας [29], όπως ο σχεδιασμός μιας εφαρμογής ή η παροχή πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας. Η οντότητα actor αποτελεί ένα τμήμα μιας αγοράς που ενσωματώνει ένα σύνολο από business roles, ενώ οι stakeholders είναι πραγματικοί οργανισμοί, όπως ένα ίδρυμα ή μια εταιρεία που ενδιαφέρονται για την έκβαση των δράσεων και δραστηριοτήτων τους.

Επιχειρηματικά μοντέλα και M2M υπηρεσίες

Πιο συγκεκριμένα στο [32] τα επιχειρηματικά μοντέλα που προτείνονται βασίζονται σε περιπτώσεις χρήσης M2M εφαρμογών που δίνουν πρόσβαση σε πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε συσκευές και αισθητήρες (μετρητές, ηλεκτρικές συσκευές), και οι οποίες πληροφορίες διακινούνται μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας και ενδεχομένως συνδυάζονται με ήδη υπάρχουσες πληροφορίες και υπηρεσίες του δικτύου αυτού (πληροφορίες τοποθεσίας, sms). Ως εκ τούτου θεωρείται ότι ο καταναλωτής κατέχει μια συσκευή (κινητό τηλέφωνο, τηλεόραση, υπολογιστή, MTC συσκευή) και μια συνδρομή κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον θεωρείται ότι υπάρχουν APIs που διατίθενται από τους κατασκευαστές των συσκευών και τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους για να ενσωματωθούν οι εφαρμογές των συσκευών στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.



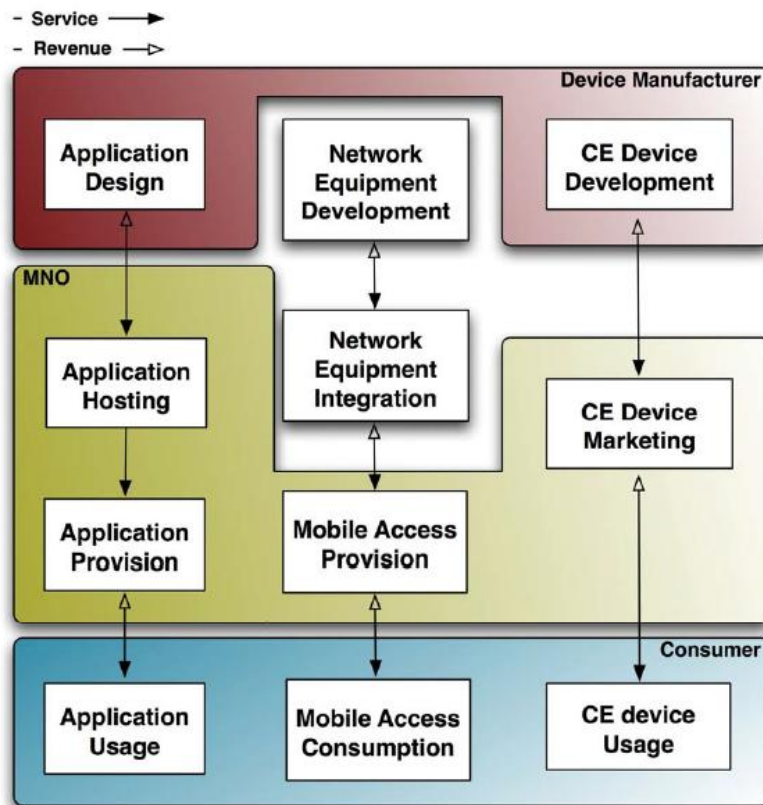
Εικόνα 31: Δημιουργία προστιθέμενης αξίας [32]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι υπάρχουν τρία διαφορετικά streams παροχής υπηρεσίας και εσόδων. Η παροχή υπηρεσίας από το ένα business role στο επόμενο της αλυσίδας (μαύρο βέλος) έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία εσόδων προς την αντίθετη κατεύθυνση (λευκό βέλος). Το διάγραμμα θεωρεί ότι η παροχή υπηρεσιών με τα αντίστοιχα ανταλλάγματα μπορεί να συμβεί μόνο κατά μήκος κάθε διαφορετικού stream, εντός δηλαδή του application stream, του mobile stream και του CE (Consumer Electronic) device stream.

Τα business roles που ορίζονται είναι τα εξής: application design, application hosting, application provision, application usage στο application stream, network equipment development, network equipment integration, mobile access provision και mobile access consumption στο mobile stream, CE device development, CE device marketing και CE device usage στο CE device stream. Οι οντότητες των actors που θα αναλάβουν τους παραπάνω ρόλους είναι ο κατασκευαστής των συσκευών, ο πάροχος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ο application developer, ο application integrator και ο καταναλωτής. Στο σχήμα φαίνεται ποιους ρόλους αναλαμβάνει ο καταναλωτής, ενώ οι ρόλοι network equipment development και network equipment integration δεν αναλαμβάνονται από κανέναν από τους actors που προαναφέρθηκαν.

Επιχειρηματικό μοντέλο για την παροχή M2M υπηρεσιών βασισμένο στον πάροχο

Η ανάλυση θα εστιαστεί σε ένα από τα πολλά διαφορετικά σενάρια που περιγράφονται στο [32]. Το σενάριο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 32: Δημιουργία προστιθέμενης αξίας για τον πάροχο

Ο πάροχος εγκαθιστά και διαχειρίζεται μια πλατφόρμα, προκειμένου να φιλοξενήσει και να παρέχει M2M εφαρμογές, δημιουργώντας ταυτόχρονα μια αγορά για τη διανομή στην πελατειακή του βάση εφαρμογών που αναπτύσσουν οι προγραμματιστές. Ο πάροχος βασίζεται στους προγραμματιστές και στην καινοτομία τους για την επιτυχία της πλατφόρμας. Επίσης καταλαμβάνει ενεργό ρόλο στην εμπορική διάθεση των συσκευών στον τελικό χρήστη και αναλαμβάνει τον έλεγχο της πρόσθετης λειτουργικότητας που παραδίδεται στον πελάτη. Αυτό το σενάριο μπορεί να συγκριθεί με το γνωστό bundle προσφορών που χρησιμοποιείται ευρέως από τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας στην Ευρώπη (κινητό τηλέφωνο, δωρεάν χρόνος ομιλίας, συσκευή και internet για παράδειγμα). Στο συγκεκριμένο σενάριο βέβαια, παρόλο που ο πάροχος εξακολουθεί να κατέχει τη σχέση με τον πελάτη για την παροχή εφαρμογών, ο κατασκευαστής της συσκευής αναλαμβάνει να εξοπλίσει τις συσκευές με το κατάλληλο λογισμικό, ώστε να είναι δυνατή η παροχή των υπηρεσιών μέσω της πλατφόρμας του παρόχου. Τέλος ο πάροχος διατηρεί το ρόλο της προώθησης των συσκευών στον πελάτη.

Όπως είναι προφανές ο πάροχος σαν actor αναλαμβάνει το ρόλο του mobile access provision. Η αναβάθμιση του δικτύου του στις προδιαγραφές του LTE είναι αναπόφευκτη, ώστε να μπορεί να ανταγωνιστεί στο περιβάλλον δραστηριοποίησης του, αλλά και να παρέχει καλύτερες υπηρεσίες στους πελάτες τους. Με την παροχή M2M υπηρεσιών αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων, επομένως αυξάνονται και τα έσοδα. Η χρησιμοποίηση μάλιστα μηχανισμών του LTE, που δεν είναι ειδικά σχεδιασμένοι για M2M εφαρμογές, και δεν απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό δικτύου, απαλλάσσει τον πάροχο από την ακριβή εγκατάσταση νέων υποδομών δικτύου και δεν δημιουργεί νέες υποχρεώσεις

προς τους παρόχους εξαρτημάτων και εγκατάστασης δικτύων. Αρά στο mobile stream ο ρόλος που αναλαμβάνει ο πάροχος αυξάνει τα έσοδα από τον καταναλωτή και προς τα πάνω, χωρίς αυτά να διαφεύγουν παραπάνω στην αλυσίδα.

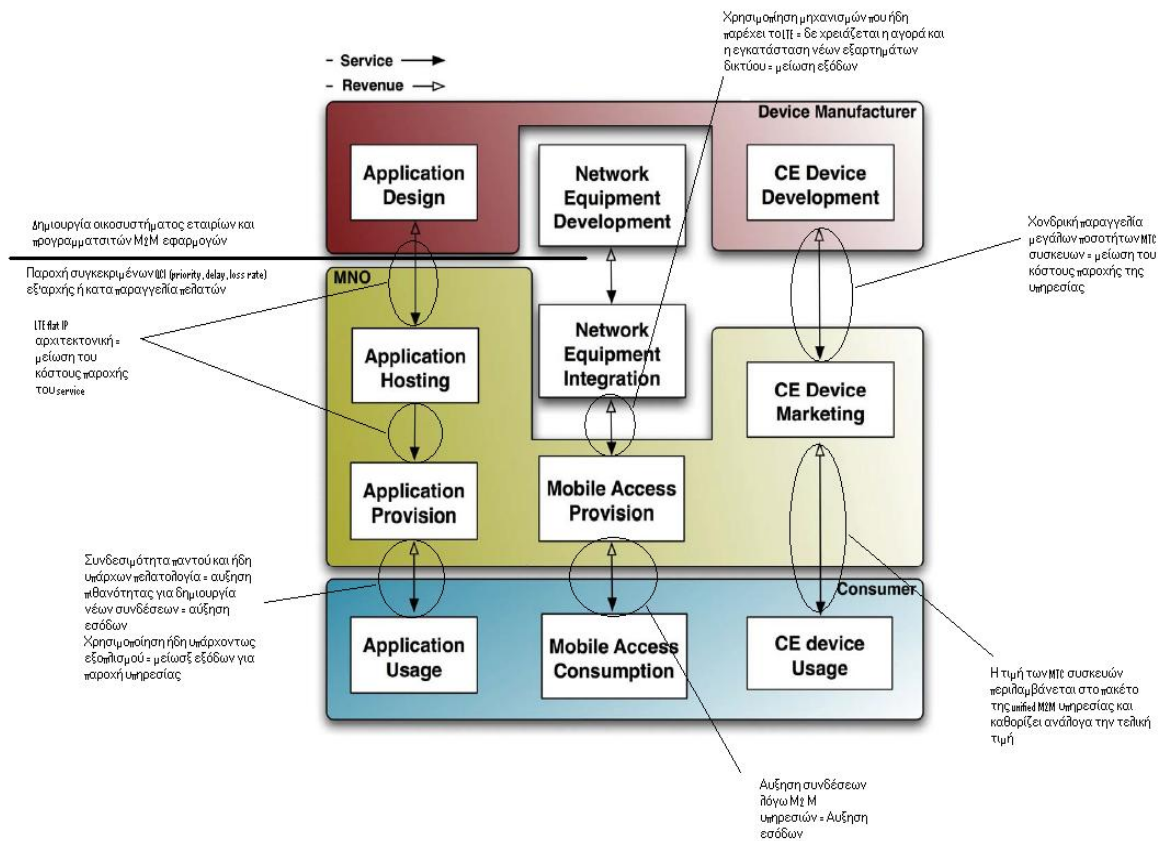
Στο application stream ο πάροχος αναλαμβάνει τους ρόλους του application hosting και provisioning. Πλέον εδώ φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο πάροχος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας θα προσφέρει συνολικές λύσεις για M2M εφαρμογές. Πρώτα από όλα αυτό συμβαίνει γιατί ο πάροχος μπορεί να το κάνει. Διαθέτει δηλαδή ένα εκτεταμένο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης κατά κύριο λόγο, που συνήθως καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού της επικράτειας που δραστηριοποιείται, προσφέροντας συνδεσιμότητα παντού, όπου και να πρέπει να εγκατασταθεί μια M2M εφαρμογή. Είναι γεγονός ότι αν ο πελάτης μπορεί χρησιμοποιήσει κάποια M2M εφαρμογή οπουδήποτε, χωρίς να απαιτείται χρόνος αναμονής και επιπρόσθετες υλικές συνδέσεις, θα πάρει πιο εύκολα την απόφαση για τη χρησιμοποίηση της υπηρεσίας. Επίσης οι πελάτες, επιχειρήσεις ή ιδιώτες, που ήδη έχει ο πάροχος, μπορούν να αποτελέσουν νέους πελάτες M2M υπηρεσιών. Η χρησιμοποίηση μάλιστα δικτύου LTE επιτρέπει την εύκολη σύνδεση με το διαδίκτυο, λόγω της flat IP αρχιτεκτονικής, με αποτέλεσμα η παροχή service από το ρόλο application hosting στο ρόλο application provisioning (δυο ρόλοι που αναλαμβάνει ο πάροχος) να γίνεται με τα λιγότερα έξοδα και ανάγκες σε συνδεσιμότητα. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο μειώνονται και τα έξοδα του παρόχου για την μεταφορά και εγκατάσταση του application από τον κατασκευαστή στο hosting.

Οι μηχανισμοί του LTE που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο πάροχος (DRX, semi-persistent scheduling) βασίζονται στο γεγονός ότι υπάρχουν συγκεκριμένα M2M bearers στο δίκτυο που όλα μαζί συνιστούν μια M2M εφαρμογή. Όλα τα bearers μιας εφαρμογής θεωρητικά ανήκουν στο ίδιο κελί, εξυπηρετούνται από τον ίδιο eNodeB και με βάση το QCI (QoS Class Identifier) εισέρχονται σε DRX κύκλους με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τους ανατίθενται αντίστοιχα semi-persistent πόροι. Το πρότυπο LTE καθορίζει μόνο 9 QCI, αλλά δεν αποκλείει ότι ο κάθε πάροχος μπορεί να ορίσει και άλλα ανάλογα με τις M2M εφαρμογές που θέλει να προσφέρει. Κάθε πάροχος μπορεί να αποφασίσει να εστιάσει σε διαφορετικές M2M εφαρμογές. Για παράδειγμα βιομηχανικές εφαρμογές ευρείας κλίμακας που στοχεύουν σε επιχειρήσεις ή εφαρμογές έξυπνου σπιτιού μικρής κλίμακας που στοχεύουν σε ιδιώτες. Κάθε ομάδα αυτού του είδους εφαρμογών θα έχει ένα συγκεκριμένο QCI, με συγκεκριμένη προτεραιότητα, ανεκτή καθυστέρηση, εξαρτώμενη από το χρόνο ζωής των πακέτων, και loss rate. Ο κάθε πάροχος αποφασίζει ποιες εφαρμογές με συγκεκριμένα QCI θα υποστηρίξει και μπορεί να αναπτύξει εσωτερικά αυτές τις εφαρμογές. Όμως το επιχειρηματικό μοντέλο προτρέπει οι M2M εφαρμογές να αναπτύσσονται εξωτερικά του παρόχου με βάση τις δυνατότητες του παρόχου, είτε σε συνεργασία με αυτόν. Η επιλογή αυτή γίνεται ώστε να δημιουργηθούν διάφορα οικοσυστήματα εταιριών και προγραμματιστών που θα αναπτύξουν M2M εφαρμογές που στοχεύουν σε διαφορετικούς πελάτες, κατά τα πρότυπα της ανάπτυξη εφαρμογών κινητών τηλεφώνων. Με αυτό τον τρόπο και λόγω του ανταγωνισμού που θα δημιουργηθεί, οι αξία για την παροχή της υπηρεσίας των εφαρμογών από τον κατασκευαστή στον πάροχο θα μειωθεί, χωρίς κατ' ανάγκη τα έσοδα του παρόχου από τον πελάτη να μειωθούν, καθώς ελέγχει πλήρως τη διάθεση των M2M εφαρμογών προς του τελικούς πελάτες σε όλα τα streams. Το

συγκεκριμένο μοντέλο που παρουσιάζεται στο [31] θεωρεί ότι ο κατασκευαστής των MTC συσκευών αναπτύσσει και τις M2M εφαρμογές, αλλά αυτό γενικά δεν είναι απαραίτητο.

Η παροχή της συνολικής υπηρεσίας από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο (Unified M2M) ολοκληρώνεται με τη διάθεση και των MTC συσκευών στον πάροχο, ο οποίος αναλαμβάνει τη διαφήμιση και διάθεση των MTC συσκευών στο πλαίσιο της κάθε εφαρμογής που παραγγέλνεται από τους πελάτες. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι τα ίδια τα κινητά τηλέφωνα, set top boxes, ειδικοί αισθητήρες με πομποδέκτες κλπ. Η χονδρική παραγγελία από τον πάροχο πολλών συσκευών σε συγκεκριμένους κατασκευαστές μπορεί να ρίξει την τιμή, ενώ η κάθε συσκευή αυξάνει και τα έσοδα από την παροχή της υπηρεσίας. Έτσι το ισοζύγιο υπηρεσίας, εσόδων και στο CE device stream μπορεί να είναι θετικό για τον πάροχο, ή τουλάχιστον να μην μειώνει το θετικό ισοζύγιο από τα άλλα streams.

Όλα τα συμπεράσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 33: Unified M2M

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] 3GPP TS 25.913, «Requirements for evolved utra (e-utra) and evolved utran (e-utran),» 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2008.
- [2] H. Holma και A. Toskala, LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, Wiley, 2009.
- [3] Ericsson, «LTE - an introduction,» Ericsson, 2009.
- [4] Agilent, «3gpp long term evolution - system overview, product development and test challenges,» Agilent Technologies, 2009.
- [5] 3GPP TS 36.211, «Physical Channels and Modulation (Release 8),» 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2008.
- [6] 3GPP TS 36.213, «Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (Release 8),» 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2008.
- [7] E. Dahlman, S. Parkvall και J. Skold, LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier, 2011.
- [8] 3GPP TS 23.401, «Technical Specification Group Services and System Aspects; GPRS Enhancements for E-UTRAN Access (Release 8),» 3rd Generation Partnership Project, 2009.
- [9] G. e. a. Monghal, «QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for the UTRAN Long Term Evolution,» σε *IEEE Proc. VTC*, 2008.
- [10] 3GPP TS 36.321, «medium access control (mac) protocol specification,» 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2009.
- [11] 3GPP TS 36.133, «Requirements for support of radio resource management,» 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2008.
- [12] A. S. Lioumpas, A. Alexiou, C. Anton-Haro και P. Navartanam, «Expanding LTE for Devices: Requirements, Deployment Phases and Target Scenarios” European Wireless 2011, Vienna, Austria, April 2011,» σε *European Wireless 2011*, Vienna, Austria, April 2011.
- [13] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. B. Ribeiro και K. Hugl, «Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks,» *IEEE Communications Magazine*, pp. 42-49, 2009.
- [14] P. Jänis, «Device-to-Device Communication Underlying Cellular Communications Systems,» *Int'l. J. Commun., Network and Sys. Sci.*, τόμ. 2, αρ. 3, pp. 78-169, June 2009.
- [15] M. Saedy και V. Mojtahed, «Ad Hoc M2M communications and security based on 4G cellular system,» σε

Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2011.

- [16] S. Y. Lien, K. C. Chen και Y. Lin, «Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications,» *IEEE Communications Magazine*, τόμ. 49, αρ. 4, pp. 66-74, April 2010.
- [17] ZTE, «R2-104662: MTC Simulation Results with Specific Solutions,» σε *3GPP TSG RAN WG2 Meeting 71*, 2010.
- [18] A. Larmo, M. Lindström, M. Meyer, G. Pelletier, J. Torsner και J. H. Wiemann, «The LTE Link-Layer Design,» *IEEE Communications Magazine*, pp. 52-59, 2009.
- [19] IETF, «Robust Header Compression (ROHC): Framework and Four Profiles: RTP, UDP, ESP, and Uncompressed».
- [20] K. Shi, Y. T. Shu και J. Feng, «A MAC layer congestion control mechanism in IEEE 802.11 WLANs,» σε *ChinaCOM'09*, 2009.
- [21] A. S. Lioumpas και A. Alexiou, «Uplink Scheduling for Machine-to-Machine Communications in LTE-based Cellular Systems,» *IEEE Globecom 2011, Houston, U.S.A, Dec. 2011.*,» σε *IEEE Globecom 2011, Houston, U.S.A, 2011.*
- [22] T. Kolding, J. Wigard και L. Dalsgaard, «Balancing Power Saving and Single-User Experience with Discontinuous,» σε *Proc. of IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Reykjavik, 2008.
- [23] A. Orrevald, «M2M Traffic Characteristics,» Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.
- [24] EURECOM, EYU, TUV, «D3.4.M2M Traffic Model,» 2010.
- [25] R. P. Lewis, P. Iqic και Z. Zhongfu, «Assessment of Communication Methods for Smart Electricity Metering in the U.K.,» σε *IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE)*, Valencia, 2009.
- [26] T. Khalifa, N. Kshirasagar, A. Maazen και N. Amiya, «A Transport Control Protocol Suite for Smart Metering Infrastructure,» σε *International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA)*, Kuala Lumpur, 2011.
- [27] GSM World, «Market Opportunity,» Groupe Spéciale Mobile Association (GSMA).
- [28] Telenor, «Telenor Objects - a new company and ambitious initiative in the Telenor family,» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://telenorobjects.com/news/telenor-objects-a-new-company-and-ambitious-initiative-in-telenor.aspx>.
- [29] Orange, «Orange M2M Connect,» 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.business.orange.co.uk/servlet/Satellite?c=OUKPage&cid=1135953584842&pagename=Business>.
- [30] Vodafone, «Vodafone, Verizon Wireless and nPhase announce strategic alliance to provide global M2M solutions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.vodafone.com/start/media_relations/news/group_press_releases/2010/vodafone__verizon.html.
- [31] E. Faber, P. Ballon, H. Bouwman, T. Haaker, O. Rietkerk και M. Steen, «Designing business models formobile ICT services,» σε *16th Bled Electronic Commerce Conference eTransformation*, Slovenia, 2003.

- [32] V. Gonçaves και P. Dobbelaere, «Business Scenarios for Machine-to-Machine Mobile Applications,» σε *Ninth International Conference on Mobile Business*, Ninth, 2010.
- [33] OMS, «OMS: Open Metering System Specification– Volume 2: Primary Communication, Issue 2.0.0,» 2009.
- [34] H. Y. Hsieh και R. Sivakumar, «On Using Peer-to-Peer Communication in Cellular Wireless Data Networks,» *IEEE Trans. Mobile Comp.*, τόμ. 3, αρ. 1, pp. 57-72, Jan.-Mar. 2004.
- [35] V. P. Mhatre, C. Rosenberg, D. Kofman, R. Mazumdar και N. Shroff, «A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint,» *IEEE Transactions on Mobile Computing*, τόμ. 4, αρ. 1, p. 4–15, Jan.-Feb. 2005.
- [36] M. Yarvis, N. Kushalnagar, H. Singh, A. Rangarajan, Y. Liu και S. Singh, «Exploiting heterogeneity in sensor networks,» σε *INFOCOM05*, 2005.
- [37] A. Jardosh, K. Ramachandran, K. Almeroth και E. Belding, «Understanding Congestion in IEEE 802.11b Wireless Networks,» σε *ACM/USENIX International Measurement Conference, Berkeley, CA*, 2009.
- [38] J. Mistic, S. Shafi και V. B. Mistic, «The impact of MAC parameters on the performance of 802.15. 4 PAN,» *Ad Hoc Networks*, τόμ. 3, αρ. 5, pp. 509-528, 2005.
- [39] S. Mistic, S. Shafi και V. B. Mistic, «Performance of a beacon enabled IEEE 802.15.4 cluster with downlink and uplink traffic,» τόμ. 17, αρ. 4, pp. 361-376, April 2006.
- [40] Schneider Electric Internal Report, «ZigBee Coexistence with WiFi,» 2006.
- [41] ZigBee Alliance, «ZigBee and Wireless Radio Frequency Coexistence,» 2007.
- [42] Ember Presentation to the 2006 ZigBee Developers Conference, «ZigBee / 802.11 Coexistence,» 2006.

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Εκδόσεις 3GPP LTE	11
Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική δικτύου κορμού [2].....	14
Εικόνα 3: Βασικοί πόροι μετάδοσης [3].....	17
Εικόνα 4: Δομή frame τύπου 1 [5]	20
Εικόνα 5: Δομή frame τύπου 2 [5]	20
Εικόνα 6: Στοιβά πρωτοκόλλων	25
Εικόνα 7: Packet Scheduler	28
Εικόνα 8: Βασική DRX λειτουργία	33
Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική δικτύου M2M.....	36
Εικόνα 10: Επιβάρυνση σηματοδότησης [18]	40
Εικόνα 11: Βασικό μοντέλο δικτύου για M2M κίνηση δεδομένων	51
Εικόνα 12: Βασικό μοντέλο ON-OFF για M2M κίνηση δεδομένων	52
Εικόνα 13: Μοντέλο ON-ACTIVE-OFF για M2M κίνηση δεδομένων.....	54
Εικόνα 14: Μηχανισμοί υλοποίησης μοντέλου (α).....	62
Εικόνα 15: Μηχανισμοί υλοποίησης μοντέλου (β).....	63
Εικόνα 17: Προτεινόμενος DRX μηχανισμός για το Uplink.....	65
Εικόνα 16: Προτεινόμενος DRX μηχανισμός για το Downlink	65
Εικόνα 18: Μοντέλο καταστάσεων	73
Εικόνα 19: System BW 20 MHz-50 MTC συσκευές	75
Εικόνα 20: System BW 20 MHz-100 MTC συσκευές	75
Εικόνα 21: System BW 20 MHz-200 MTC συσκευές	75
Εικόνα 22: System BW 15 MHz-50 MTC συσκευές	76
Εικόνα 23: System BW 15 MHz-100 MTC συσκευές	76
Εικόνα 24: System BW 10 MHz-50 MTC συσκευές	76
Εικόνα 25: System BW 10 MHz-100 MTC συσκευές	77
Εικόνα 26: Μηχανισμός διαχείρισης πόρων PDCCH.....	79
Εικόνα 27: Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης	80
Εικόνα 28: Αριθμός CCE's ανά subframe για διαφορετικό αριθμό MTC συσκευών	81
Εικόνα 29: Αριθμός CCE's ανά subframe για διαφορετικό αριθμό MTC συσκευών (σύντμηση)	82
Εικόνα 30: Πρόβλεψη M2M παραγγελιών [27]	83
Εικόνα 31: Δημιουργία προστιθέμενης αξίας [32]	85

Εικόνα 32: Δημιουργία προστιθέμενης αξίας για τον πάροχο	86
Εικόνα 33: Unified M2M	88

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Προδιαγραφές IEEE LTE	13
Πίνακας 2: Εύρος ζώνης συστήματος	19
Πίνακας 3: Συνθέσεις Uplink/Downlink σε TDD frame	21
Πίνακας 4: PUCCH πληροφορία	22
Πίνακας 5: PDCCH και CCE	23
Πίνακας 6: DRX παράμετροι.....	32
Πίνακας 7: Κατανομή πληροφορίας σε resource block (Uplink)	41
Πίνακας 8: Κατανομή πληροφορίας σε resource block (Downlink)	41
Πίνακας 9: Είδη κίνησης M2M εφαρμογών.....	52
Πίνακας 10: Δεδομένα Heartbeat (εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας).....	55
Πίνακας 11: Δεδομένα Payload (εφαρμογές περιορισμένης κλίμακας)	55
Πίνακας 12: Δεδομένα heartbeat (εφαρμογές ευρείας κλίμακας)	57
Πίνακας 13: Δεδομένα Payload (εφαρμογές ευρείας κλίμακας).....	57
Πίνακας 14: LTE/M2M.....	60
Πίνακας 15: QCI παράμετροι	61
Πίνακας 16: Παράμετροι αισθητήρα καπνού	67
Πίνακας 17: DRX παράμετροι μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας.....	68
Πίνακας 18: DRX παράμετροι αυτόματου πιλότου	70
Πίνακας 19: Δεδομένα αυτόματου πιλότου για κατάσταση έκτακτης ανάγκης.....	72
Πίνακας 20: Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης.....	74