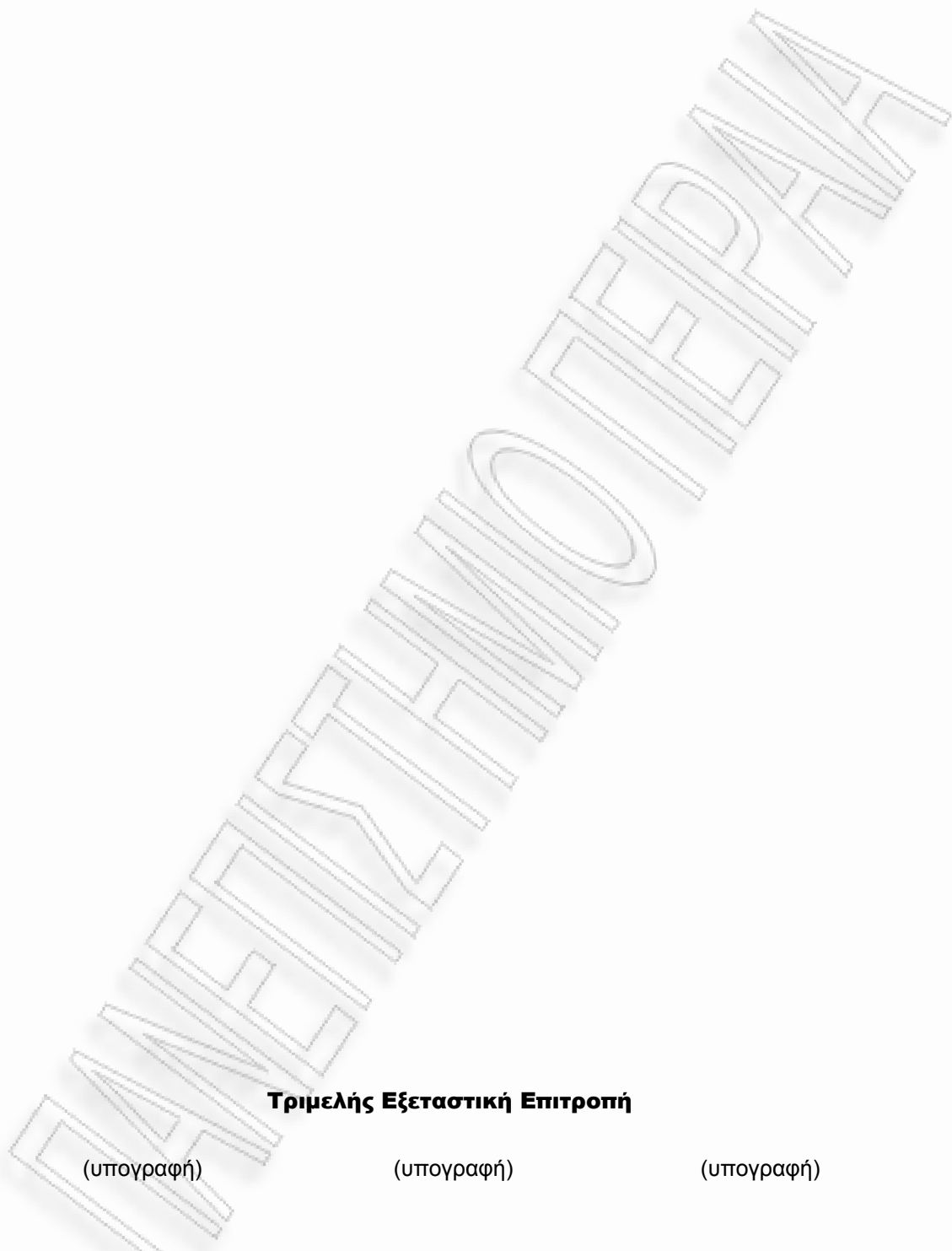




Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Πληροφορική»

**Μεταπτυχιακή Διατριβή**

Τίτλος Διατριβής	<b>Μελέτη και Αξιολόγηση Επίδοσης για την Εξοικονόμηση Ενέργειας σε LTE Δίκτυα</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Αικατερίνη Νικολιδάκη</b>
Πατρώνυμο	<b>Ανδρέας</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΠΛ/ 09003</b>
Επιβλέπων	<b>Δημήτριος, Βέργαδος</b>



**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

(υπογραφή)

Δημήτριος Βέργαδος  
Λέκτορας

(υπογραφή)

Χρήστος Δουληγέρης  
Καθηγητής

(υπογραφή)

Παναγιώτης Κοτζανικολάου  
Λέκτορας

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑΣ

## Ευχαριστίες

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δ. Βέργαδο, ο οποίος μου παρείχε την άρτια επιστημονική καθοδήγηση για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Χ. Ζουληγέρη και όλους τους καθηγητές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πειραιά. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την κ. Α. Σγώρα για την βοήθεια της. Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ τον αδερφό μου του υποψήφιο διδάκτορα Σ. Νικολιδάκη για την μεγάλη ηθική, συμβουλευτική και υλικοτεχνική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της εργασίας μου. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Αναστασία και Ανδρέα για την αγάπη τους και την κάθε είδους βοήθεια (ηθική, ψυχική και υλική) για όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>4</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	<b>5</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>8</b>
<b>Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
<b>Κεφάλαιο 2 – Εξέλιξη των Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Εισαγωγή στην Εξέλιξη στο Χώρο των Τηλεπικοινωνιών</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Εξέλιξη της Ασύρματης Τεχνολογίας</b>	<b>15</b>
2.2.1 Οι Γενιές πριν την Εξέλιξη του LTE	15
2.2.2 Η τυποποίηση του LTE	17
2.2.3 Ανταγωνιστές του LTE	19
<b>Κεφάλαιο 3 – Long Term Evolution (LTE)</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος</b>	<b>21</b>
3.1.1 Δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN	22
3.1.2 Δίκτυο Κορμού EPC	24
3.1.3 Εξοπλισμός Χρήστη	30
<b>3.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων</b>	<b>31</b>
3.2.1 User Plane (UP)	31
3.2.2 Control Plane (CP)	31
<b>3.3 Radio Interface Πρωτόκολλα</b>	<b>32</b>
3.3.1 Radio Resource Control RRC	32
3.3.2 Packet Data Convergence Protocol PDCP	33
3.3.3 Radio Link Controller (RLC)	33
3.3.4 Medium Access Control (MAC)	33
3.3.5 PHYsical (PHY)	34
<b>3.4 Διεπαφές</b>	<b>34</b>
<b>3.5 Κανάλια</b>	<b>35</b>
3.5.1 Λογικά Κανάλια	36
3.5.2 Κανάλια Μεταφοράς	37
3.5.3 Φυσικά Κανάλια	38
<b>3.6 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</b>	<b>39</b>
<b>3.7 OFDMA Basics</b>	<b>46</b>
<b>3.8 SC-FDMA Basics</b>	<b>50</b>
<b>Κεφάλαιο 4 –Scheduling Αλγόριθμοι</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Χρονοπρογραμματισμός σε Ασύρματα Δίκτυα</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Maximum CIR Algorithm (Max C/I)</b>	<b>56</b>

<b>4.3 Round Robin Algorithm</b>	<b>59</b>
<b>4.4 Proportional Fair Algorithm</b>	<b>60</b>
<b>4.5 HASA Algorithm</b>	<b>60</b>
<b>4.6 Softer Frequency Reuse Scheduling Algorithm</b>	<b>63</b>
<b>4.7 RSSA</b>	<b>64</b>
<b>Κεφάλαιο 5 – Ενέργεια</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Energy Efficiency</b>	<b>66</b>
<b>5.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στον Σταθμό Βάσης (BS)</b>	<b>68</b>
<b>Κεφάλαιο 6 – Μοντέλα LTE</b>	<b>72</b>
<b>6.1 Μοντέλο των J. Dohi και G. Fettweis</b>	<b>72</b>
<b>6.2 Προτεινόμενο Νέο Μοντέλο</b>	<b>72</b>
<b>Κεφάλαιο 7 – Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενου Μοντέλου</b>	<b>95</b>
<b>Κεφάλαιο 8 – Μελλοντικές Εξελίξεις-Συμπεράσματα</b>	<b>114</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>115</b>

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των κινητών επικοινωνιών έχει εξελιχθεί ραγδαία λόγω των αυξανόμενων απαιτήσεων, όπως είναι η πρόσβαση σε υπηρεσίες Διαδικτύου μέσω των κινητών τηλεφώνων καθώς και οι απαιτήσεις σε καλύτερη ποιότητα στις προσφερόμενες υπηρεσίες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE), δηλαδή η τεχνολογία για τα δίκτυα 4ης γενιάς (4G). Η τέταρτη γενιά (4G) είναι η επόμενη γενιά των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών που θα αντικαταστήσει τα υπάρχοντα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) και θα προσφέρει στους χρήστες βελτιωμένες υπηρεσίες με μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης, όσα δηλαδή δεν κατάφεραν να προσφέρουν τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Επιπλέον, η τεχνολογία LTE πρόκειται να δημιουργήσει ένα παγκόσμιο ετερογενές δίκτυο το οποίο θα ενσωματώσει τα δίκτυα 2ης και 3ης γενιάς.

Οι κινητές συσκευές για πρόσβαση στο Internet, όπως τα eReaders, τα tablet PCs, τα smartphones και τα netbooks έχουν μεγάλη ζήτηση στην αγορά για αυτό γίνεται προσπάθεια να εξελιχθούν σε επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης, ώστε ο χρήστης να μην χρειάζεται επαναφορτίζει τη συσκευή του σε τακτικά χρονικά διαστήματα. Επίσης, είναι αναπόφευκτο ότι οι μελλοντικές συσκευές θα περιέχουν LTE modems εκτός από τις κοινές διεπαφές, όπως Wi-Fi, Bluetooth ή USB και αυτό δημιουργεί επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη μηχανισμών και μοντέλων που θα συμβάλουν στις εξοικονόμηση ενέργειας στις κινητές συσκευές.

Στόχος σε αυτήν την εργασία είναι η δημιουργία ενός πιο αξιόπιστου μοντέλου με τη χρήση της LTE HARQ/ARQ διαδικασίας που μοντελοποιείται ως μια αλυσίδα του Markov για την εξοικονόμηση ενέργειας στο LTE modem των κινητών συσκευών.

## Abstract

In recent years the technology of mobile communications has grown rapidly due to the increasing demands, such as access to Internet services via mobile phones and the demands of better quality of the offered services.

This thesis, studies the Long Term Evolution (LTE) technology that is the technology for the 4th generation networks (4G). The 4th generation (4G) is the next generation of wireless communications networks that will replace the existing networks of the 3rd generation (3G) and will provide to users enhanced services with higher access speeds that the previous generation networks fail to offer. In addition to this, the LTE technology will create a global heterogeneous network that will integrate the networks of the 2nd and 3rd generation.

The mobile devices that have access to the Internet, such as eReaders, tablet PCs, smartphones and netbooks have strong market demand and for this reason an effort to minimize the energy consumption is on going, so the user does not need to recharge the device at regular intervals. Also, it is inevitable that future devices will contain LTE modems other than the common interfaces such as Wi-Fi, Bluetooth or USB, and this creates an urgent need to develop mechanisms and models that will contribute to energy efficiency in mobile devices. The aim of this work is to create a more reliable model using the LTE HARQ/ARQ process and is modeled as a Markov chain for energy savings in LTE modem for mobile devices.



## Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Ο τομέας της κινητής τηλεφωνίας είναι ένας ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας ο οποίος στις μέρες μας βρίσκεται σε στάδιο μετεξέλιξης του καθώς το πέρασμα από την τρίτη στην τέταρτη γενιά είναι πλέον γεγονός. Στη μεγάλη εξέλιξη του τομέα αυτού συμβάλουν τα μέγιστα και οι απαιτήσεις των σύγχρονων καιρών για ένα ενοποιημένο και λειτουργικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο θα είναι σε θέση να παρέχει πληθώρα υπηρεσιών στους χρήστες του.

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

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται στα εξής κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Αρχικά, γίνεται εισαγωγή στην εξέλιξη στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των ασύρματων και των ενσύρματων τηλεπικοινωνιών. Στη συνέχεια, γίνεται ιστορική αναδρομή στα προηγούμενα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται η τυποποίηση του LTE και τέλος γίνεται αναφορά στους ανταγωνιστές του, που είναι το Mobile WiMAX και το Ultra-Mobile Broadband.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στο σύστημα LTE. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας της ραδιο πρόσβασης έτσι ώστε όλες οι υπηρεσίες να στηρίζονται στην μεταγωγή πακέτων. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος (SAE) που αποτελείται από το δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN) και από το δίκτυο κορμού (EPC). Η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων αναλύεται σε User Plane (UP) και σε Control Plane (CP). Επίσης, παρουσιάζεται η δομή των ραδιο πρωτοκόλλων (Radio Interface Protocols). Επιπλέον, περιγράφονται οι διεπαφές που έχουν καθοριστεί για το EPC και τα κανάλια προκειμένου το E-UTRAN να είναι ευέλικτο και να επιτρέπει τους διάφορους τρόπους μετάδοσης δεδομένων. Τέλος, παρουσιάζεται η τεχνολογία της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (OFDM), την οποία χρησιμοποιεί το LTE για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink), δηλαδή από το σταθμό βάσης στο τερματικό σταθμό. Άλλη τεχνολογία είναι το OFDMA που βασίζεται στην ψηφιακή τεχνολογία, δηλαδή στην χρήση του Διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) και του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IDFT). Επίσης, παρουσιάζεται η τεχνολογία SC-FDMA που έχει επιλεγεί για την ανερχόμενη ζεύξη (uplink), δηλαδή από τον τερματικό σταθμό στον σταθμό βάσης και αναφέρεται σε διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης όπου υποστηρίζει πολλαπλούς χρήστες.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στον χρονοπρογραμματισμό σε ασύρματα δίκτυα, δηλαδή την διαδικασία επιλογής ενός πακέτου προς αποστολή, όπου στόχος του χρονοπρογραμματισμού είναι η ανάθεση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας σε διεργασίες ώστε να μην χάνεται χρόνος της μονάδας επεξεργασίας εν αναμονή ολοκλήρωσης των λειτουργιών I/O με περιφερειακά, και να διαμοιράζεται ο χρόνος της στις διάφορες διεργασίες του συστήματος έτσι ώστε η απόκριση του συστήματος να είναι η επιθυμητή. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στους scheduling αλγόριθμους, συγκεκριμένα στον Maximum CIR Algorithm (Mac C/I), στον Round Robin Algorithm, στον Proportional Fair Algorithm, στον HASA, στον Softer Frequency Reuse και στον RSSA. Τέλος, οι αλγόριθμοι αυτοί κατηγοριοποιούνται στα πλεονεκτήματα και στα μειονεκτήματά τους.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στην κατανάλωση ενέργειας του LTE. Αρχικά, αναλύεται η απόδοση χρονοπρογραμματισμού βασισμένη στην αναλογία μεταξύ της ακτινοβολούμενης

ισχύος και την εξυπηρέτηση της ρυθμοαπόδοσης του κελιού, ορίζοντας έναν δείκτη κατανάλωσης. Ο δείκτης αυτός δείχνει πόσο αποτελεσματικό είναι το packet scheduler από το σημείο εκπεμπόμενης ισχύος. Ένας άλλος δείκτης που δείχνει την συνολική κατανάλωση της ενέργειας συνδέεται με τον προηγούμενο δείκτη και η σχέση τους εξαρτάται από το μοντέλο ισχύος. Στη συνέχεια, μελετάται η εξοικονόμηση ενέργειας σε περιοχές που καλύπτονται από κάποιο hotspot όπως ένα εμπορικό ή επιχειρηματικό κέντρο, όπου υπάρχει μεγάλη κίνηση πληροφορίας λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών. Για να μειωθεί η συμφόρηση μελετώνται διάφορες μεθόδους. Ένας συνηθισμένος τρόπος να ελεγχθεί η περιοχή κάλυψης είναι η χρήση της διαμόρφωσης της κεραίας, όπου η βασική της παράμετρος είναι η γωνία της κεραίας (antenna downtilt). Η γωνία της κεραίας διακρίνεται σε μηχανική γωνία (MDT) και σε ηλεκτρική γωνία (EDT). Για την κάλυψη του δικτύου μπορεί να διευρυνθεί το πεδίο τομέων απόστασης από κύρια eNBs, τα οποία είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία με περιοχές κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας, με στόχο την κάλυψη των αδρανοποιημένων eNBs. Σε ένα σύστημα αδρανοποίησης και αφύπνισης υπάρχουν τρεις διαδικασίες που πρέπει να ληφθούν: η διαδικασία απόφασης της αδρανοποίησης, δηλαδή η διάρκεια του χρόνου αδρανοποίησης και η πρόγνωση της κίνησης και η χωρητικότητα του συστήματος από απόσταση, δεύτερον η διαδικασία αδρανοποίησης και τέλος η διαδικασία αφύπνισης.

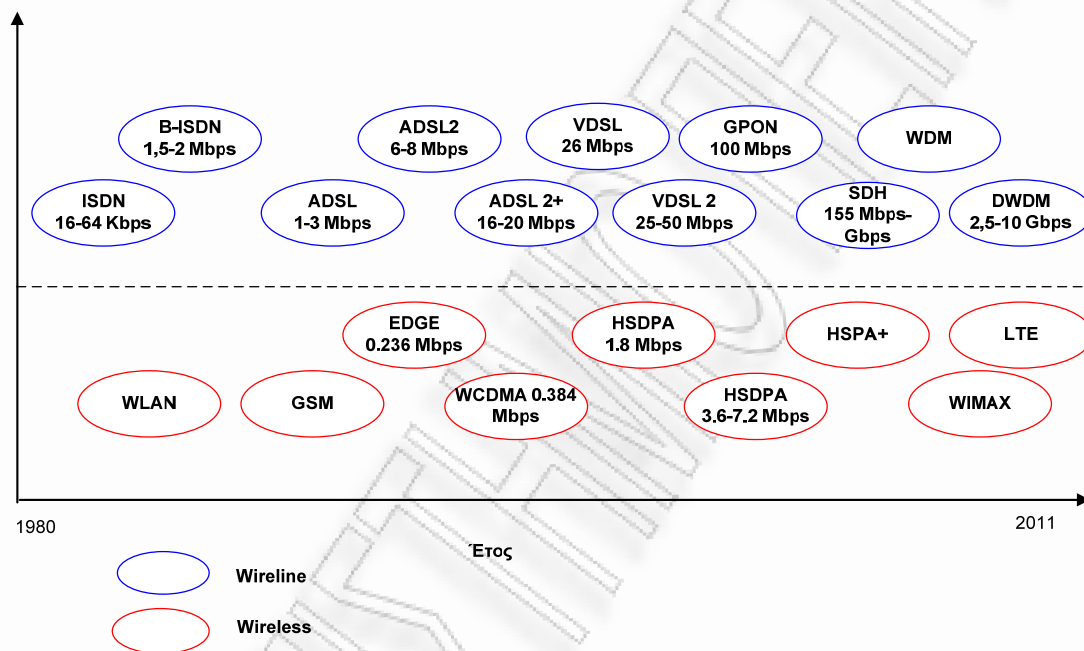
Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται αναφορά στο μοντέλο των J. Dohi και G. Fettweis, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις διαδικασίες HARQ/ARQ και το μοντελοποιούν ως μια αλυσίδα Markov για να υπολογίσουν την ενέργεια. Το νέο προτεινόμενο μοντέλο είναι πιο αξιόπιστο του προηγούμενου μοντέλου για τον υπολογισμό της κατανάλωσης της ενέργειας στο LTE modem. Όπου, η ενέργεια υπολογίζεται ως το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του νέου προτεινόμενου μοντέλου και το βέλτιστο όριο των επιτυχημένων μεταδόσεων (threshold A) για μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

## Κεφάλαιο 2 – Εξέλιξη των Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών

### 2.1 Εισαγωγή στην Εξέλιξη στο Χώρο των Τηλεπικοινωνιών

Παρ' όλο που τα ασύρματα δίκτυα ευρείας ζώνης (Wireless broadband Networks) έχουν παρουσιάσει ταχεία αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, τα ενσύρματα δίκτυα επικοινωνιών (Wireline) εξακολουθούν να παρέχουν στους χρήστες υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων. Η πορεία της εξέλιξης του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων τόσο στα ασύρματα όσο και στα ενσύρματα δίκτυα επικοινωνιών απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1



Εικόνα 2.1 Η εξέλιξη των ασύρματων και ενσύρματων δικτύων.

Το Ψηφιακό Δίκτυο Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών (ISDN) ολοκληρώθηκε το 1984 και δημιουργήθηκε για να παρέχει μια πλήρη ψηφιακή εξυπηρέτηση στους συνδρομητές των υπηρεσιών τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο. Το ISDN αντικατέστησε το αναλογικό τηλεφωνικό σε ψηφιακό σύστημα. Το σύνολο των υπηρεσιών που προσφέρονται είναι μεγάλο και περιλαμβάνει τηλευπηρεσίες, μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στους χρήστες, χωρίς το δίκτυο να αλλοιώνει το περιεχόμενο και συμπληρωματικές υπηρεσίες (αναμονή κλήσης, χειρισμός μηνυμάτων, κτλ.). Το ISDN προσφέρει δύο δυνατότητες σύνδεσης: την βασική και την πρωτεύουσα. Στη βασική σύνδεση προσφέρονται δύο ψηφιακά κανάλια B (μεταφέρουν πληροφορίες με μεταγωγή κυκλώματος ή μεταγωγή πακέτου ή μόνιμη ψηφιακή σύνδεση) των 64 kbps και ένα ψηφιακό κανάλι D (μεταγωγή πακέτου) των 16 kbps. Η πρωτεύουσα σύνδεση προσφέρει 30 κανάλια B και 1 κανάλι D των 64 kbps στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία και 23 κανάλια B και ένα κανάλι D στην Αμερική, προσφέροντας ταχύτητες E1 και T1 αντίστοιχα [1].

Το ISDN ευρείας ζώνης (B-ISDN) είναι μια επέκταση του ISDN που έχει ικανότητες μετάδοσης και στο narrowband αλλά και στο broadband [2]. Η CCITT όρισε το εξής: «Χαρακτηρίζοντας μια υπηρεσία ή ένα σύστημα που απαιτεί κανάλια μετάδοσης ικανά να στηρίζουν μεγαλύτερα ποσοστά από το αρχικό ποσοστό» [3] που αναφέρονται στο αρχικό ποσοστό που κυμαίνεται περίπου από 1,5 έως 2 Mbps. Ο σχεδιασμός της τεχνολογίας για το B-

ISDN ήταν για ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM), το οποίο επρόκειτο να φέρει τη σύγχρονη φωνή και τις ασύγχρονες υπηρεσίες δεδομένων στην ίδια μεταφορά [4]. Η τεχνολογία ATM βρίσκεται ως χαμηλού επιπέδου στρώμα στις περισσότερες DSL τεχνολογίες, και ως ωφέλιμο φορτίο τύπου σε ορισμένες ασύρματες τεχνολογίες όπως η WiMAX.

Η ψηφιακή γραμμή συνδρομητή (DSL) παρέχει πρόσβαση στο Διαδίκτυο, υψηλών ταχυτήτων, διαμέσου υπαρχόντων τηλεφωνικών γραμμών κατασκευασμένων από χαλκό.

Η Ασύμμετρη Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή (ADSL) είναι μια μορφή DSL, δηλαδή μια τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων που λειτουργεί πάνω σε παραδοσιακή τηλεφωνική γραμμή αλλά πετυχαίνει υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς από τα παραδοσιακά modem.

Εξειλιγμένες εκδόσεις του ADSL είναι το ADSL2 και το ADSL2+, οι οποίες παρέχουν μεγαλύτερες ταχύτητες αξιοποιώντας διαφορετικά το εύρος ζώνης του καλωδίου. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτύχει το ADSL2+ είναι τα 24 Mbps, αλλά στην πράξη πολύ λίγοι χρήστες μπορούν να συνδεθούν σε αυτές τις ταχύτητες, λόγω της απόστασής τους από το τηλεφωνικό κέντρο [5].

Η τεχνολογία Very-High-Bitrate DSL (VDSL ή VHDSL) είναι μια DSL τεχνολογία που προσφέρει γρηγορότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από τα ADSL και ADSL2+. Το πετυχαίνει αυτό χρησιμοποιώντας FTTN ή FTTC αρχιτεκτονική, δηλαδή ο εξοπλισμός (DSLAM) τοποθετείται σε επίπεδο γειτονιάς (συνήθως στα ΚΑΦΑΟ). Οι μέγιστες ταχύτητες που παρέχει το VDSL είναι τα 26 Mbps συμμετρικά, ή τα 52 Mbps ασύμμετρα. Αυτές οι ταχύτητες επιτυγχάνονται σε απόσταση έως 300 μέτρα.

Η βελτιωμένη έκδοση του VDSL είναι η VDSL2. Παρέχει ταχύτητες πάνω από 200 Mbps σε πολύ μικρή απόσταση, 100 Mbps στα 500 μέτρα και 50 Mbps στο 1 χιλιόμετρο. Σε μεγαλύτερη απόσταση οι επιδόσεις του μειώνονται με πολύ πιο αργούς ρυθμούς από του VDSL. Μετά τα 1,6 χιλιόμετρα οι επιδόσεις του είναι αντίστοιχες του ADSL2+. Το γεγονός ότι το VDSL2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για αποστάσεις έως 4-5 χιλιόμετρα, σε αντίθεση με το VDSL που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μικρές αποστάσεις, είναι πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του VDSL2 [5].

Η διαδεδομένη χρήση των οπτικών ινών στο τηλεφωνικό δίκτυο και η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες έχει οδηγήσει στην ευρεία αποδοχή του Σύγχρονου Οπτικού Δικτύου (SONET) σαν μέσο μεταφοράς της πληροφορίας με ψηφιακό τρόπο. Οι ρυθμοί μετάδοσης στο SONET ακολουθούν τη Σύγχρονη Ιεραρχία Μεταφοράς (SDH) [1]. Το SDH είναι ένα πρότυπο τεχνολογίας για την σύγχρονη μετάδοση δεδομένων σε οπτικά μέσα και είναι διεθνές ισοδύναμο του SONET [5], [6]. Το SONET χρησιμοποιείται στην Αμερική και Ιαπωνία, ενώ το SDH χρησιμοποιείται στην Ευρώπη. Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιεί το STM: STM-1 με 155 Mbps, το STM-4 με 622 Mbps, το STM-16 με 2.5 Gbps, και το STM-64 με 10 Gbps [6].

Στις οπτικές ίνες επικοινωνίας, το Μήκος Κύματος Πολυπλεξία (WDM) είναι μια τεχνολογία που πολυπλέκει μια σειρά οπτικών φορέων σημάτων σε μια ενιαία οπτική ίνα χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος (χρώματα) του laser. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία πάνω από ένα σκέλος ινών, καθώς και τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας.

Η Πυκνή Πολύπλεξη στο Πεδίο του Μήκους Κύματος (DWDM) είναι η επέκταση της τεχνολογίας WDM. Η DWDM περιέχει περισσότερα κανάλια, μεγαλύτερη χωρητικότητα σε εύρος ζώνης, οι ταχύτητες κυμαίνονται από 2,5 έως 10Gbps ανά σήμα και τα μήκη κύματος φωτός είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

Το παθητικό οπτικό δίκτυο (PON) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που φέρνει ίνες καλωδίωσης και σήματα στο σπίτι χρησιμοποιώντας ένα σύστημα point-to-multipoint που επιτρέπει σε μια ενιαία οπτική ίνα να εξυπηρετήσει πολλαπλούς χώρους. Η κρυπτογράφηση διατηρεί τα δεδομένα με ασφάλεια στο περιβάλλον. Η αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί παθητικούς (μη αυτοκινούμενους) οπτικούς διαχωριστές, μείωση του κόστους του εξοπλισμού σε σχέση με τις αρχιτεκτονικές point-to-point. Το Gigabit παθητικό οπτικό δίκτυο (GPON) πρότυπο, διαφέρει από τα άλλα πρότυπα PON στο ότι επιτυγχάνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και υψηλότερη απόδοση με μεγαλύτερο μεταβλητό μήκος πακέτων. Το GPON προσφέρει αποτελεσματικό packaging της κίνησης των χρηστών, με διαχωρισμό πλαισίων που επιτρέπει υψηλότερη

ποιότητα υπηρεσιών (QoS) για την καθυστέρηση-ευαίσθητης φωνής και κίνησης βίντεο των επικοινωνιών [7].

Τα ασύρματα LAN (WLAN) παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε μια μικρή περιοχή, με κινητικότητα χρηστών. Τα συστήματα τοπικής ασύρματης δικτύωσης λειτουργούν στις ζώνες ISM στα 2.4 GHz και στα 5.8 GHz, καθώς και στη ζώνη των 5.2 GHz, με κάποιες παραλλαγές ανά γεωγραφική περιοχή. Η λειτουργία στις ISM ζώνες δεν προϋποθέτει αδειοδότηση, αλλά στην ίδια ζώνη συχνοτήτων μπορεί να λειτουργούν παρόμοια συστήματα, αυξάνοντας την πιθανότητα παρεμβολών. Για το λόγο αυτό τα WLAN συστήματα στις ISM ζώνες πρέπει να εκπέμπουν με περιορισμένη ισχύ ανά μονάδα εύρους ζώνης και για να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές διασποράς φάσματος. Αντίθετα, η ζώνη των 5.2 GHz είναι αδειοδοτημένη για χρήση WLAN στις περισσότερες χώρες, με αποτέλεσμα τα προβλήματα παρεμβολών σχεδόν να εκλείπουν [8].

Το GSM είναι το πιο επιτυχημένο σύστημα δεύτερης γενιάς. Ξεκίνησε ως ένα ευρωπαϊκό σύστημα αλλά τελικά υιοθετήθηκε παγκοσμίως. Μόνο στην Αμερική το GSM δεν διαδόθηκε. Παρόλα αυτά, το 2001 η βορειοαμερικανική κοινότητα για την Time Division Multiple Access (TDMA) αποφάσισε να υιοθετήσει το σύστημα Wideband CDMA (WCDMA) που ορίστηκε από το Third Generation Partnership Project (3GPP). Προκειμένου να προετοιμαστούν για το WCDMA πολλές αμερικάνικες εταιρίες που χρησιμοποιούσαν το D-AMPS και έχουν υιοθετήσει ήδη το σύστημα GSM/GPRS. Παρόλο που το σύστημα αυτό ήταν αρκετά αποδοτικό σε αραιοκατοικημένες και παράκτιες περιοχές, το πρότυπο GSM-400 δε χρησιμοποιείται πλέον [9], [10].

Μια βελτίωση του GSM προκειμένου να εξελιχθεί σε ένα δίκτυο γενιάς 2,5 είναι η Eight-Phase Shift Keying (EDGE). Το EDGE είναι μία τεχνική διαμόρφωσης 8-PSK. Η τεχνική αυτή επηρεάζει μόνο το λογισμικό των σταθμών βάσης και προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από το βασικό ρυθμό μετάδοσης του GSM [11].

Η τεχνολογία HSDPA αναπτύχθηκε με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος UMTS, κυρίως όσον αφορά στη χρήση τους για παροχή υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων, και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες. Βασίζεται στο σχήμα πρόσβασης WCDMA με εύρος ζώνης 5MHz.

Η τεχνολογία HSPA+ είναι εξέλιξη του HSPA και αποτελεί μέρος της έκδοσης 7 της 3GPP. Αναπτύχθηκε με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση των πόρων του συστήματος HSPA, κυρίως στο δίκτυο κορμού μέσω της πλήρους διανομής υπηρεσιών μέσω του τομέα packet-switched, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ποιότητα των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων. Στην HSPA+ αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες και μειώνεται το latency.

Το WiMAX αποκαλείται η τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία λειτουργεί με παρεμφερή τρόπο με το Wi-Fi, ωστόσο με πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια. Συγκεκριμένα, ενώ το Wi-Fi εξασφαλίζει εμβέλεια επικοινωνίας μέχρι 100 μέτρα, το WiMax φθάνει τα 35 χιλιόμετρα ή και παραπάνω. Το Mobile WiMAX βασίζεται στο πρωτόκολλο 802.16e-2005. Σε ιδανικές συνθήκες το WiMAX αποδίδει ταχύτητα της τάξεως των 70 Mbit/s σε απόσταση 48 χιλιομέτρων [5].

Το Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) βασίζεται στην τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA). Η W-CDMA είναι η τεχνολογία με την οποία κωδικοποιούνται και αποκωδικοποιούνται τα δεδομένα. Βασίζεται στην τεχνολογία CDMA. Ενώ η UMTS τεχνολογία συνδιάζει 3G και GSM.

Η τεχνολογία Long Term Evolution (LTE) είναι η επόμενη γενιά των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών που θα αντικαταστήσει τα υπάρχοντα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) και θα προσφέρει στους χρήστες βελτιωμένες υπηρεσίες με μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης, όσα δηλαδή δεν κατάφεραν να προσφέρουν τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Η τεχνολογία αυτή αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι ενσύρματες και οι ασύρματες τεχνολογίες θα έχουν περαιτέρω εξέλιξη στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στο εγγύς μέλλον, προσφέροντας ρυθμό μετάδοσης σε επίπεδο Tbps.

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών θα πρέπει να αυξήσουν το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Οι ασύρματες τεχνολογίες έχουν το τεράστιο πλεονέκτημα να είναι σε θέση να προσφέρουν την ευρυζωνική πρόσβαση, ανεξάρτητα από τη θέση του χρήστη, και τη κινητικότητα. Μια ασύρματη λύση μπορεί επίσης να παρέχει χαμηλού κόστους ευρυζωνική κάλυψη σε σύγκριση με τις νέες ενσύρματες εγκαταστάσεις, εφόσον δεν υπάρχει καμία υπάρχουσα ενσύρματη υποδομή. Ως εκ τούτου, η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση αποτελεί μια ελκυστική επιλογή, ειδικά σε νέες αναπτυσσόμενες αγορές σε αστικές καθώς και σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές.

## 2.2 Εξέλιξη της Ασύρματης Τεχνολογίας

### 2.2.1 Οι Γενιές πριν την Εξέλιξη του LTE

Τα πρώτα επίγεια τηλεφωνικά συστήματα εγκαταστάθηκαν το 1946. Αν και η δυνατότητα να γίνει μια τηλεφωνική συνομιλία από ένα αυτοκίνητο κέρδισε γρήγορα τη προσοχή του κοινού, οι περιορισμοί της τεχνολογίας καθώς επίσης και η έλλειψη φάσματος συχνοτήτων έκαναν την υπηρεσία των κινητών τηλεφώνων σπάνια και μάλλον ακριβή πολυτέλεια. Η εμφάνιση των πρώτων κυψελωτών συστημάτων, δηλαδή τα 1G στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την Ιαπωνία το 1980 έδειξε τη βιωσιμότητα της κυψελοειδούς τεχνολογίας και την εκρηκτική απαίτηση για ασύρματες υπηρεσίες [12]. Η πρώτη γενιά χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής μετάδοσης για την κίνηση η οποία ήταν μόνο φωνή.

Υπήρξαν διάφορα πρότυπα όπως:

- Total Access Communication System (TACS)
- Advanced Mobile Phone Service (AMPS)
- Nordic Mobile Telephone (NMT).

Η δεύτερη γενιά, η αλλιώς 2G είναι η εξέλιξη από την αναλογική μετάδοση της κίνησης στην ψηφιακή. Τα συστήματα 2G έχουν πολύ ευρύτερες δυνατότητες από αυτά τα 1G συστήματα. Ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς χρήστες (είτε με διαίρεση χρόνου είτε με διαίρεση κώδικα). Επιπλέον χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κυψελών, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε macrocells (κυψέλες μεγάλης έκτασης), microcells (κυψέλες μικρής έκτασης) και picocells (κυψέλες περιορισμένης έκτασης κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα), με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων.

Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρουμε ότι υπάρχουν πολλά δίκτυα 2ης γενιάς που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία [5], αν και η εξέλιξη στις τηλεπικοινωνίες έχει εστιαστεί στα κινητά δίκτυα τρίτης και τέταρτης γενιάς.

Τα πρότυπα είναι:

- Global System for Mobile (GSM) communications,
- Digital AMPS (D-AMPS)
- Code Division Multiple Access (CDMA) IS-95
- Personal Digital Cellular (PDC).

Αρχικά οι ρυθμοί μετάδοσης στον αέρα του GSM ήταν χαμηλοί περίπου στα 9,6 Kbps, παρ'όλο που έφτασαν αργότερα τα 14,4 Kbps και δεν χρησιμοποιήθηκαν ευρέως.

Η επόμενη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνιών, η 2,5G και αποτελείται από τις τεχνολογίες:

- High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD),
- General Packet Radio Services (GPRS)
- Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE).

Με την χρήση της τεχνολογίας HSCSD ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί, αντί για μία, περισσότερες χρονοσχισμές (timeslots) για μία σύνδεση μεταφοράς δεδομένων. Έτσι, για αυτόν τον χρήστη, ο ρυθμός μετάδοσης είναι το γινόμενο των χρονοσχισμών επί το ρυθμό μετάδοσης για μία χρονοσχισμή. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι σχετικά απλή και φθηνή. Το βασικότερο μειονέκτημα που αντιμετωπίζει είναι η χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Αυτός ο τρόπος μεταγωγής είχε ως αποτέλεσμα τη σπατάλη πόρων του δικτύου αφού οι χρονοσχισμές δεσμεύονται ακόμα και όταν η χωρητικότητά τους δεν χρησιμοποιείται. Με την τεχνολογία GPRS μπορούν να επιτευχθούν ρυθμοί μετάδοσης των 115 Kbps ή και ακόμα μεγαλύτεροι αν αγνοηθεί η διόρθωση σφαλμάτων. Αυτό που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι η

τεχνολογία GPRS χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτου. Επομένως, δεσμεύει τους πόρους του δικτύου μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή/λήψη δεδομένων. Η υλοποίηση του GPRS είναι αρκετά πιο ακριβή από αυτή του HSCSD. Από την άλλη μεριά το HSCSD συμπεριφέρεται με μεγαλύτερη συνέπεια σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Παρόλα αυτά, η τεχνολογία GPRS προσφέρει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την αποστολή δεδομένων μέσω των κινητών δικτύων. Είναι σίγουρο πλέον πως η αύξηση της κίνησης δεδομένων στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, καθιστά την GPRS τεχνολογία αναπόσπαστο στοιχείο ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας [13], [14]. Τέλος, η τεχνολογία EDGE είναι μία τεχνική διαμόρφωσης που ονομάζεται Eight-Phase Shift Keying (8-PSK). Αυτή η τεχνική επηρεάζει μόνο το λογισμικό των σταθμών βάσης και προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από το βασικό ρυθμό μετάδοσης του GSM. Επιπλέον, μπορεί να συνυπάρξει με την τεχνική διαμόρφωσης Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) η οποία χρησιμοποιείται στη βασική έκδοση του GSM.

Η τρίτη γενιά, η 3G των κινητών επικοινωνιών, είναι γνωστή ως Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) [15] στην Ευρώπη και Code Division Multiple Access (CDMA2000) στην Αμερική. Το εύρος ζώνης ανά χρήστη στα δίκτυα 3G μεταβάλλεται από 384 Kbps έως 2 Mbps και παρέχει την δυνατότητα μετάδοσης πολυμεσικής πληροφορίας, δηλαδή κινούμενης εικόνας σε συνδυασμό με πολυκάναλο ήχο. Στόχος της ανάπτυξης της τρίτης γενιάς κινητών επικοινωνιών είναι η παροχή των κινητών υπηρεσιών στον χρήστη δικτύων κινητής τηλεφωνίας να επιτρέποντας του να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη από συστήματα 3G αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Ο χρήστης θα μπορεί να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα. Τα επικρατέστερα, προς το παρόν, συστήματα τρίτης γενιάς είναι:

- UMTS (Ευρώπη)
- CDMA2000
- NTT Docomo (Ιαπωνία).

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

Η HSPA αποτελεί μία νέα τεχνολογία η οποία σχεδιάστηκε προκειμένου να αυξήσει τη χωρητικότητα καταρχάς της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) και σε δεύτερη φάση της ανερχόμενης ζεύξης (uplink) στα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Το γεγονός αυτό θεωρήθηκε απαραίτητο καθώς, στην πράξη, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης για τα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς αποδείχθηκαν χαμηλοί για πολυμεσικές εφαρμογές. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου ο αριθμός των χρηστών πολυμεσικών εφαρμογών στην ίδια κυψέλη ήταν μεγάλος, η απόδοση του δικτύου στη συγκεκριμένη κυψέλη μειωνόταν ραγδαία [16]. Το πρότυπο HSPA αναφέρεται σε βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο στην κατερχόμενη ασύρματη ζεύξη, μέσω του High Speed Downlink Packet Access (HSDPA), όσο και στην ανερχόμενη, μέσω του High Speed Uplink Packet Access (HSUPA). Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο το HSDPA όσο και το HSUPA μπορούν να υλοποιηθούν στο ίδιο εύρος ζώνης με το UMTS (5 MHz), γεγονός που επιτρέπει την παράλληλη λειτουργία τόσο του HSPA όσο και του κλασικού UMTS. Το HSDPA, προτάθηκε στην έκδοση 5 του προτύπου 3GPP [12] (ανακοινώθηκε το 2003 και υλοποιήθηκε το 2005) και υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης έως και 14.4 Mbps ανά χρήστη. Αναφορικά με τον ανερχόμενο ασύρματο σύνδεσμο, το HSUPA εισήχθη στην έκδοση 6 του 3GPP στάνταρ δίνοντας τη δυνατότητα υποστήριξης μέχρι και 5.8 Mbps μέσω ενός αφιερωμένου καναλιού στην ανερχόμενη ζεύξη [16].

Η βασική ιδέα του HSPA είναι η προσθήκη ενός νέου τύπου ευρυζωνικού καναλιού το οποίο θα είναι βελτιστοποιημένο για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πρόκειται για το κανάλι High



Speed - Downlink Shared Channel (HS-DSCH) το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ρυθμαπόδοσης (throughput) μόνο της κατερχόμενης ζεύξης. Στο κανάλι αυτό έχουν ενσωματωθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων του όσο αφορά στο ρυθμό μετάδοσης. Προφανώς, η τεχνική HSPA δεν είναι κατάλληλη για όλα τα είδη υπηρεσιών. Για παράδειγμα, δεν παρέχει εγγυήσεις για την καθυστέρηση και συνεπώς δεν ενδείκνυται για απαιτητικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν αφιερωμένα κανάλια (Dedicated Channel). Αντίθετα, η χρήση του HSPA ενδείκνυται προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου σε σημεία με υψηλή κίνηση δεδομένων [17], [18]. Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HSPA συγκαταλέγονται οι αυξημένες ταχύτητες για τους τελικούς χρήστες, η αυξημένη αλληλεπίδραση των υπηρεσιών καθώς και η παροχή υψηλής χωρητικότητας του δικτύου προς όφελος κυρίως των παρόχων. Η μείωση των καθυστερήσεων μετάδοσης, παράλληλα με τις αυξημένες πλέον ταχύτητες μετάδοσης στο ασύρματο μέσο, συμβάλουν στη παροχή μίας μεγάλης γκάμας πολυμεσικών εφαρμογών. Παρόλα αυτά, η αύξηση της χρήσης των κινητών δεδομένων και η εμφάνιση νέων εφαρμογών, όπως το Multimedia Online Gaming, η ενισχυμένη μετάδοση video/MP3 streaming, το video telephony, το video conferencing, mobile TV, το Web 2.0, έδωσαν κίνητρο στην 3rd Generation Partnership Project (3GPP) να εργαστεί για την ανάπτυξη του LTE. Το LTE είναι το τελευταίο πρότυπο στην περιοχή των δικτύων κινητής επικοινωνίας (που στο παρελθόν πραγματοποίησε τις GSM / EDGE και UMTS / HSxPA net –τεχνολογίες, οι οποίες σήμερα αντιπροσωπεύουν πάνω από το 85% του συνόλου των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας) και σκοπός του είναι οι κινητοί χρήστες να έχουν πλέον τη δυνατότητα να απολαμβάνουν υπηρεσίες που μέχρι τώρα παρέχονταν μόνο σε χρήστες με ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Το πρότυπο 3G/UMTS υιοθετήθηκε αρχικά στην 3GPP Release '99, στην Release 5 πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή του HSDPA, στην Release 6 η εισαγωγή του HSUPA, ενώ μέσω της Release 7 φθάνουμε στο πρότυπο LTE που περιγράφεται και αναλύεται στις εκδόσεις 8 και 9 του 3GPP. Στο επόμενο εδάφιο γίνεται αναλυτική αναφορά στη νέα αυτή τεχνολογία.

### 2.2.2 Η τυποποίηση του LTE

Το σύστημα Long Term Evolution (LTE) ή 4G ή δίκτυο B3G (Beyond 3G) ή All-IP ασύρματο δίκτυο σχεδιάστηκε εξ αρχής με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας της ραδιοπρόσβασης (radio access) έτσι ώστε όλες οι υπηρεσίες να στηρίζονται στη μεταγωγή πακέτων (packet switched) και όχι στη μεταγωγή κυκλώματος (circuit switched), όπως τα προϋπάρχοντα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Ως προς την αρχιτεκτονική του δικτύου, το LTE αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης και ονομάζεται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) [19] **Error! Reference source not found.**, ενώ η εξέλιξη των συστατικών στοιχείων του δικτύου που δεν αποτελούν τη ράδιο-διεπαφή (non-radio aspects) καλύπτονται από τον όρο Εξέλιξη Αρχιτεκτονικής Συστήματος (System Architecture Evolution -SAE) ο οποίος περιλαμβάνει και τον πυρήνα του εξελιγμένου πακέτου (Evolved Packet Core -EPC) δικτύου. Οι δύο όροι LTE και SAE συνθέτουν το πακέτο εξελιγμένου συστήματος (Evolved Packet System - EPS).

Χαρακτηριστικά του δικτύου όπως η επίπεδη αρχιτεκτονική (flat architecture) καθώς και η χρήση της μεταγωγής πακέτων και του IP πρωτοκόλλου (Internet Protocol) για την επικοινωνία, συμβάλλουν καθοριστικά στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί, δηλαδή η βελτίωση της ρυθμαπόδοσης και η μείωση της καθυστέρησης σε επίπεδο χρήστη, η καλύτερη αντιμετώπιση της κινητικότητας και η υποστήριξη handover ακόμα και σε άλλες σταθερής γραμμής ή ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης.

Μεγάλη σημασία στην εκπλήρωση των απαιτήσεων του δικτύου έχουν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε φυσικό επίπεδο. Η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) και η Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) περιορίζουν την πολυπλοκότητα του συστήματος και του εξοπλισμού των χρηστών (User Equipment), επιτρέπουν ευέλικτη ανάπτυξη του υπάρχοντα ραδιοφάσματος ή των νέων φασμάτων συχνοτήτων και κάνουν πιο εύκολη τη συνύπαρξη του με άλλες τεχνολογίες 3GPP Radio Access Technologies (RATs) [20].

Το LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση υποστήριξης και μετάδοσης μεταγωγής του πακέτου (packet-switched) εφαρμογών, όπως είναι οι πολυμεσικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους προκειμένου να ξεπεράσει τα όρια των 14.4 Mbps και 5.8 Mbps που επιτυγχάνονται στο HSDPA και HSUPA αντίστοιχα. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE [20], [21], [22] είναι:

- **Εύρος Ζώνης:** Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (1.5 MHz και 2.5 MHz) για επιπλέον ευελιξία.
- **Ρυθμοί Μετάδοσης:** Επίτευξη μέγιστου ρυθμού μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στην κατερχόμενη και 50 Mbps στην ανερχόμενη ζεύξη για εύρος ζώνης ίσο με 20 MHz.
- **Κατάσταση Λειτουργίας:** Λειτουργία του LTE τόσο σε FDD όσο και TDD mode.
- **Ρυθμοαπόδοση:** Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερου μέσου throughput χρήστη ανά MHz στην κατερχόμενη και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερη για την ανερχόμενη ζεύξη συγκριτικά με τις εκδόσεις 6 και 7 του 3GPP προτύπου (HSDPA και HSUPA).
- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με την έκδοση 6 του 3GPP προτύπου (HSDPA).
- **Καθυστέρηση:** Σημαντική μείωση της καθυστέρησης από το χρήστη έως το σταθμό βάσης (round-trip delay) στα 5ms -10ms.
- **Κινητικότητα:** Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χλμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- **Διαλειτουργικότητα:** Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με πρότυπα επικοινωνιών πέραν του 3GPP καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/GERAN συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας:** Υποστήριξη από άκρο της ποιότητας υπηρεσίας (QoS), για την υποστήριξη απαιτητικών σε QoS υπηρεσίες όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

Για να πετύχει τους στόχους του το LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Η OFDM είναι μια από τις κύριες τεχνολογίες που υιοθετεί το LTE, διότι ως μοντέλο διαμόρφωσης για το LTE έχει την μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε παρεμβολές και εξασθένηση σήματος [21], [23].

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

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

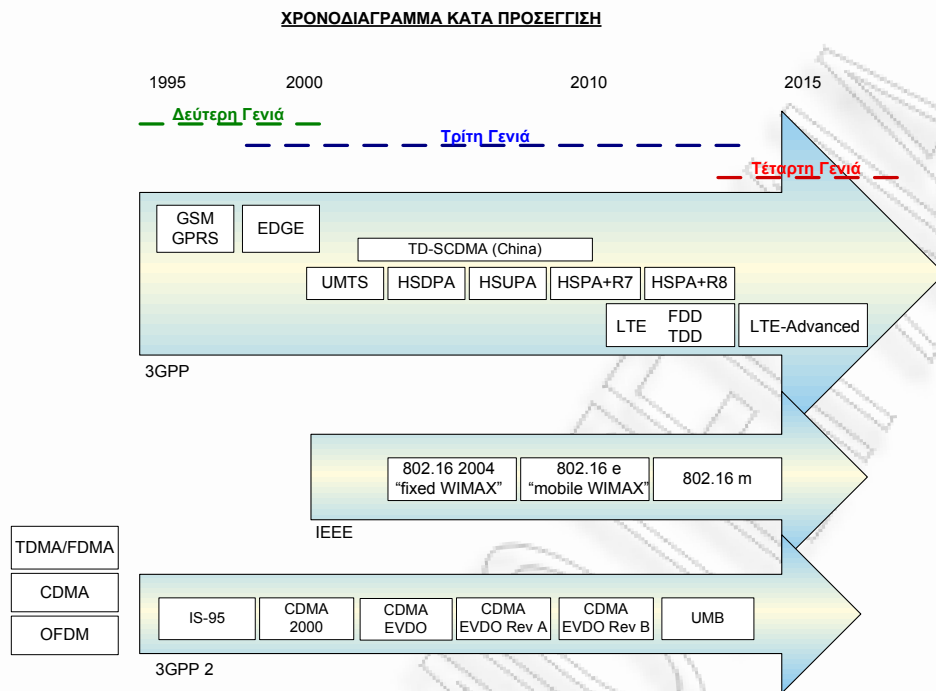
Τέλος, μια ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα στο LTE είναι η MIMO τεχνική. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό-σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-συσκευή του χρήστη. Για την περίπτωση του LTE, σε πρώτη φάση η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραιές στο σταθμό βάσης και δύο κεραιές στη συσκευή του χρήστη) θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Σε μεταγενέστερη φάση ανάπτυξης είναι δυνατόν να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4. Στο MIMO διακρίνουμε δύο διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Το Spatial Multiplexing (στο οποίο η πληροφορία διαχωρίζεται σε stream τα οποία μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές κεραιές) και το Transmit Diversity.

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

- Μετάδοση υψηλής ποιότητας περιεχόμενου σε πραγματικό χρόνο – Υπηρεσίες αποθήκευσης ήχου και εικόνας (Video and Audio stream services): τηλεόραση, ραδιόφωνο. Το μεταδιδόμενο περιεχόμενο μπορεί να μεταφέρεται σε πραγματικό χρόνο ή να είναι αποθηκευμένο και να αναμεταδίδεται, και
- Υπηρεσίες παρεχόμενες/διαφοροποιούμενες ανά εντοπισμένη περιοχή εξυπηρέτησης (Localized services) - δυνατότητα συνδυασμού εθνικών και τοπικών προγραμμάτων τηλεόρασης ή άλλου περιεχομένου ευρυεκπομπής ανά γεωγραφική περιοχή, ευρυεκπομπή τουριστικού περιεχομένου (video-clips, διαφημίσεις) με πληροφορίες για φεστιβάλ, εστιατόρια, ξενοδοχεία, μουσεία [16], [22].

### 2.2.3 Ανταγωνιστές του LTE

Οι ανταγωνιστές του LTE είναι το Mobile WiMAX και το Ultra-Mobile Broadband (UMB). Το ερευνητικό πεδίο που σχετίζεται με το πρότυπο LTE εξελίσσεται και σύντομα θα επηρεάσει την αγορά. Η χρονική εξέλιξη [22], [24] των τριών ανταγωνιστικών προτύπων 3GPP, 802.16 και 3GPP2 απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2



**Εικόνα 2.2. Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των κινητών προτύπων**

Το 3GPP2 δεν πρέπει να συγχέεται με το 3GPP. Το 3GPP είναι το κύριο πρότυπο πίσω από το παγκόσμιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών (UMTS), που είναι η αναβάθμιση σε 3G δίκτυα GSM. Το 3GPP2 είναι το κύριο πρότυπο πίσω από το ανταγωνιστικό πρότυπο 3G CDMA 2000 όπου είναι η αναβάθμιση σε 3G CDMA των δικτύων που χρησιμοποιούνται επί το πλείστον στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε κάποιο βαθμό στην Ιαπωνία, στην Κίνα, στην Νότια Κορέα και στην Ινδία.

Το LTE έχει αρκετές ομοιότητες με το WiMAX και σε αρκετά τμήματα υιοθετεί τις ίδιες τεχνολογικές προσεγγίσεις με το WiMAX, όπως είναι η χρήση της τεχνικής OFDMA, των εξελιγμένων συστημάτων κεραιών και το δυναμικά μεταβαλλόμενο εύρος ζώνης. Η διαφορά των δύο προτύπων βρίσκεται στην άνω ζεύξη, όπου το LTE χρησιμοποιεί τεχνολογία μονής φέρουσας, με σκοπό να μειώσει το λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ του επιθυμητού σήματος (PAPR). Το οικονομικό όφελος για έναν πάροχο δικτύου θα είναι πολύ μεγάλο, αφού το κόστος ανάπτυξης ενός δικτύου WiMAX είναι πολύ υψηλότερο από το κόστος μετατροπής ενός δικτύου UMTS σε δίκτυο LTE [8].

## Κεφάλαιο 3 – Long Term Evolution (LTE)

### 3.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Σε προηγούμενη ενότητα 2.2.2 αναφέραμε την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου, της ραδιοπρόσβασης (E-UTRAN) και των συστατικών στοιχείων του δικτύου που δεν αποτελούν τη ραδιο-διεπαφή (EPC) που συνθέτουν την αρχιτεκτονική του συστήματος (EPS). Η παρακάτω εικόνα 3.1 περιγράφει την απλοποιημένη μορφή του EPS με μεγαλύτερη εστίαση στις E-UTRAN/EPC αλληλεπιδράσεις, στη σηματοδότηση χρηστών, στη σύνδεση δεδομένων και στους αρχιτεκτονικούς τομείς.

Παρατηρούμε στην εικόνα 3.1 ότι ο τομέας E-UTRAN αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών βάσεων (eNodeBs ή αλλιώς eNBs).

Οι eNBs συνδέονται μέσω της διεπαφής X2, η οποία φαίνεται σαν πολυμεσική διεπαφή από ότι σαν ένα point to point ανάμεσα σε δύο κόμβους eNodeB. Ο σκοπός της διεπαφής X2 είναι να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια πακέτων λόγω της κινητικότητας του χρήστη.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι, ο τομέας EPC αποτελείται από τα Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (S-GW) και Packet Data Network Gateway (P-GW ή PDN GW). Η MME είναι ο βασικός κόμβος για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο [16], [23]. Η S-GW δρομολογεί και προωθεί όλα τα πακέτα IP του χρήστη και ενεργεί ως συντονιστής κινητικότητας για τους φορείς δεδομένων όταν ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment ή αλλιώς UE) κινείται μεταξύ των κόμβων. Ο UE είναι συσκευή, την οποία χρησιμοποιεί ο τελικός χρήστης για επικοινωνία. Η P-GW παρέχει την δυνατότητα δρομολόγησης του EPS με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων και ενεργεί ως σημείο IP της σύνδεσης για τον UE.

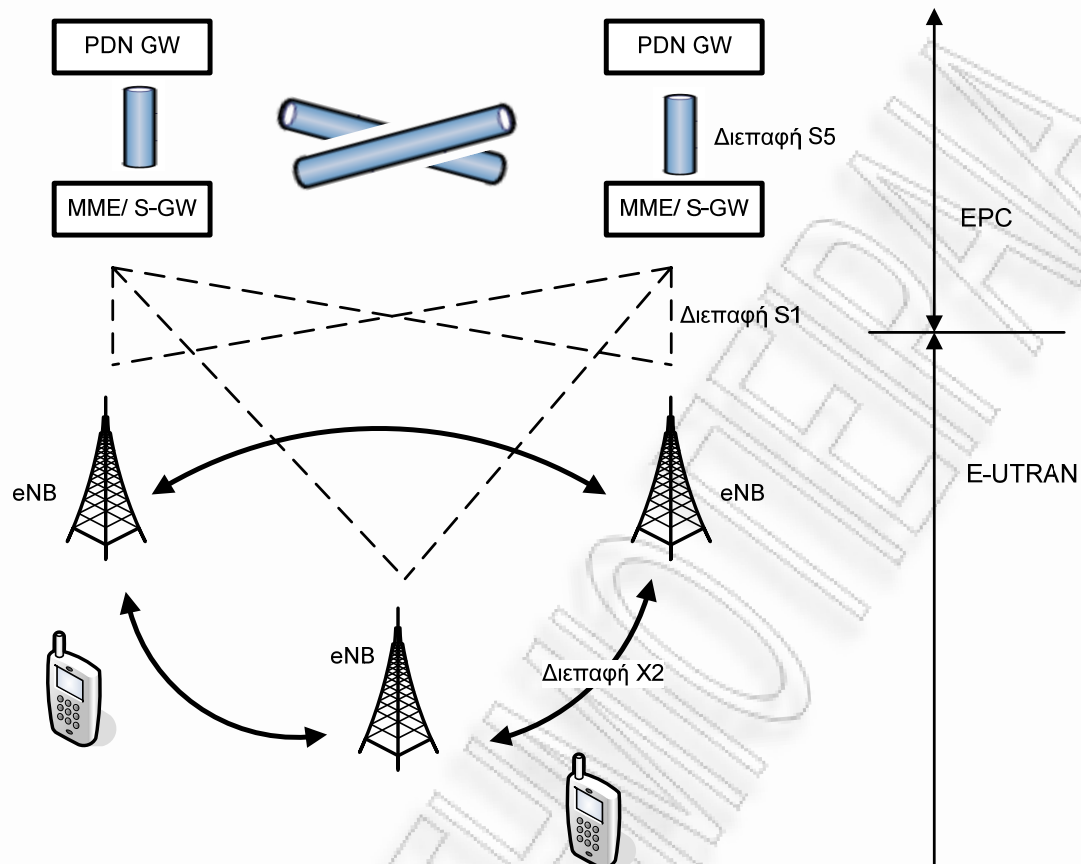
Η διεπαφή S5 συνδέει ένα S-GW σε διαφορετικά PDN GW για παροχή διαφορετικών υπηρεσιών IP για το UE.

Επομένως, ο τομέας EPC παρέχει συνδεσιμότητα χρήστη σε πολλά διαφορετικά χωριστά IP δίκτυα [21].

Η σύνδεση των δύο τομέων (E-UTRAN και EPC) γίνεται μέσω της διεπαφής S1. Η διεπαφή S1 δεν φαίνεται σαν μια απλή διεπαφή ανάμεσα σε ένα eNodeB και ένα MME/Serving GW καθώς ένα eNodeB μπορεί να συνδέεται με περισσότερο από ένα MME. Η ευελιξία αυτή είναι γνωστή ως S1-flex (ένα ισοδύναμο του Iu-flex 3G/UMTS). Όταν τα MME και Serving GW αναπτύσσονται χωριστά, η διεπαφή S1 αποτελείται από τα δύο παρακάτω μέρη:

- Το S1-U για User plane μεταφέρει δεδομένα χρήστη ανάμεσα των eNodeB και Serving GW.
- Το S1-C για Control plane είναι μια σηματοδότηση μονής διεπαφής ανάμεσα των eNodeB και MME.

Επομένως, το EPS αποτελείται (α) από το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN που συντελείται από ένα μοναδικό στοιχείο το eNodeB, ο οποίος συνδέεται με User Equipment (UE) και (β) από το δίκτυο κορμού EPC που αποτελείται από λογικές οντότητες. Οι οντότητες συνδέονται από τις διεπαφές, όπου απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα. Στη συνέχεια των επόμενων υποεννοτήτων περιγράφεται με περισσότερη λεπτομέρεια η αρχιτεκτονική του συστήματος.



Εικόνα 3.1. Αρχιτεκτονική EPS συνδεσιμότητα user και control plane.

### 3.1.1 Δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE, E-UTRAN αποτελείται από ένα δίκτυο eNodeBs, όπως απεικονίζεται στην προηγούμενη εικόνα. Ο evolved NodeB είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει όλες τις ραδιολειτουργίες που συνδέονται με το σταθερό μέρος του συστήματος και κατανέμονται συνήθως σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων. Για μια κανονική χρήση δεν υπάρχει κανένας κεντρικός ελεγκτής σε E-UTRAN, επομένως η αρχιτεκτονική E-UTRAN λέγεται ότι είναι επίπεδη. Η διασύνδεση μεταξύ των eNodeBs γίνεται μέσω της διεπαφής X2 και στο EPC μέσω της διεπαφής S1, συγκεκριμένα στην MME γίνεται με την διεπαφή S1-MME και στην S-GW μέσω της διεπαφής S1-U. Τα πρωτόκολλα που τρέχουν μεταξύ των eNodeBs και του UE είναι γνωστά ως πρωτόκολλα AS (Access Stratum). Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για τις εξής ραδιοσυνδεδεμένες λειτουργίες [22]:

- **Radio Resource Management (RRM)** καλύπτει όλες τις λειτουργίες σχετικές με τους ραδιο φορείς, όπως ο ραδιο-έλεγχος φορέας, ο ραδιο-έλεγχος αποδοχής, ο ραδιο-έλεγχος κινητικότητας, ο σχεδιασμός και η δυναμική κατανομή των πόρων στους UE και στην ανερχόμενη και κατερχόμενη σύνδεση.
- **Header Compression** βοηθά στην εξασφάλιση αποδοτικής χρήσης της ραδιο επαφής με την συμπίεση των κεφαλίδων των IP πακέτων οι οποίες θα μπορούσαν διαφορετικά να αντιπροσωπεύουν μία ενδεικτική δαπάνη, ειδικά για τα μικρά πακέτα όπως τα VoIP.

- Security, όλα τα πακέτα στέλνονται πάνω σε μια κρυπτογραφημένη ράδιο διεπαφή.
- Connectivity στο EPC περιέχει την σηματοδότηση προς το MME και τη διαδρομική φορέα προς το S-GW.

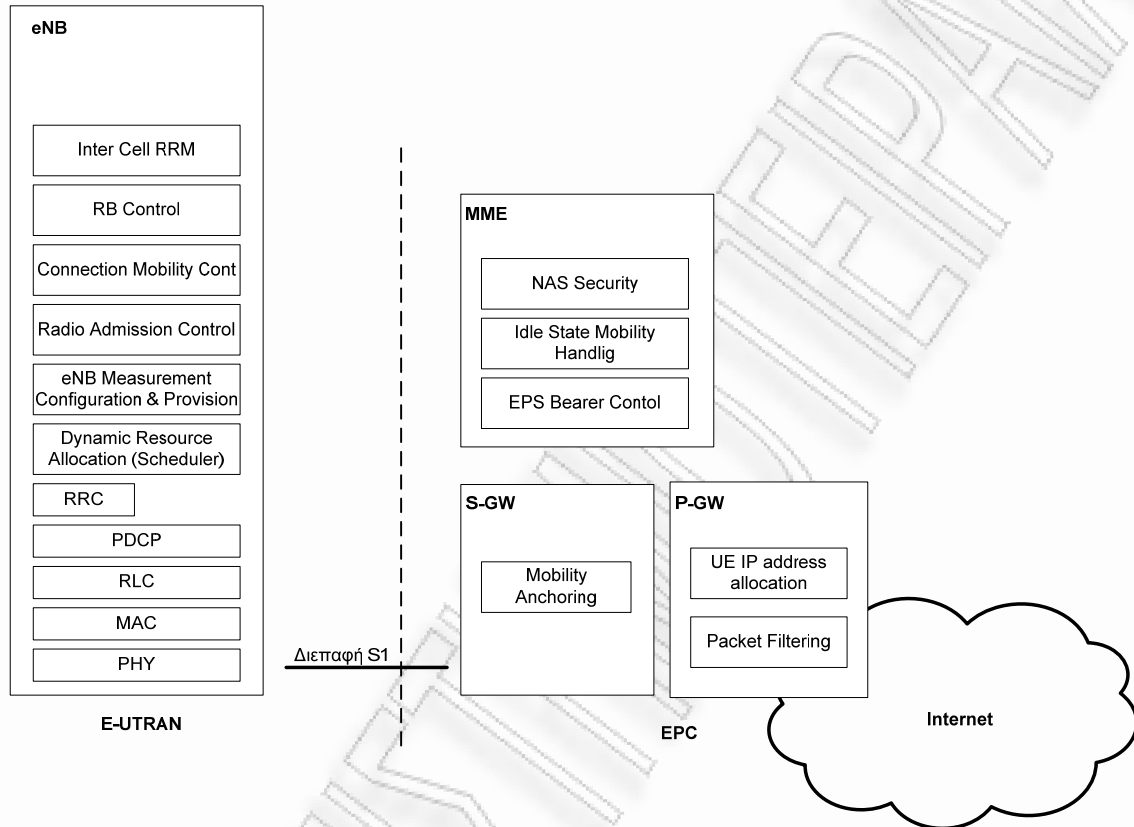
Κάθε μία από αυτές τις λειτουργίες μπορεί να είναι υπεύθυνες για την διαχείριση πολλαπλών κυψελών. Αντίθετα, από μερικές προηγούμενες τεχνολογίες 2G και 3G, το LTE ενσωματώνει την λειτουργία των ράδιο-ελεγκτών στο eNodeB. Αυτό επιτρέπει την σφιχτή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων του δικτύου πρόσβασης, μειώνοντας την λανθάνουσα κατάσταση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα.

Ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση κινητικότητας. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις της έντασης του ραδιοσήματος που πραγματοποιούνται από τον UE, κάνει παρόμοιες μετρήσεις ο ίδιος, και με βάση αυτές λαμβάνεται η απόφαση για το handover των UEs μεταξύ των κελιών. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται υπό κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στην MME η οποία προηγουμένως εξυπηρετούσε το συγκεκριμένο UE. Σε περίπτωση που η δρομολόγηση προς την προηγούμενη MME δεν είναι διαθέσιμη ή λείπουν κάποιες πληροφορίες δρομολόγησης, επιλέγεται μία νέα MME. Ένας eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς UEs στην περιοχή κάλυψής του, ωστόσο κάθε UE μπορεί να είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο eNodeB. Επίσης, γειτονικά eNodeBs πρέπει να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τέλος, κάθε στιγμή σε ένα UE προσφέρονται υπηρεσίες από μία μόνο MME και από S-GW, και ο eNodeB πρέπει να παρακολουθεί αυτή την συσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι ένας eNodeB είναι πιθανό να πρέπει να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs.

Αυτή η έννοια επιτρέπει σε UEs στη κυψέλη που ελέγχεται από ένα eNodeB να μοιραστεί μεταξύ πολλαπλών CN κόμβων, παρέχοντας την δυνατότητα για την διανομή φορτίου και επίσης στην εξάλειψη των ενιαίων σημείων αποτυχίας για τους CN κόμβους. Το πλαίσιο του UE παραμένει κανονικά με την ίδια MME εφόσον το UE βρίσκεται μέσα στην περιοχή δεξαμενών [16].

### 3.1.2 Δίκτυο Κορμού EPC

Το CN ή EPC στο SAE είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του UE και την ανάπτυξη των φορέων. Τα κύρια λογικά nodes του EPC είναι PDN Gateway (P-GW), Serving Gateway (S-GW), Mobility Management Entity (MME) [22], [25], [26], [27], [28].

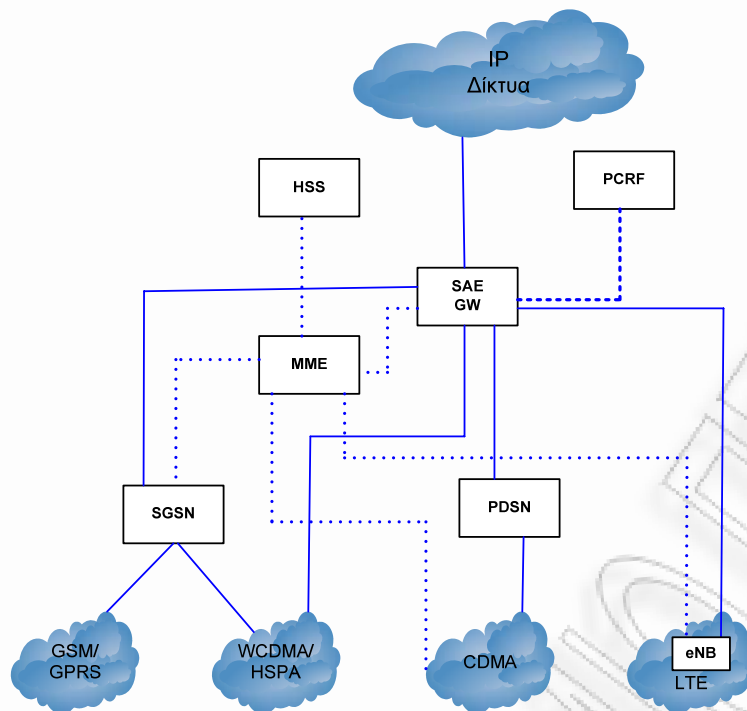


Εικόνα 3.2 Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC [22].

Άλλα λογικά nodes και λειτουργίες είναι το Home Subscriber Server (HSS) και το Policy Control και Charging Rules Function (PCRF). Από το EPS μόνο παρέχεται ένα bearer path από συγκεκριμένο QoS, ο έλεγχος των multimedia εφαρμογών όπως το VoIP παρέχεται από το IP Multimedia Subsystem (IMS) το οποίο θεωρείται ότι είναι εκτός του EPS [25].

Στις εικόνες 3.2 και 3.3 απεικονίζονται τα λογικά CN nodes στο EPC [29].



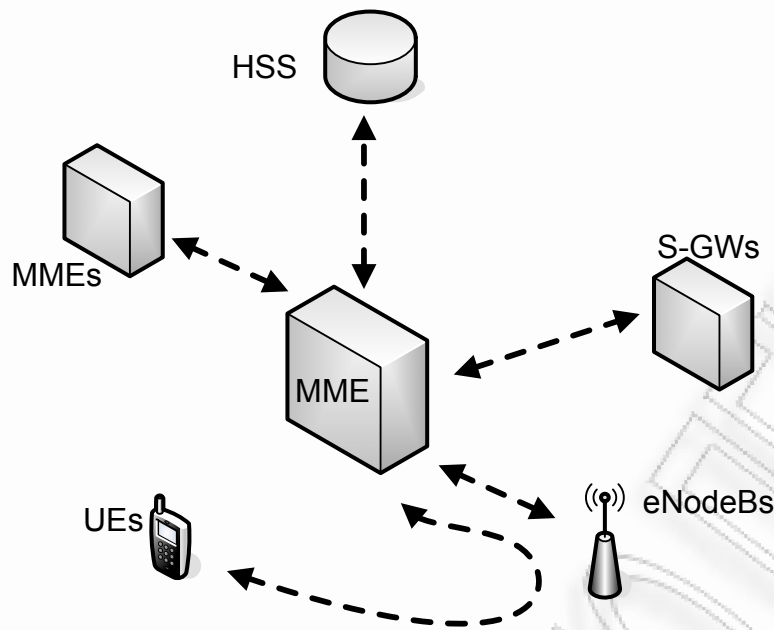


Εικόνα 3.3 Επίπεδη Αρχιτεκτονική των LTE και SAE [29].

#### Mobility Management Entity (MME)

Η Mobility Management Entity (MME) είναι ο βασικός κόμβος για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο [16], [25]. Είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των UE που βρίσκονται σε αδράνεια και για την διαδικασία τηλεειδοποίησης συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων και συμμετέχει στην διαδικασία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των φορέων, επίσης είναι υπεύθυνη για την επιλογή του S-GW για ένα UE στην αρχική σύνδεση και στο χρόνο του intra-LTE handover που περιλαμβάνει τον επανενοτισμό κόμβων Core Network (CN). Η MME είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο αυθεντικότητας των χρηστών (μέσω της αλληλεπίδρασης με το HSS). Η σηματοδότηση Non-Access Stratum (NAS) ολοκληρώνεται στο MME και είναι αρμόδια για την παραγωγή και την κατανομή των προσωρινών ταυτοτήτων των UEs.

Ελέγχει την έγκριση του UE για να εγκατασταθεί στην υπηρεσία του παρόχου Public Land Mobile Network (PLMN) και να επιβάλει περιορισμούς περιαγωγής στον UE. Η MME είναι το σημείο τερματισμού στο δίκτυο για την κρυπτογράφηση/προστασία της ακεραιότητας για σηματοδότηση NAS και χειρίζεται τη βασική διαχείριση ασφάλειας. Η νόμιμη παρεμβολή της σηματοδότησης υποστηρίζεται επίσης από το MME. Η MME παρέχει επίσης τη λειτουργία ελέγχου επιπέδου (Control Plane) για την κινητικότητα μεταξύ των δικτύων πρόσβασης LTE και 2G και 3G μέσω της S3 διεπαφής που τερματίζει στην MME από την SGSN [21]. Τέλος, η MME τερματίζει την S6a διεπαφή προς το HSS για περιαγωγή του UE.



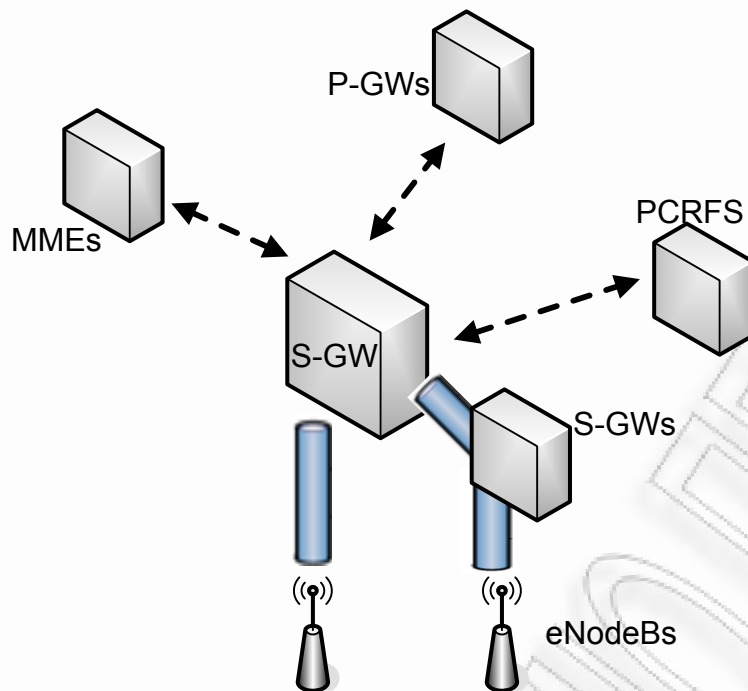
Εικόνα 3.4 Συνδέσεις του MME με άλλους λογικούς κόμβους.

#### Serving Gateway (S-GW)

Η Serving Gateway (S-GW) δρομολογεί και προωθεί τα IP πακέτα δεδομένων του χρήστη και ενεργεί ως συντονιστής κινητικότητας για τους φορείς δεδομένων όταν οι UE κινούνται μεταξύ των κόμβων (eNodeBs ή μεταξύ του LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών (handover)) [21]. Η MME δίνει εντολή στη S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον ένα eNodeB στον άλλο. Επίσης, μπορεί να ζητήσει από τη S-GW να παρέχει πόρους σύνδεσης για τη διαβίβαση δεδομένων, αν υπάρχει ανάγκη, από τον αρχικό eNodeB στον επόμενο. Επίσης η αλλαγή από μια S-GW σε άλλη, τότε η MME ελέγχει τη μετακίνηση αυτή αναλόγως με την κατάργηση συνδέσεων στην παλιά S-GW και την εγκατάστασή τους στην νέα S-GW.

Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε ένα UE ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και της P-GW. Όταν ένας UE είναι σε κατάσταση αδράνειας, οι πόροι στον eNodeB απελευθερώνονται και η πορεία των δεδομένων τερματίζει στην S-GW. Εάν η S-GW λάβει πακέτα δεδομένων από την P-GW, τότε θα αποθηκεύσει τα πακέτα και θα ζητήσει από την MME να αρχικοποιήσει τη διαδικασία τηλεειδοποίησης του UE. Αυτό θα παρακινήσει τον UE να ξανασυνδεθεί και όταν οι συνδέσεις ξαναπραγματοποιηθούν, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν [16].

Η S-GW παρακολουθεί τα δεδομένα στις συνδέσεις και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρέωσης των χρηστών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνει τη λειτουργία νόμιμης παρακολούθησης, η οποία δίνει τη δυνατότητα να παρέχονται τα δεδομένα, του χρήστη που παρακολουθείται, στις αρχές για περαιτέρω έλεγχο. Τέλος, μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο eNodeBs και επίσης μπορεί να υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο MMEs που ελέγχουν αυτή την περιοχή. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, αντιθέτως το S-GW μπορεί να μεταφερθεί.



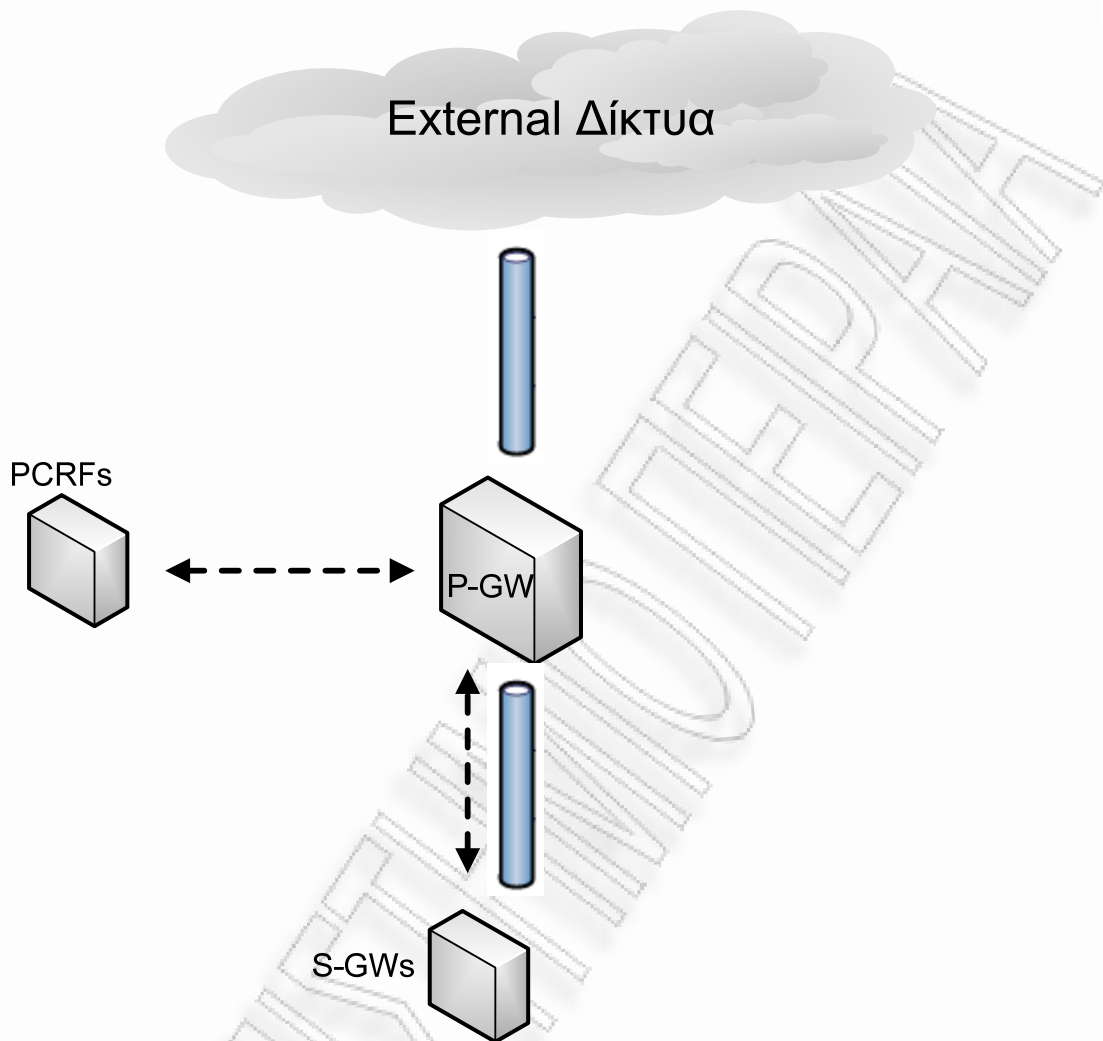
Εικόνα 3.5 Συνδέσεις του S-GW με άλλους λογικούς κόμβους.

#### Packet Data Network Gateway (P-GW)

Η Packet Data Network Gateway (P-GW) παρέχει δυνατότητα δρομολόγησης του EPS με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων και ενεργεί ως σημείο IP της σύνδεσης για τον UE. Ένας UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη σύνδεση με περισσότερες από μια P-GW για πρόσβαση σε πολλαπλά PDNs. Επίσης, η P-GW εκτελεί έλεγχο κίνησης και εκτελεί λειτουργίες φιλτραρίσματος [16].

Η P-GW διατηρείται στις εγκαταστάσεις των παρόχων σε μια κεντρική τοποθεσία. Επίσης, η P-GW διαθέτει την IP διεύθυνση στο UE και το UE την χρησιμοποιεί για να επικοινωνήσει με άλλους IP hosts σε εξωτερικά δίκτυα, π.χ. στο Διαδίκτυο. Η P-GW εκτελεί την απαραίτητη λειτουργία Dynamic Configuration Protocol (DHCP) ή ρωτά έναν εξωτερικό DHCP εξυπηρετητή και παραδίδει την διεύθυνση στο UE. Μόνο IPv4, IPv6 ή και τις δύο διευθύνσεις μπορούν να διατεθούν ανάλογα με την ανάγκη και το UE μπορεί να επισημάνει εάν θέλει να λάβει τη διεύθυνση στην σηματοδότηση συνδέσεων, ή εάν επιθυμεί να εκτελέσει την διαμόρφωση των διευθύνσεων αφότου συνδεθεί το link layer.

Ακόμα, η P-GW περιλαμβάνει το PCEF (Policy Control Enforcement Function), το οποίο σημαίνει ότι εκτελεί τις λειτουργίες των πυλών έλεγχου (gating) και το φιλτράρισμα (filtering) όπως απαιτείται από τις πολιτικές που καθορίζονται για τον UE και την εν λόγω υπηρεσία και συλλέγει και εκθέτει τις σχετικές πληροφορίες χρέωσης.



Εικόνα 3.6 Συνδέσεις του P-GW με άλλους λογικούς κόμβους.

#### Policy and Charging Resource Function (PCRF)

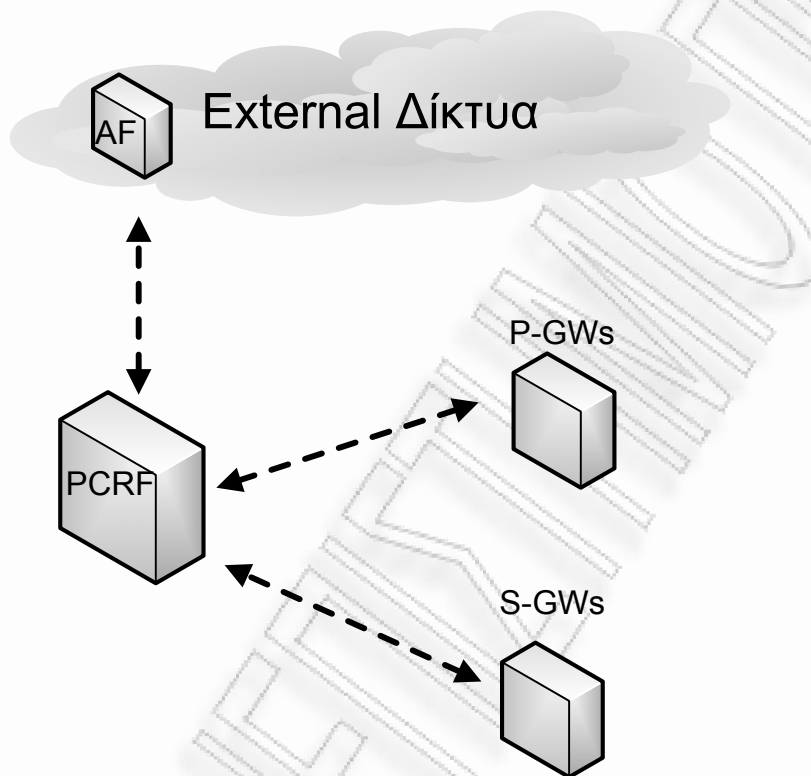
Η Policy and Charging Resource Function (PCRF) είναι το κομμάτι της αρχιτεκτονικής του δικτύου που συγκεντρώνει πληροφορίες από και προς το δίκτυο, συστήματα λειτουργικής υποστήριξης και άλλες πηγές σε πραγματικό χρόνο, υποστηρίζοντας τη δημιουργία κανόνων και στην συνέχεια αυτόματες ευφυείς αποφάσεις πολιτικής για κάθε συνδρομητή στο δίκτυο. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να προσφέρει πολλαπλές υπηρεσίες, τα επίπεδα του quality of service (QoS) και κανόνες χρέωσης [16].

Επομένως, η PCRF είναι ένα στοιχείο του δικτύου που είναι υπεύθυνο για την Πολιτική και τον Έλεγχο Χρέωσης (Policy Control and Charging). Όπου λαμβάνει αποφάσεις για το πώς θα χειριστεί τις υπηρεσίες του QoS και παρέχει πληροφορίες στο PCEF που βρίσκεται στην P-GW και εφόσον ενδείκνυται στο BBERF (Bearer Binding and Event Reporting Function) που βρίσκεται στην S-GW έτσι ώστε οι κατάλληλοι φορείς και η επιτήρηση να μπορούν να ιδρυθούν. Η PCRF είναι μέρος του PCC πλαισίου [30]. Η PCRF είναι ένας server συνήθως τοποθετημένος με άλλα CN στοιχεία σε κέντρα λειτουργίας switching. Οι πληροφορίες της PCRF που

παρέχονται στη PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Η PCRF θα στείλει τους κανόνες PCC, οπότε ένας νέος φορέας/κανάλι θα πρόκειται να εγκατασταθεί.

Για παράδειγμα, η εγκατάσταση των φορέων γίνεται, όταν το UE αρχικά συνδέεται με το δίκτυο και ο προεπιλεγμένος φορέας θα είναι έτοιμος για λειτουργία και στη συνέχεια όταν ένας ή περισσότεροι αφιερωμένοι φορείς είναι τακτοποιημένοι. Η PCRF θα είναι σε θέση να παρέχει τους κανόνες PCC που βασίζονται κατόπιν αιτήσεως καθενός από την P-GW και επίσης από την S-GW στη περίπτωση PMIP, όπως στην περίπτωση συνδέσεων, και που βασίζονται επίσης κατόπιν αιτήσεως από την Application Function (AF) που βρίσκεται στο Service Domain. Ο UE έχει κάνει σήμα άμεσα με την περιοχή υπηρεσιών, πχ με το IMS και το AF ωθεί τις πληροφορίες του QoS σε PCRF το οποίο λαμβάνει μια απόφαση PCC και ωθεί του κανόνες PCC στην P-GW και τις πληροφορίες χαρτογράφησης φορέων στην S-GW στην περίπτωση PMIP S5/S8. Οι φορείς EPC τακτοποιούνται μετά βασισμένοι σε εκείνους.

Κάθε PCRF μπορεί να συνδεθεί με ένα ή περισσότερα AF, P-GW, και S-GW. Υπάρχει μόνο ένα PCRF που συνδέεται με κάθε σύνδεση PDN που έχει ένα απλό UE.



**Εικόνα 3.7 Συνδέσεις του PCRF και των άλλων κόμβων**

#### Home Subscription Server (HSS)

Ο Home Subscription Server (HSS) είναι ο server όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα με τις εγγραφές όλων των μόνιμων χρηστών. Επίσης, καταγράφει την θέση του χρήστη στο επίπεδο του επισκεπτόμενου κόμβου, όπως οι MME. Είναι μια βάση δεδομένων που διατηρείται στις κεντρικές εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS αποθηκεύει αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που είναι κατάλληλες για τον χρήστη, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών για τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και εάν η περιαγωγή σε ένα συγκεκριμένο επισκεπτόμενο δίκτυο επιτρέπεται ή όχι. Για την

υποστήριξη της κινητικότητας μεταξύ μη-3GPP δικτύων, ο HSS αποθηκεύει επίσης τις ταυτότητες εκείνου του P-GW που είναι σε χρήση [16].

Το Authentication Center (AuC) είναι μια ενσωματωμένη οντότητα στο HSS και παράγει την αυθεντικότητα του φορέα που στέλνεται σε ένα επισκεπτόμενο δίκτυο για την επικύρωση του χρήστη και την παραγωγή των επόμενων κλειδιών για την κρυπτογράφηση και την προστασία. Σε όλη τη σχετική σηματοδότηση με αυτές τις λειτουργίες το HSS αλληλεπιδρά με το MME, επομένως θα πρέπει να είναι ικανό να συνδέεται με κάθε MME σε ολόκληρο το δίκτυο, όπου επιτρέπεται στο UE να κινηθεί. Για κάθε UE τα αρχεία του HSS θα δείξουν μια εξυπηρέτηση MME κάθε στιγμή και μόλις αναφέρει η νέα MME ότι εξυπηρετεί το UE, τότε το HSS θα ακυρώσει την θέση από την προηγούμενη MME.

### 3.1.3 Εξοπλισμός Χρήστη

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment-UE) είναι η συσκευή, την οποία ο τελικός χρήστης χρησιμοποιεί για επικοινωνία. Ο UE μπορεί να είναι μια συσκευή χειρός, ένα smart phone ή ένα laptop. Ο εξοπλισμός χρήστη είναι μια ξεχωριστή μονάδα από τον υπόλοιπο UE που είναι η Universal Subscriber Identity Module (USIM), ή αλλιώς ονομάζεται Τερματικός Εξοπλισμός (Terminal Equipment). Η USIM είναι μια εφαρμογή που τοποθετείται σε μια αφαιρούμενη έξυπνη κάρτα που λέγεται Universal Integrated Circuit Card (UICC) και χρησιμοποιείται για να προσδιορίζει και να ελέγχει την ταυτότητα του χρήστη και να προστατεύει τη μετάδοση στη ραδιο-διεπαφή με τη παραγωγή κλειδιά ασφαλείας.

Επίσης, ο UE είναι μια πλατφόρμα για εφαρμογές επικοινωνίας που επιτελεί λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας όπως handover και αναφορά της τοποθεσίας όπου βρίσκεται ο τερματικός σταθμός. Όλες αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται όπως του επιβάλλει το δίκτυο. Τέλος, ο UE παρέχει τη διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές όπως VoIP να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.



## 3.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

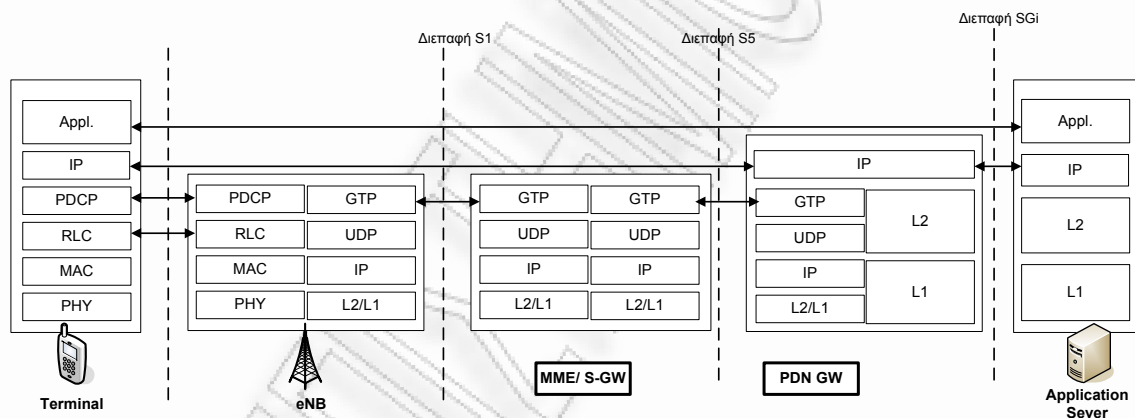
Τα πρωτόκολλα χωρίζονται σε User Plane (UP) και σε Control Plane (CP) [22], [24], [30].

### 3.2.1 User Plane (UP)

Το πρωτόκολλο UP χρησιμοποιείται για μεταδόσεις δεδομένων του χρήστη από την μία πλευρά του δικτύου στην άλλη. Το επίπεδο χρήστη διαιρείται σε τρία υπό επίπεδα το Packet Data Convergence Protocol (PDCP), το Radio Link Control (RLC) και το MAC.

Τα πρωτόκολλα PDCP και RLC είναι όμοια και στο eNB και στο UE εκτελώντας λειτουργίες συμπίεσης, κρυπτογράφησης και εκτελώντας acknowledged-mode πρωτόκολλα. Όμως, το πρωτόκολλο MAC δεν συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο και στα δύο eNB και UE. Αυτό συμβαίνει επειδή ο προγραμματιστής τρέχει μέσα στο eNB, καθορίζονται από υπό-πλαίσιο σε υπό-πλαίσιο στο οποίο τα Ues στην κυψέλη πρέπει να τους επιτρέπεται η πρόσβαση στο δίκτυο.

Επομένως, το UP περιλαμβάνει όχι μόνο τα δεδομένα του χρήστη, όπως είναι τα πακέτα φωνής ή το Web περιεχόμενο, αλλά περιλαμβάνει και τη σηματοδότηση που σχετίζεται με υπηρεσίες εφαρμογών όπως είναι οι SIP (Session Initiation Protocol) και RTCP (Real Time Control Protocol). Επίσης, η σηματοδότηση υψηλού επιπέδου (high-level signalling) μεταδίδεται μέσω του UP, παρόλο που θεωρείται ως πληροφορία ελέγχου από τα επίπεδα εφαρμογών.



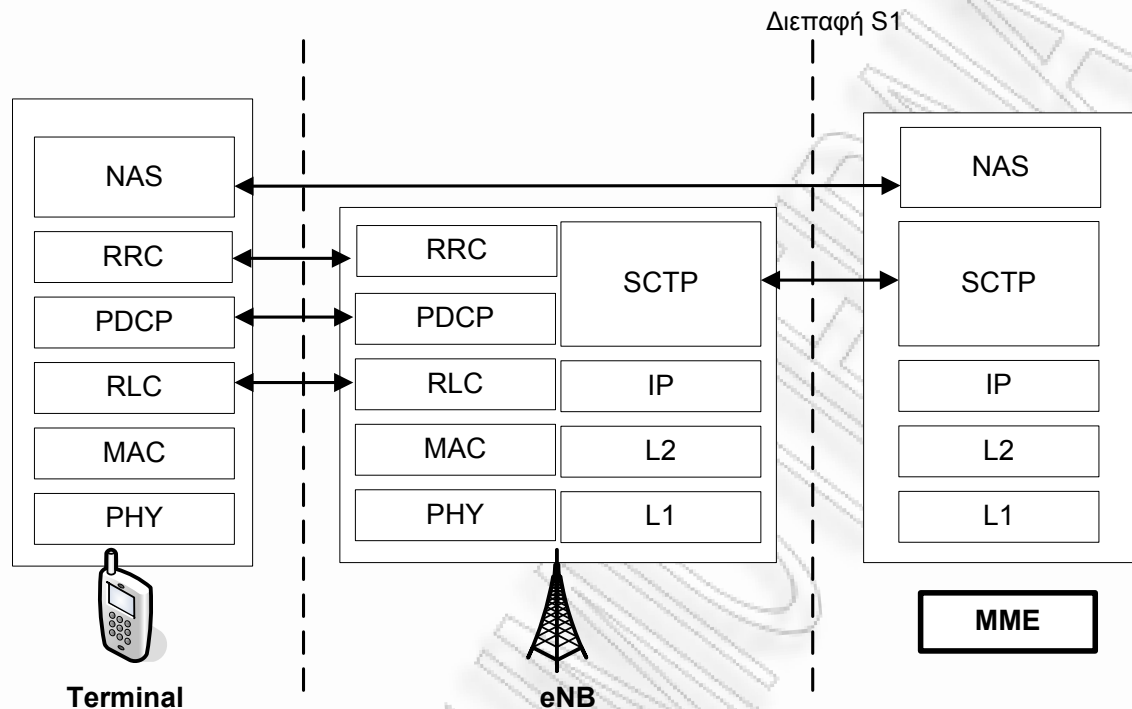
Εικόνα 3.8 Στοιβά πρωτοκόλλων του User Plane.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η στοιβά πρωτοκόλλων User Plane, από το τερματικό μέχρι τον εξυπηρετητή εφαρμογών (application server). Το επίπεδο εφαρμογών, που είναι παρόν μόνο στο τερματικό και στον εξυπηρετητή εφαρμογών, βασίζεται σε IP μετάδοση δεδομένων και τα πακέτα δρομολογούνται μέσω των Packet Core Gateways πριν φτάσουν στον προορισμό τους. Τα L1 και L2 αναφέρονται αντίστοιχα στις φυσικές και ζεύξης δεδομένων διεπαφές των S1, S5 και SGi του δικτύου.

### 3.2.2 Control Plane (CP)

Το CP χρησιμοποιείται για μεταδόσεις σήματος. Περιλαμβάνει όλες τις Radio Resource Control (RRC) E-UTRAN σηματοδοσίες, την λειτουργία υποστήριξης όπως τη διαχείριση των Radio Bearers, την κινητικότητα και την σελιδοποίηση) και τις NAS σηματοδοσίες, που αναφέρονται σε λειτουργίες και υπηρεσίες που είναι ανεξάρτητες από την τεχνολογία πρόσβασης. Το NAS

περιλαμβάνει επίσης τα GPRS Mobility Management και Session Management επίπεδα για λογαριασμό όλων των διαδικασιών σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και της MME για διαχείριση, έλεγχο ασφάλειας και ταυτοποίηση της συνόδου (session) και του EPS bearer [21].



Εικόνα 3.9 Στοιβα πρωτοκόλλων του Control Plane.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η στοιβα πρωτοκόλλων Control Plane. Τα πρωτόκολλα του top-level τερματίζουν στην MME. Το Control Plane στη ραδιο-διεπαφή, χρησιμοποιεί την ίδια στοιβα πρωτοκόλλων (PDCP, RLC, MAC, PHY) για να μεταφέρει τόσο την RRC όσο την NAS σηματοδότηση.

Τα επίπεδα RLC, MAC και PHY υποστηρίζουν τις ίδιες λειτουργίες για τα UP και CP, παρόλο αυτά δε σημαίνει ότι οι πληροφορίες τους μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο. Πολλαπλοί ραδιο-φορείς μπορεί να εγκατασταθούν μεταξύ του τερματικού και του δικτύου, με τον καθένα από αυτούς να ανταποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο σχήμα μετάδοσης, ραδιο-προστασία και χειρισμού προτεραιότητας.

### 3.3 Radio Interface Πρωτόκολλα

Η ραδιο διεπαφή διακρίνεται από ενσύρματη μετάδοση σχετικά με το κόστος και την έλλειψη του μέσου, καθώς και με ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό σφαλμάτων μετάδοσης. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, η στοιβα ραδιο διεπαφής πρωτοκόλλων είναι πολύ συγκεκριμένη. Αποτελείται από τα ακόλουθα στρώματα [21].

#### 3.3.1 Radio Resource Control RRC

Το RRC επίπεδο σε ένα eNB δημιουργεί αποφάσεις handover βασισμένες στις μετρήσεις της γειτονικής κυψέλης από το UE και ειδοποιήσεις για τα UEs στον αέρα. Επίσης δημιουργεί αποφάσεις στα συστήματα πληροφοριών broadcast και αναφορά μετρήσεων ελέγχων UE όπως



περιοδικότητα αναφορών του Channel Quality Information (CQI). Επίσης, διαθέτει προσωρινές αναγνωριστικές κυψέλες σε ενεργούς UE.

Το επίπεδο RRC υποστηρίζει όλες τις διαδικασίες σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και του eNodeB. Αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες κινητικότητας και τη διαχείριση τερματικής σύνδεσης. Η σηματοδότηση από το EPC στο CP μεταφέρεται στο τερματικό μέσω του RRC πρωτοκόλλου και δημιουργείται η σύνδεση μεταξύ του RRC και των ανώτερων επιπέδων.

### 3.3.2 Packet Data Convergence Protocol PDCP

Το PDCP επίπεδο έχει τις εξής λειτουργίες :

- Τη συμπίεση και αποσυμπίεση κεφαλίδων
- Την εφαρμογή ασφαλείας, όπως η κρυπτογράφηση και η ακεραιότητα
- Προσφέρεται στους ράδιο-φορείς από τα κατώτερα επίπεδα του E-UTRAN, όπου κάθε ένας από αυτούς τους φορείς αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ροή πληροφοριών, όπως δεδομένα User Plane (π.χ. πλαίσια φωνής, ροές δεδομένων, σηματοδότηση IMS) ή σηματοδότηση Control Plane (όπως RRC σηματοδότηση που προέρχεται από το EPC).

Οι ροές πληροφοριών που δημιουργούνται από το 'System Information Broadcast' και οι λειτουργίες σελιδοποίησης (Paging) είναι διαφανείς στο επίπεδο PDCP.

### 3.3.3 Radio Link Controller (RLC)

Το RLC ενεργεί ως διεπαφή και buffer μεταξύ υψηλότερων επιπέδων του σωρού πρωτοκόλλων (συνήθως στο PDCP στο επίπεδο χρήστη) και του επιπέδου MAC, το οποίο σχεδόν δεν έχει αποθηκευτική χωρητικότητα και λειτουργεί περισσότερο ως δρομολογητής.

Το επίπεδο RLC παρέχει στο PDCP τμηματοποίηση των πακέτων δεδομένων και ARQ (Automatic Repeat Request) ως μηχανισμό διόρθωσης σφαλμάτων. Υπάρχει μια αντιστοίχιση ένα-προς-ένα μεταξύ της κάθε RLC εισερχόμενης ροής και των λογικών καναλιών που παρέχονται από το RLC στο MAC.

### 3.3.4 Medium Access Control (MAC)

Η κύρια λειτουργία του επιπέδου MAC είναι αφού λάβει υπόψη του τις προτεραιότητες στις ροές δεδομένων που παρέλαβε από το επίπεδο RLC, να χαρτογραφήσει και να πολυπλέξει τα λογικά κανάλια στα κανάλια μεταφοράς (Transport Channels). Οι ροές που είναι πολυπλεγμένες σε ένα κανάλι μεταφοράς μπορεί να προέρχονται είτε από ένα μόνο χρήστη (π.χ. ένα ή περισσότερα στιγμιότυπα από τα DCCH και DTCH) είτε από πολλαπλούς (π.χ. πολλά DTCH από διαφορετικούς χρήστες). Το MAC υποστηρίζει επίσης HARQ (Hybrid ARQ), η οποία είναι μια γρήγορη διαδικασία επανάληψης.

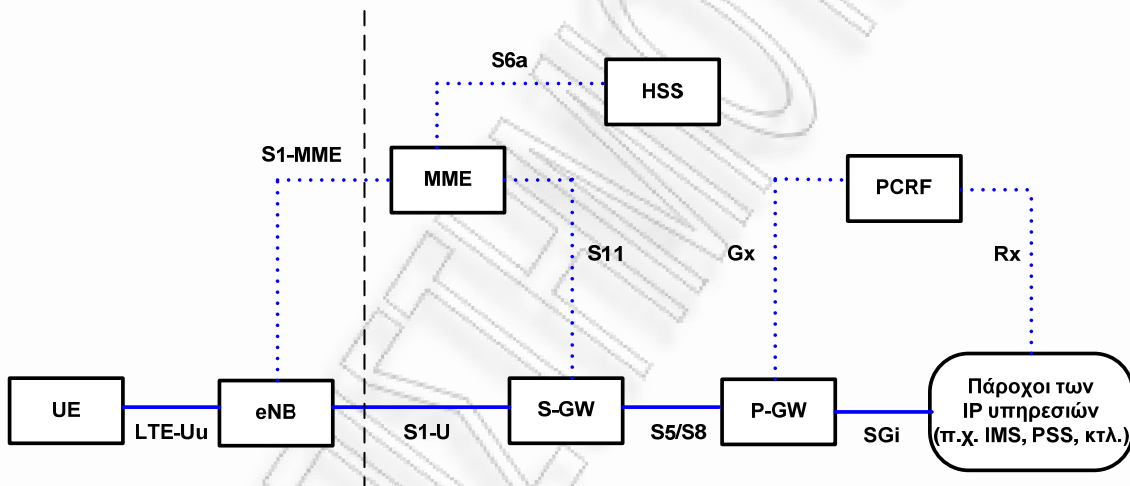
Το MAC επίπεδο τρέχει στο UE και στο eNB, όμως έχει διαφορετική συμπεριφορά, δηλαδή δίνει εντολές στο eNB και ανταποκρίνεται σε αυτές το UE. Η κύρια λειτουργία του επιπέδου MAC είναι αφού λάβει υπόψη του τις προτεραιότητες στις ροές δεδομένων που παρέλαβε από το επίπεδο RLC, να χαρτογραφήσει και να πολυπλέξει τα λογικά κανάλια στα κανάλια μεταφοράς. Όταν σε ένα κανάλι μεταφοράς, οι ροές είναι πολυπλεγμένες τότε μπορεί να προέρχονται είτε από έναν μόνο χρήστη (π.χ. ένα ή περισσότερα στιγμιότυπα από τα DCCH και DTCH) είτε από πολλαπλούς χρήστες (π.χ. πολλά DTCH από διαφορετικούς χρήστες). Επιπλέον, το MAC υποστηρίζει Hybrid ARQ, η οποία είναι μια γρήγορη διαδικασία επανάληψης. Τέλος, το MAC παραδίδει τις ροές προς μεταφορά στο PHY επίπεδο.

### 3.3.5 PHYsical (PHY)

Το PHY επίπεδο, το οποίο θα εφαρμόσει κωδικοποίηση καναλιού και διαμόρφωση πριν κάνει τη μετάδοση μέσω των ράδιο-διεπαφών. Το PHY παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων με τα φυσικά κανάλια στα υψηλότερα επίπεδα RLC και MAC.

Παίρνουμε για παράδειγμα το κανάλι μεταφοράς SCH της κατερχόμενης σύνδεσης. Σε κάθε TTI (Transmission Time Interval), το φυσικό επίπεδο λαμβάνει ένα ορισμένο αριθμό ομάδων μεταφοράς τα Transport Blocks για μετάδοση. Τότε σε κάθε ομάδα μεταφοράς προστίθεται ένα Cyclic Redundancy Check ή το σύνολο των bits που χρησιμοποιούνται από το τερματικό κόμβο για να ανιχνεύσουν τα σφάλματα μετάδοσης. Τα blocks προστατεύονται από ένα αυτοδύναμο σχήμα κωδικοποίησης καναλιού (όπως η συνελκτική ή στρόβιλη κωδικοποίηση) και προσαρμοσμένο μέγεθος για να ταυτοποιήσουν πως το κωδικοποιημένο πακέτο ταιριάζει στο μέγεθος του φυσικού καναλιού. Αυτή η φάση είναι υπό τον έλεγχο της MAC HARQ διαδικασίας η οποία μπορεί να προσαρμόσει τον ρυθμό κωδικοποίησης του καναλιού δηλαδή την ανθεκτικότητα στα σφάλματα μετάδοσης βασισμένο στις πληροφορίες που αναφέρονται από την λαμβάνουσα οντότητα.

### 3.4 Διεπαφές



Εικόνα 3.10 Στοιχεία του EPS δικτύου.

Οι διεπαφές που έχουν καθοριστεί για στο EPS και οι λειτουργίες τους [21] είναι:

Διεπαφή S1-MME: για το πρωτόκολλο ελέγχου των εφαρμογών μεταξύ του EUTRAN και MME.

Διεπαφή S1-U: για S1 δεδομένα επιπέδου χρηστών για κάθε φορέα μεταξύ του EUTRAN και της πύλης εξυπηρέτησης. Η διεπαφή αυτή ενεργοποιεί την S-GW για να εδραιωθεί το inter eNB handover.

Διεπαφή S2: παρέχει σύνδεση μεταξύ της PDN GW και non-3GPP πρόσβαση. Υποστηρίζει έλεγχο και διαδικασίες κινητικότητας για non-3GPP πρόσβασης τεχνολογίες

Διεπαφή S3: παρέχει σύνδεση μεταξύ της MME και της SGSN, διευκολύνοντας την ανταλλαγή πληροφοριών για τη κινητικότητα μεταξύ της inter-3GPP πρόσβασης δικτύων.

Διεπαφή S4: μεταξύ του SGSN και της S-GW. Παρέχει υποστήριξη στο επίπεδο χρήστη για την υποστήριξη της κινητικότητας μεταξύ του πυρήνα GPRS και πύλης εξυπηρέτησης.

Διεπαφή S5: παρέχει user plane λειτουργία διαχείρισης τούνελ μεταξύ της S-GW και της PDN GW. Ενεργοποιεί την S-GW για να συνδεθεί με πολλαπλές πύλες PDN για παροχή

διαφορετικών υπηρεσιών IP για το UE. Ωστόσο χρησιμοποιείται για τον επαναπροσδιορισμό της S-GW ενωμένο με την κινητικότητα του UE.

Διεπαφή S6a: μεταξύ του MME και HSS. Χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων εγγραφής και πιστοποίησης για επικύρωση και έγκριση πρόσβασης χρήστη στο evolved packet system.

Διεπαφή S7: παρέχει σύνδεση μεταξύ της PDN GW και της PCRF. Υποστηρίζει τις διαδικασίες για Policy and Charging rule μεταφοράς από το PCRF προς το EPC. Η διεπαφή αυτή βασίζεται στον ορισμό του 3GPP R7 Gx.

Διεπαφή S8: παρέχει σύνδεση μεταξύ της S-GW και της PDN GW. Υποστηρίζει μεταφορά πακέτων και user plane μεταξύ των δύο πυλών για τις περιπτώσεις περιαγωγής. Η διεπαφή αυτή είναι μια παραλλαγή της διεπαφής S5, βασισμένη στη 2G/3G Gp διεπαφή.

Διεπαφή S9: παρέχει σύνδεση μεταξύ των PCRF. Η διεπαφή αυτή είναι μια παραλλαγή της διεπαφής S7 για τις περιπτώσεις περιαγωγής

Διεπαφή S10: παρέχει σύνδεση μεταξύ των MME κόμβων

Διεπαφή S11: επιπέδου ελέγχου μεταξύ της MME και της S-GW αναγκαίο για την διαχείριση του EPS φορέα.

Διεπαφή S12: παρέχει σύνδεση μεταξύ της S-GW και του UTRAN χρησιμοποιούνται για user plane tunneling κατά την διάρκεια E-UTRAN και UTRAN handovers.

Διεπαφή S13: παρέχει σύνδεση μεταξύ της MME και του Equipment Identity Register (EIR) χρησιμοποιώντας για UE επαλήθευση ταυτότητας.

Διεπαφή Rx: παρέχει σύνδεση μεταξύ της PCRF και της P-CSCF. Χρησιμοποιείται για να παρέχει υπηρεσία δυναμικής πληροφορίας στο PCRF.

Διεπαφή SGi: μεταξύ της πύλης PDN και του internet/intranet.

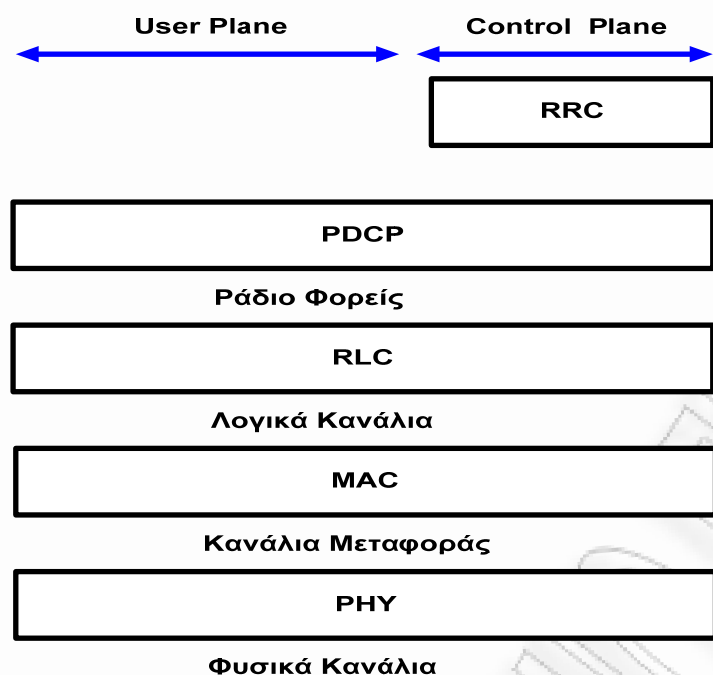
Διεπαφή Gx: παρέχει μεταφορά της πολιτικής QoS και επιβολής κανόνων από το PCRF στο Policy and Charging Enforcement Function (PCEF) μέσα στο PDN GW.

Διεπαφή X2: μεταξύ των eNodeB που εργάζονται σε δικτυωτό τρόπο (που σημαίνει ότι όλοι οι NodeBs μπορεί ενδεχομένως να συνδέονται μεταξύ τους). Ο κύριος σκοπός αυτής της διεπαφής είναι να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια πακέτων λόγω της κινητικότητας του χρήστη. Καθώς το τερματικό κινείται σε όλο το δίκτυο πρόσβασης, πακέτα που δεν έχουν σταλεί ή μη αναγνωρίσιμα αποθηκεύονται σε παλιές σειρές eNodeB που μπορούν να προωθούνται ή μέσα σε τούνελ στο νέο eNodeB μέσω της διεπαφής X2.

### 3.5 Κανάλια

Το E-UTRAN, προκειμένου να είναι ευέλικτο και να επιτρέπει διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης δεδομένων, υποστηρίζει τα εξής είδη καναλιών [27]:

- Λογικά Κανάλια (Logical Channel) που περιέχουν το αντικείμενο που μεταδίδεται.
- Κανάλια Μεταφοράς (Transport Channel) που εκφράζουν τον τρόπο που μεταδίδεται.
- Φυσικά Κανάλια (Physical Channel).



Εικόνα 3.11 Δομή επιπέδου πρωτοκόλλου σε E-UTRAN για την κατερχόμενη ζεύξη καναλιών.

### 3.5.1 Λογικά Κανάλια

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

Λογικά Κανάλια Ελέγχου του E-UTRAN	
BCCH Broadcast Control Channel	Ένα κοινό κατερχόμενο κανάλι, χρησιμοποιημένο από το δίκτυο για να μεταδώσει πληροφορίες του E-UTRAN συστήματος στα τερματικά στα radio cells, που είναι χρήσιμες από το τερματικό π.χ για να γνωρίζει ο χειριστής του δικτύου εξυπηρέτησης κυψέλης, να παίρνει πληροφορίες για τη διαμόρφωση των κοινών καναλιών κυψέλης, πως να έχει πρόσβαση στο δίκτυο κλπ.
PCCH Paging Control Channel	Ένα κοινό κατερχόμενο κανάλι το οποίο μεταφέρει πληροφορίες ειδοποίησης (paging) στα τερματικά στοιχεία στην κυψέλη.
CCCH Common Control Channel	Ένα ιδιαίτερο είδος καναλιού μεταφοράς χρήσιμο για επικοινωνία μεταξύ του τερματικού και E-UTRAN όταν καμία RRC σύνδεση δεν είναι διαθέσιμη. Τυπικά αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται σε μια πρόωρη φάση δημιουργίας μιας

	ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.
MCCH Multicast Control Channel	Χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφοριών του MBMS (Multimedia Broadcast and Multicast Service) από το δίκτυο σε ένα ή περισσότερα τερματικά.
DCCH Dedicated Control Channel	Ένα point-to-point διπλής κατεύθυνσης κανάλι υποστηρίζοντας έλεγχο πληροφοριών μεταξύ ενός λαμβανόμενου τερματικού και το δίκτυο.

Λογικά Κανάλια Κίνησης του E-UTRAN	
DTCH Dedicated Traffic Channel	Ένα point-to-point διπλής κατεύθυνσης κανάλι, χρησιμοποιείται μεταξύ ενός λαμβανόμενου τερματικού και του δικτύου. Μπορεί να υποστηρίξει την μετάδοση δεδομένων χρήστη, τα οποία περιλαμβάνουν τα δεδομένα τους όπως επίσης σηματοδότηση επιπέδου εφαρμογών συνδεδεμένα με την ροή δεδομένων.
MTCH Multicast Traffic Channel	Ένα point-to-multipoint κανάλι δεδομένων για την εκπομπή της κίνησης δεδομένων από το δίκτυο σε ένα ή περισσότερα τερματικά. Όπως για το MCCH, αυτό το κανάλι είναι συνδεδεμένο με τις υπηρεσίες MBMS.

### 3.5.2 Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν το πώς και με ποια χαρακτηριστικά τα δεδομένα μεταφέρονται πάνω στη ράδιο διεπαφή. Τα κανάλια μεταφοράς ουσιαστικά περιγράφουν το πώς τα δεδομένα είναι προστατευμένα από τα σφάλματα μετάδοσης, τον τύπο κωδικοποίησης του καναλιού, την προστασία CRC ή interleaving τα οποία χρησιμοποιούνται στο μέγεθος των πακέτων δεδομένων που στέλνονται πάνω στη ράδιο διεπαφή κλπ. Όπου όλο αυτό το σύστημα πληροφοριών είναι γνωστό ως Transport Format.

Τα κανάλια μεταφοράς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα κανάλια κατερχόμενης μεταφοράς (downlink), δηλαδή από το δίκτυο στο τερματικό και τα κανάλια ανερχόμενης μεταφοράς (uplink), δηλαδή από το τερματικό στο δίκτυο.

Κανάλια Κατερχόμενης Ζεύξης στο E-UTRAN	
BCH Broadcast Channel	Ενωμένο με τα λογικά κανάλια BCCH. Το BCH έχει ένα σταθεροποιημένο και προκαθορισμένο Transport Format και θα καλύψει όλη την περιοχή της κυψέλης.
PCH Paging Channel	Είναι ενωμένο με το BCCH
DL-SCH Downlink Shared Channel	Χρησιμοποιείται στον έλεγχο μεταφοράς χρήστη ή στα δεδομένα κυκλοφορίας.
MCH Multicast Channel	Είναι ενωμένο στον χρήστη MBMS της μεταφοράς πληροφοριών ελέγχου.

Κανάλια Ανερχόμενης Ζεύξης στο E-UTRAN	
UL-SCH Uplink Shared Channel	Είναι ανερχόμενη σύνδεση ισοδύναμη του DL-SCH.

RACH Random Access Channel	Είναι ειδικό κανάλι μεταφοράς που υποστηρίζει περιορισμένες πληροφορίες ελέγχου π.χ. Κατά την διάρκεια πρόωρων φάσεων δημιουργίας των επικοινωνιών ή στην περίπτωση αλλαγής της κατάστασης του RRC.
-------------------------------	---

### 3.5.3 Φυσικά Κανάλια

Τα φυσικά κανάλια είναι η πραγματική εφαρμογή του καναλιού μεταφοράς πάνω στην ράδιο διεπαφή. Είναι γνωστά μόνο στο φυσικό επίπεδο του E-UTRAN και η δομή τους βασίζεται στα χαρακτηριστικά της φυσικής διεπαφής του OFDM.

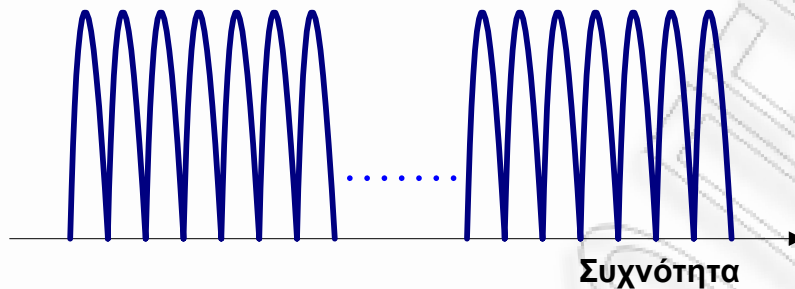
Τα φυσικά κανάλια χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: τα φυσικά κανάλια της κατερχόμενης ζεύξης (downlink) του E-UTRAN και τα φυσικά κανάλια της ανερχόμενης ζεύξης (uplink) του E-UTRAN.

Φυσικά Κανάλια Κατερχόμενης Ζεύξης του E-UTRAN	
PDSCH Physical Downlink Shared Channel	Μεταφέρει δεδομένα του χρήστη και σηματοδοσία υψηλού επιπέδου.
PDCCH Physical Downlink Control Channel	Μεταφέρει προγραμματισμένες εντολές για την ανερχόμενη σύνδεση.
PMCH Physical Multicast Channel	Πληροφορίες Multicast/Broadcast
PBCH Physical Broadcast Channel	Πληροφορίες συστήματος.
PCFICH Physical Control Format Indicator Channel	Πληροφορεί το UE για τον αριθμό των OFDM συμβόλων που χρησιμοποιούνται για το PDCCH.
PHICH Physical Hybrid ARQ Indicator Channel	Μεταφέρει τις απαντήσεις του eNodeB, ACK και NACK στην μετάδοση της ανερχόμενης σύνδεσης, σχετικά με το μηχανισμό HARQ.

Φυσικά Κανάλια Ανερχόμενης Ζεύξης του E-UTRAN	
PUSCH Physical uplink Shared Channel	Μεταφέρει δεδομένα του χρήστη και σηματοδοσία υψηλού επιπέδου.
PUCCH Physical Uplink Control Channel	Μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου της ανερχόμενης σύνδεσης, περιλαμβάνοντας τις απαντήσεις ACK και NACK από το τερματικό στην μετάδοση κατερχόμενης σύνδεσης σχετικά με τον μηχανισμό HARQ.
PRACH Physical Random Access Channel	Μεταφέρει την εισαγωγή τυχαίας πρόσβασης που στέλνεται από τα τερματικά για πρόσβαση στο δίκτυο.

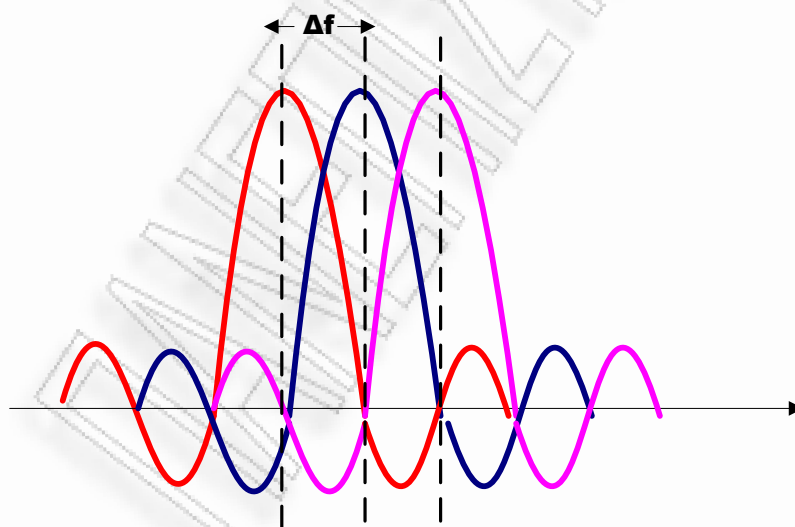
### 3.6 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Η τεχνολογία της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας OFDM είναι καθιερωμένη σε διάφορα πρότυπα όπως το 802.11a/b/g, 802.16, HiperLan-2, Video Broadcast (DVB) και Digital Audio Broadcast (DAB). Το LTE χρησιμοποιεί OFDM για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink), δηλαδή από το σταθμό βάσης στο τερματικό σταθμό, καθώς επίσης το OFDM καλύπτει την απαίτηση του LTE για την μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένησης σήματος και παρεμβολών, επίσης επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του καναλιού, χωρίζοντας αυτό σε υποκανάλια που είναι μεν επικαλυπτόμενα αλλά ακολουθούν την αρχή της ορθογωνιότητας [25].



Εικόνα 3.12 Ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM)

Η βασική ιδέα της OFDM [31], [32] είναι η διαίρεση του προς μετάδοση ευρυζωνικού (wideband) σήματος σε μεγάλο αριθμό παράλληλων σημάτων στενής ζώνης (narrowband). Ενώ ένα συμβατικό σύστημα καταλαμβάνει όλο το διαθέσιμο φάσμα, χρησιμοποιώντας παλμούς μικρής διάρκειας, στην τεχνική OFDM (και γενικά στις παράλληλες τεχνικές μετάδοσης), τα προς μετάδοση ψηφιακά δεδομένα διοχετεύονται παράλληλα στα υποκανάλια, με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή έχουμε ισοδύναμα πολλά συστήματα τα οποία μεταδίδουν ταυτόχρονα το καθένα ένα μικρό μέρος της πληροφορίας με αργό ρυθμό μετάδοσης ώστε το καθένα να είναι σήμα στενής ζώνης, ενώ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης παραμένει σταθερός.



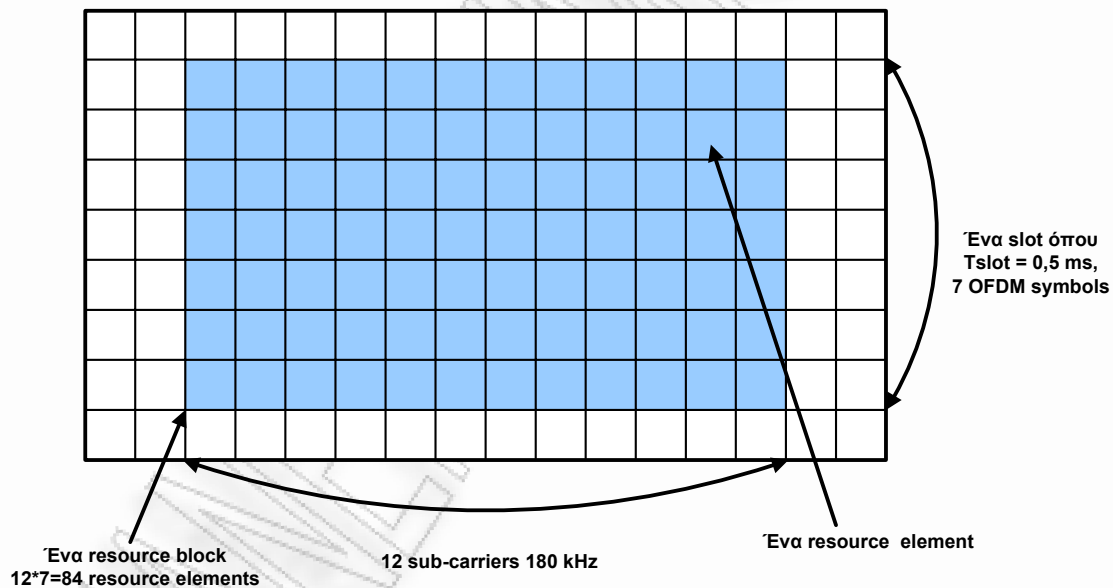
Εικόνα 3.13 Ορθογωνιότητα των OFDM υποφορέων



Η συχνότητα ενός υποκαναλιού είναι  $f_k = k\Delta f$ , όπου  $\Delta f$  είναι το διάστημα του subcarrier.

Για παράδειγμα, η παραπάνω εικόνα απεικονίζει τρία subcarriers και το διάστημα  $\Delta f$  [16], [25][24], [29]. Κάθε subcarrier είναι διαμορφωμένο από ένα σύμβολο δεδομένων και ένα σύμβολο OFDM που σχηματίζεται με απλή προσθήκη των διαμορφωμένων σημάτων του subcarrier. Το σύμβολο του OFDM σήματος έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος διακυμάνσεων του σήματος από τους ατομικούς subcarriers. Επιπλέον ο χρόνος διάρκειας των συμβόλων OFDM είναι  $1/\Delta f$  + κυκλικό πρόθεμα. Το κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα μεταξύ των υποφερόντων, ακόμα και για ένα χρόνο διασποράς στο ραδιοκανάλι.

Ένα στοιχείο των πόρων φέρνει διαμορφωμένα bits QPSK, 16QAM ή 64QAM. Παραδείγματος χάριν με το 64QAM, κάθε στοιχείο πόρων φέρει έξι bits. Τα σύμβολα OFDM ομαδοποιούνται στις ομάδες πόρων. Για  $\Delta f = 15$  KHz, για το διάστημα μεταξύ υποφερόντων τότε οι ομάδες έχουν συνολικό μέγεθος 180 KHz στο πεδίο συχνότητας και 0.5ms στο πεδίο χρόνου. Σε κάθε χρήστη κατανέμεται ένας αριθμός γνωστών ομάδων πόρων στο πλέγμα συχνότητας χρόνου. Οι περισσότερες ομάδες πόρων ενός χρήστη λαμβάνουν και υψηλότερη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται στα στοιχεία πόρων υψηλότερου ρυθμού bit. Ποια ομάδα πόρων και πόσους λαμβάνει ο χρήστης σε ένα δεδομένο σημείο εξαρτάται από προηγμένους μηχανισμούς προγραμματισμού στις διαστάσεις συχνότητας και χρόνου. Ο προγραμματισμός των πόρων μπορεί να ληφθεί κάθε ms το οποίο σημαίνει ότι δύο ομάδες πόρων με εύρος 180KHz και συνολικά ένα ms στο μήκος, αποκαλούμενο ομάδα προγραμματισμού. Οι μηχανισμοί προγραμματισμού στο LTE είναι παρόμοιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται στο HSPA και επιτρέπουν την βέλτιστη απόδοση για τις διαφορετικές υπηρεσίες στα διαφορετικά ραδιο-περιβάλλοντα.



Εικόνα 3.14 Οι φυσικοί πόροι του LTE κατερχόμενης σύνδεσης βασισμένοι στο OFDM.

Η ορθογωνιότητα των OFDM subcarriers μπορεί να χαθεί, όταν το σήμα περνά μέσα από ένα time-dispersive ραδιο κανάλι και οφείλεται σε inter-OFDM σύμβολο παρεμβολών [28]. Για να αποφευχθεί αυτή η παρεμβολή, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια κυκλική επέκταση του OFDM σήματος. Στην επέκταση του κυκλικού προθέματος, στο τελευταίο μέρος του σήματος OFDM προστίθεται ως κυκλικό πρόθεμα (CP) στην αρχή του σήματος OFDM. Το μήκος του κυκλικού προθέματος είναι γενικά επιλεγμένο για να φιλοξενήσει τη μέγιστη εξάπλωση καθυστέρησης του ασύρματου καναλιού. Η προσθήκη του κυκλικού προθέματος κάνει το



μεταδιδόμενο OFDM σήμα περιοδικό και βοηθά στην αποφυγή του inter-OFDM σύμβολο και των inter-subcarriers παρεμβολών.

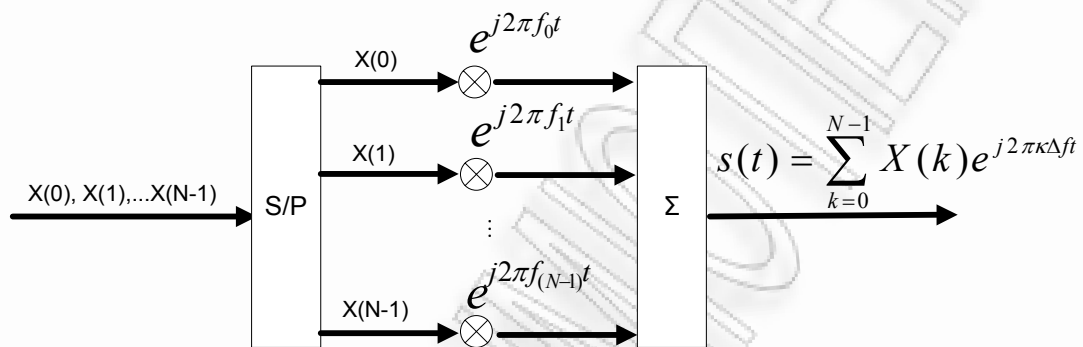
Επομένως, το baseband σήμα διαμέσου ενός OFDM συμβόλου είναι:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j2\pi k\Delta f t} \tag{3.1}$$

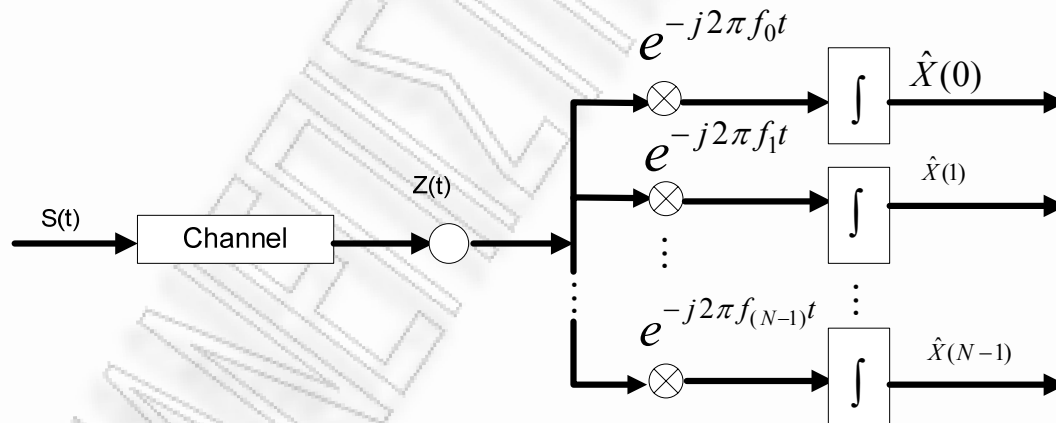
όπου,

N : ο αριθμός των υποφορέων

X(k): σύμβολο σύνθετης διαμόρφωσης που μεταδίδεται στον κ-οστό υπομεταφορέα  $e^{j2\pi k\Delta f t}$



Εικόνα 3.15 Μοντέλο πομπού σε OFDM συνεχούς χρόνου με τις banks των ταλαντωτών του subcarrier.



Εικόνα 3.16 Μοντέλο δέκτη σε OFDM συνεχούς χρόνου με τις banks των ταλαντωτών του subcarrier.

$$\hat{X}(m) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} [s(t) + z(t)]e^{-j2\pi m\Delta f t} dt \tag{3.2}$$

$$= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) e^{-j2\pi m \Delta f t} dt + \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} z(t) e^{-j2\pi m \Delta f t} dt \quad (3.3)$$

Έστω ότι σε κατάλληλο χρόνο και σε συγχρονισμό συχνότητας δεν υπάρχει επίδραση του ασύρματου καναλιού. Τότε, η μόνη πηγή υποβάθμισης του σήματος είναι το AWGN στοιχείο  $z(t)$ . Επομένως:

$$\tilde{z} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} z(t) e^{-j2\pi m \Delta f t} dt \quad (3.4)$$

Άρα, το  $\hat{X}(m)$  γράφεται ως εξής:

$$\hat{X}(m) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \int_0^{T_s} e^{-j2\pi k \Delta f t} e^{-j2\pi m \Delta f t} dt + \tilde{z} \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \int_0^{T_s} e^{-j2\pi \Delta f (k-m)t} dt + \tilde{z} = X(m) + \tilde{z} \quad (3.6)$$

Όπου,

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} e^{-j2\pi \Delta f (k-m)t} dt = \begin{cases} 1, & k=m \\ 0, & k \neq m \end{cases} \quad (3.7)$$

Η OFDM baseband μετάδοση σήματος είναι:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n(k) e^{j2\pi k \Delta f t} \text{rect}(t - nT_s) \quad (3.8)$$

Το rectangular filter είναι:

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_s}}, & 0 \leq t \leq T_0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.9)$$

Η φασματική πυκνότητα ισχύος για το  $k$ -οστό subcarrier

$$X_k(f) = \left( \frac{\sin(\pi(\frac{f}{\Delta f} - k))}{\pi(\frac{f}{\Delta f} - k)} \right)^2 \quad (3.10)$$

Για  $N$  φορές δειγματοληψίας του συμβόλου OFDM σε χρόνο  $t = \frac{m}{N} T_s$  έχουμε:

$$s\left(\frac{m}{N} T_s\right) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi k \frac{m}{N}}, \quad m = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.11)$$

Αντιπροσωπεύουμε το  $s\left(\frac{m}{N} T_s\right)$  ως  $s(m)$  καθώς αυτό εξαρτάται από το  $m$ , άρα:

$$s(m) = N \cdot \text{IDFT}\{X_k\}, \quad k, m = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.12)$$

Όπου IDFT είναι ο αντίστροφος διακριτός μετασχηματισμός.

Τα σύμβολα διαμόρφωσης συμπλέγματος  $X(k)$ ,  $k=0, 1, \dots, (N-1)$  αντιστοιχίζονται με την είσοδο τους στον αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (IFFT). Δεν μεταδίδεται πληροφορία σχετικά με τα subcarriers guard. Μετά τη λειτουργία IFFT προστίθεται ένα κυκλικό πρόθεμα και η ακολουθία που προκύπτει είναι up-converted σε RF. Τέλος ενισχύεται και μεταδίδεται.

Ο δέκτης φιλτράρει το λαμβανόμενο σήμα, ενισχύεται και down-converted από RF. Τα δείγματα κυκλικού προθέματος απορρίπτονται και εκτελείται μια λειτουργία FFT στην ακολουθία των λαμβανόμενων δειγμάτων. Μια εκτελούμενη εξίσωση στο πεδίο συχνότητας (FDE) γίνεται με εκτιμήσεις καναλιού που λαμβάνονται από χειριστές λήψης ή σήματα αναφοράς και οι εκτιμήσεις των μεταδιδόμενων συμβόλων διαμόρφωσης συμπλέγματος έχουν παραχθεί.

Τα δείγματα στο πεδίο του χρόνου στην έξοδο του IFFT είναι:

$$s(n) = W^H X(k), \quad k, n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.13)$$

Όπου  $W$  είναι ένας  $N \times N$  πίνακας γρήγορου μετασχηματισμού Fourier:

$$[W]_{k,n} = e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, \quad k, n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.14)$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{\frac{-j2\pi}{N}} & e^{\frac{-j4\pi}{N}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi(N-1)}{N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & e^{\frac{-j2\pi(N-2)}{N}} & e^{\frac{-j4\pi(N-2)}{N}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi(N-1)(N-2)}{N}} \\ 1 & e^{\frac{-j2\pi(N-1)}{N}} & e^{\frac{-j4\pi(N-1)}{N}} & \dots & e^{\frac{-j2\pi(N-1)(N-1)}{N}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Ο αντίστροφος πίνακας του  $W$ , δηλαδή  $W^{-1}$  αναφέρεται στον αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier.

$$W^{-1} = [W^H]_{k,n} = e^{\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad k, n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.16)$$

Με σκοπό να αποφύγουμε τις παρεμβολές ανάμεσα των συμβόλων OFDM, ένα μήκος  $G$  κυκλικού προθέματος εισάγεται μπροστά από τα δείγματα πεδίου χρόνου, όπου μας δίνει την παρακάτω ακολουθία:

$$s' = C_T \times s \quad (3.17)$$

Το  $C_T$  είναι ένας  $(N+G) \times N$  πίνακας που αντιπροσωπεύει την λειτουργία πρόσθετου κυκλικού προθέματος του πομπού:

$$C_T \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{G \times (N-G)} & I_G \\ & I_N \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Επομένως, μετά την πρόσθεση του κυκλικού προθέματος, παίρνουμε την παρακάτω ακολουθία δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου:

$$s'(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{G \times (N-G)} & I_G \\ & I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(0) \\ s(1) \\ \vdots \\ s(N-1) \end{bmatrix} = \quad (3.19)$$

$$= [s(N-G) \cdots s(N-1) \quad s(0) \cdots s(N-1)]^T \quad (3.20)$$

Το σήμα μεταδίδεται, και πριν φτάσει στον πομπό, περνάει διαμέσου ενός γραμμικού καναλιού.

Το κανάλι διάδοσης πολλαπλών διαδρομών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πεπερασμένη κρουστική απόκριση (FIR) φίλτρου από  $L$  σειρά με tap συντελεστές  $[h_0, h_1, \dots, h_L]^T$ . Το λαμβανόμενο σήμα στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$y(n) = \sum_{i=0}^L h_i s'(n-i) + z(n), \quad n=0, 1, \dots, (N-1) \quad (3.21)$$

Όπου  $z(n) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$  είναι additive white Gaussian noise (AWGN). Η πράξη της συνέλιξης στην παραπάνω εξίσωση μπορεί να κατασκευαστεί ως πολλαπλασιασμό πίνακα με πίνακα τον παρακάτω:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & h_1 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ h_L & \vdots & \ddots & h_0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & h_L & \vdots & h_1 & h_0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & h_L & \cdots & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Το λαμβανόμενο σήμα στο πεδίο του χρόνου είναι:

$$y = \tilde{H}s' + z = \tilde{H}C_T W^H X + z \quad (3.23)$$

Η πρώτη λειτουργία που εκτελείται από το λαμβανόμενο σήμα είναι η απομάκρυνση του κυκλικού προθέματος, που μπορεί να εκφραστεί ως πολλαπλασιασμό του λαμβανόμενου σήματος με ένα  $N \times (N + G)$  πίνακα, που δίνεται παρακάτω:

$$C_R = \begin{bmatrix} 0_{N \times G} & I_N \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Το λαμβανόμενο σήμα είναι:

$$y' = C_R [\tilde{H}s' + z(n)] = C_R \tilde{H}C_T W^H X + z'(n) \quad (3.25)$$

$$C_R \tilde{H}C_T =$$

$$= \begin{bmatrix} 0_{N \times G} & I_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & h_1 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ h_{(G-1)} & \vdots & \ddots & h_0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & h_{(G-1)} & \vdots & h_1 & h_0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & h_{(G-1)} & \cdots & h_1 & h_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0_{G \times (N-G)} & I_G \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} h_0 & 0 & 0 & 0 & h_{(G-1)} & \cdots & h_1 \\ h_1 & h_0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & h_2 \\ \vdots & h_1 & \ddots & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ h_{(G-1)} & \vdots & \ddots & h_0 & 0 & \vdots & h_{(G-1)} \\ 0 & h_{(G-1)} & \vdots & h_1 & h_0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & h_{(G-1)} & h_{(G-2)} & \cdots & h_0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Το λαμβανόμενο σήμα στο πεδίο της συχνότητας προέρχεται με την εκτέλεση του FFT στο λαμβανόμενο σήμα στο πεδίο του χρόνου, δηλαδή:

$$Y = WC_R [\tilde{H}s' + z(n)] = WC_R \tilde{H}C_T W^H X + z'' \quad (3.27)$$

Ο διαγώνιος πίνακας  $H$  που περιλαμβάνει κυκλικό πρόθεμα και γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) είναι:

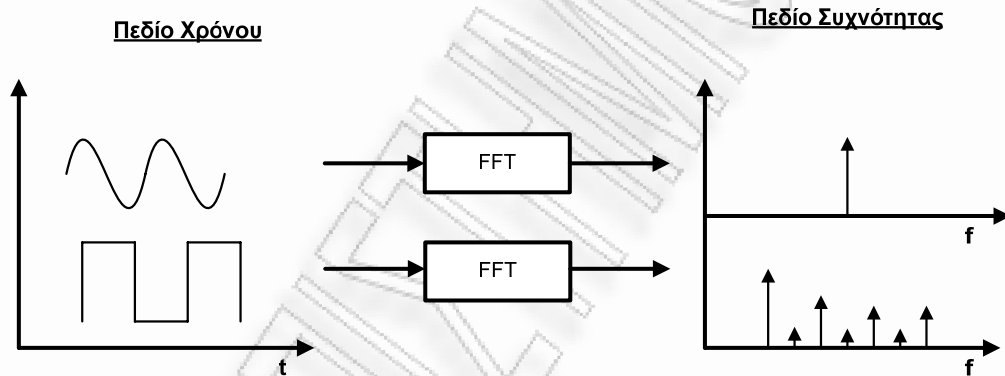
$$H = WC_R \tilde{H} C_T W^H = \begin{bmatrix} H(0) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & H(1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & H(N-2) & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & H(N-1) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Το λαμβανόμενο σήμα στο πεδίο της συχνότητας είναι:

$$Y = HX + z'' \quad (3.29)$$

### 3.7 OFDMA Basics

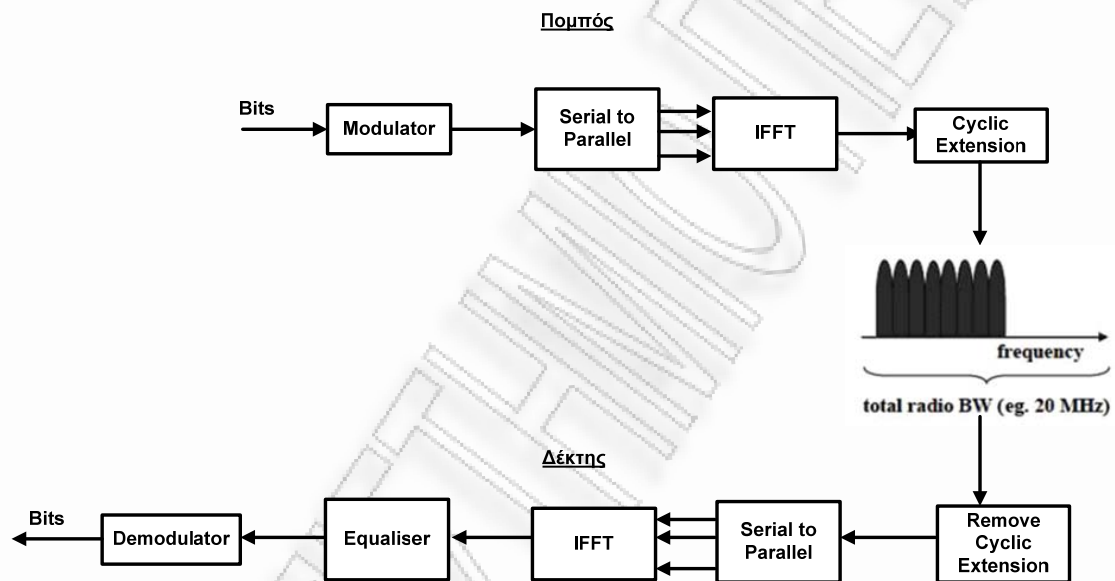
Η πρακτική εφαρμογή ενός συστήματος OFDMA [16] είναι βασισμένη στην ψηφιακή τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα στη χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform-DFT) και του Αντίστροφου Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (IDFT) που κινείται μεταξύ του πεδίου χρόνου και συχνότητας. Το προκύπτον σήμα τροφοδοτεί ένα ημιτονοειδές κύμα στο Γρήγορο Μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform-FFT) όπως απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.17 Τα αποτελέσματα από την λειτουργία FFT με διαφορετικές εισόδους.

Οι πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούν το FFT [8]. Η λειτουργία FFT κινεί το σήμα από την εκπροσώπηση του πεδίου χρόνου στην εκπροσώπηση του πεδίου συχνότητας. Ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT) κάνει την λειτουργία στην αντίθετη κατεύθυνση. Για το ημιτονοειδές κύμα η FFT έξοδος λειτουργίας θα έχει ένα peak σε αντίστοιχη συχνότητα και μηδενική έξοδο οπουδήποτε αλλού. Αν η είσοδος είναι τετραγωνικό κύμα τότε η έξοδος του πεδίου συχνότητας περιέχει κορυφή (peaks) στις πολλαπλές συχνότητες όπως ένα κύμα περιέχει διάφορες συχνότητες που καλύπτονται από την λειτουργία του FFT. Μια ώθηση ως είσοδο σε FFT θα είχε μια κορυφή σε όλες τις συχνότητες. Δεδομένου ότι το τετραγωνικό κύμα έχει ένα τακτό χρονικό διάστημα  $T$ , υπάρχει μια μεγαλύτερη κορυφή στην συχνότητα  $1/T$  που αντιπροσωπεύει τη θεμελιώδη συχνότητα της κυματομορφής και μια μικρότερη κορυφή στις περιττές αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας. Η λειτουργία της FFT μπορεί να διενεργηθεί πέρα δώθε χωρίς απώλεια οποιασδήποτε από τις αρχικές πληροφορίες υποθέτοντας ότι οι κλασσικές απαιτήσεις για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος από πλευράς των ελάχιστων ρυθμών δειγματοληψίας και να ικανοποιούνται τα μήκη λέξης.

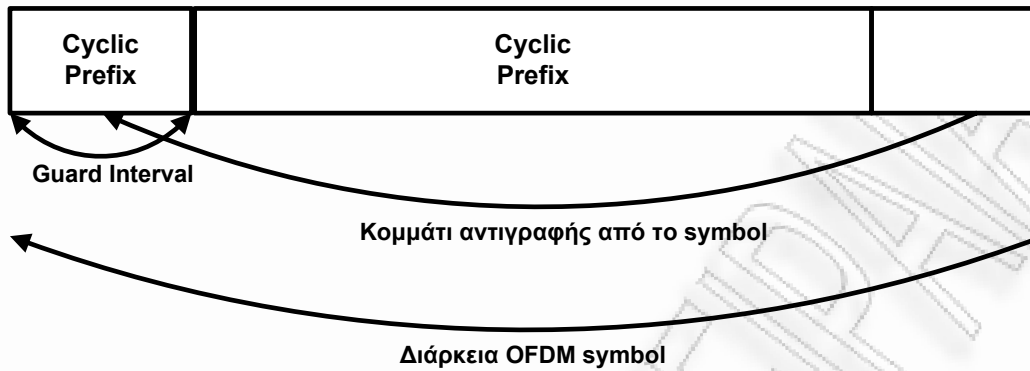
Η αρχή του πομπού σε οποιοδήποτε σύστημα OFDMA είναι να χρησιμοποιηθούν οι στενοί, αμοιβαίοι ορθογώνιοι υποφορές. Στο LTE το διάστημα των υποφορέων είναι 15 KHz ανεξάρτητα από το συνολικό εύρος ζώνης μετάδοσης. Οι διαφορετικοί υποφορές είναι ορθογώνιοι ο ένας με τον άλλο δεδομένου ότι τη στιγμή της δειγματοληψίας ενός μονού υποφορέα οι άλλοι υποφορές έχουν μια μηδενική αξία όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα. Ο πομπός ενός OFDMA συστήματος χρησιμοποιεί το block του IFFT για να δημιουργήσει το σήμα. Πηγές δεδομένων τροφοδοτούν την μετατροπή σειριακής σε παράλληλη και περαιτέρω στο block IFFT. Κάθε είσοδος για το IFFT block αντιστοιχεί στην είσοδο που αντιπροσωπεύει ένα ιδιαίτερο υποφορέα (ή ιδιαίτερο στοιχείο συχνότητας του σήματος στο πεδίο του χρόνου) και μπορεί να διαμορφωθεί ανεξάρτητα από τους άλλους υποφορές. Το block IFFT ακολουθείται με την προσθήκη της κυκλικής επέκτασης όπως φαίνεται στη εικόνα. Το κίνητρο για την προσθήκη της κυκλικής επέκτασης είναι να αποφευχθεί η διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference-ISI). Όταν ο πομπός προσθέτει μια κυκλική επέκταση μεγαλύτερη από την κρουστική απόκριση του καναλιού, η επίδραση του προηγούμενου συμβόλου μπορεί να αποφευχθεί από την αδιαφορία της κυκλικής επέκτασης στο δέκτη.



Εικόνα 3.18 Πομπός και Δέκτης OFDMA

Το κυκλικό πρόθεμα προστίθεται από την αντιγραφή μέρους του συμβόλου στο τέλος και την ένωση του στην αρχή του συμβόλου. Η χρήση της κυκλικής επέκτασης είναι προτιμότερη σε μια απλή διακοπή στην μετάδοση (διάστημα προστασίας) όπως στο σύμβολο OFDM κατόπιν φαίνεται να είναι περιοδικό. Όταν τώρα το σύμβολο OFDMA εμφανίζεται ως περιοδικό λόγω της κυκλικής επέκτασης, αντίκτυπος του καναλιού καταλήγει σε ένα πολλαπλασιασμό από έναν κλιμακωτό, υποθέτοντας ότι η κυκλική επέκταση είναι αρκετά μεγάλο. Η περιοδική φύση των σημάτων ωστόσο επιτρέπει για ένα διακριτό φάσμα Fourier, την χρήση του DFT και του IDFT στον δέκτη και στον πομπό αντίστοιχα.

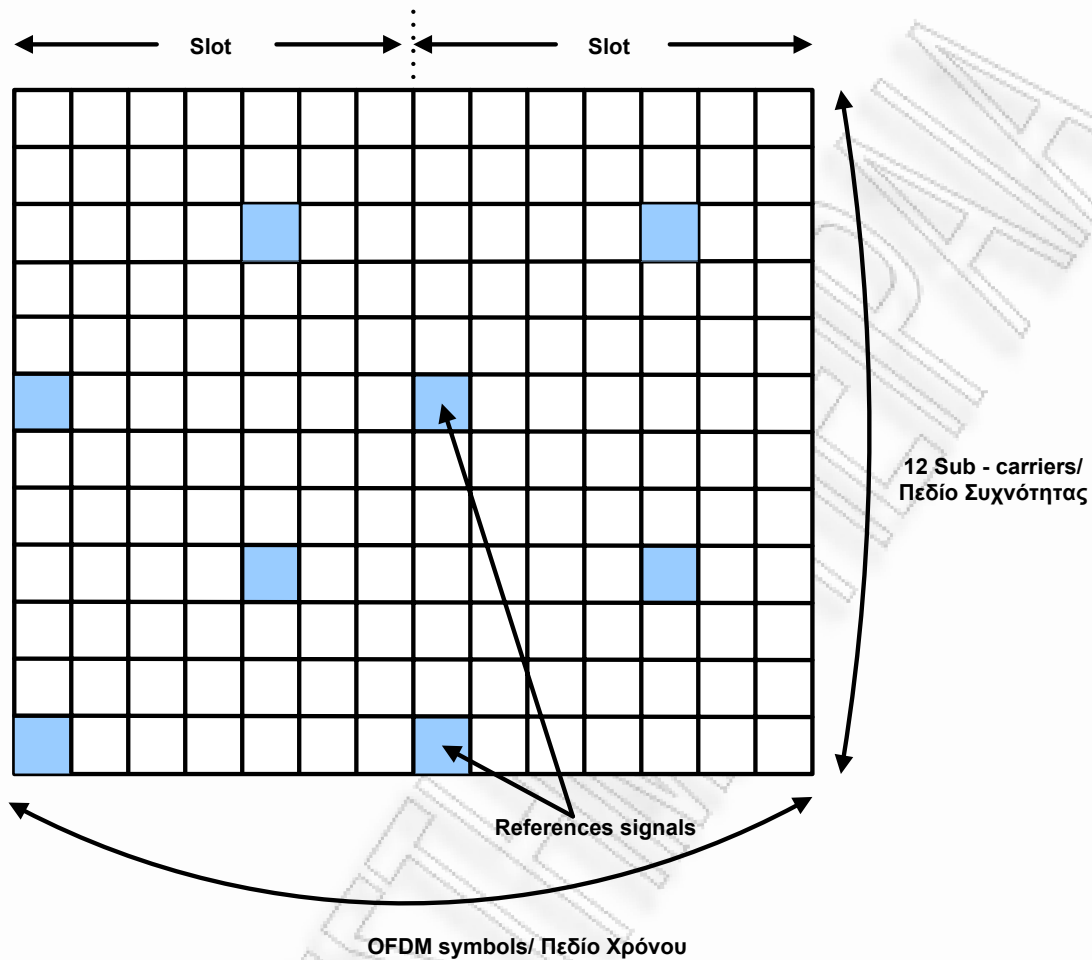
Τυπικά το διάστημα προστασίας έχει σχεδιαστεί με σκοπό να είναι τέτοιο που υπερβαίνει την διάδοση της καθυστέρησης στο περιβάλλον όπου το σύστημα προορίζεται να λειτουργεί. Εκτός από την διάδοση καθυστέρησης στο κανάλι, ο αντίκτυπος του πομπού και δέκτη φιλτραρίσματος χρειάζεται να καταχωρηθεί στο σχεδιασμό του διαστήματος προστασίας. Ο δέκτης OFDMA καταλαβαίνει το σύμβολο OFDMA να έρχεται όπως μέσω ενός FIR φίλτρου, χωρίς διαχωρισμό των επιμέρους στοιχείων της συχνότητας όπως το δέκτη RAKE. Ετσι παρόμοια με τη διάδοση καθυστέρησης καναλιού το μήκος του φίλτρου που εφαρμόζεται στο σήμα στο δέκτη και στην πλευρά του πομπού θα κάνει τη συνολική επίδραση φιλτραρίσματος μεγαλύτερη από την καθυστέρηση που διαδίδεται.



Εικόνα 3.19 Δημιουργία ζωνών προστασίας για το σύμβολο OFDMA.

Ενώ ο δέκτης δεν ασχολείται με την διασυμβολική παρεμβολή πρέπει ακόμα να εξετάσει τον αντίκτυπο του καναλιού για τους μεμονωμένους υποφορείς που η δοκιμασμένη συχνότητα εξαρτάται από τις αλλαγές της φάσης και του πλάτους. Αυτή η εκτίμηση του καναλιού διευκολύνεται από την κατοχή μέρους των συμβόλων γνωστά ως σύμβολα αναφοράς ή πιλοτικά. Με την κατάλληλη τοποθέτηση των συμβόλων στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας ο δέκτης μπορεί να παρεμβάλει την επίδραση του καναλιού στους διαφορετικούς υποφορείς από το πλέγμα συμβόλων αναφοράς του πεδίου του χρόνου και της συχνότητας.





Εικόνα 3.20 Σύμβολα αναφοράς διασκορπισμένα πάνω στα OFDMA υποφορείς και σύμβολα.

Ένας χαρακτηριστικός τύπος λύσης δέκτη είναι ο εξισωτής πεδίου συχνότητας, ο οποίος επαναφέρει τον αντίκτυπο του καναλιού για κάθε υποφορέα. Ο εξισωτής πεδίου συχνότητας OFDMA πολλαπλασιάζει κάθε υποφορέα βασισμένο στην κατ' εκτίμηση συχνότητα απόκρισης καναλιού. Αυτό σαφώς είναι μια απλούστερη λειτουργία έναντι του WCDMA και δεν εξαρτάται από το μήκος των καναλιών όπως είναι ο εξισωτής στο WCDMA. Οι πρόσθετοι στόχοι που ο δέκτης OFDMA πρέπει να καλύψει είναι ο συγχρονισμός χρόνου και συχνότητας. Ο συγχρονισμός επιτρέπει το σωστό πλαίσιο και συγχρονισμό συμβόλων OFDMA για να ληφθεί έτσι ώστε το σωστό μέρος του λαμβανόμενου σήματος πέφτει (αφαίρεση του κυκλικού προθέματος). Ο χρονικός συγχρονισμός λαμβάνεται τυπικά από το συσχετισμό με τα γνωστά δείγματα δεδομένων για παράδειγμα τα σύμβολα αναφοράς και τα πραγματικά λαμβανόμενα στοιχεία. Ο χρονισμός συχνότητας υπολογίζει το offset της συχνότητας μεταξύ του πομπού και του δέκτη και με μια καλή εκτίμηση του offset της συχνότητας μεταξύ της συσκευής και του σταθμού βάσης, ο αντίκτυπος μπορεί να αντισταθμιστεί για τμήματα του δέκτη και του πομπού. Οι συσκευές κλειδώνουν την συχνότητα που λαμβάνεται από το σταθμό βάσης δεδομένου ότι ο ταλαντωτής συσκευών δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτός στο σταθμό βάσης.

Μια σημαντική πτυχή της χρήσης του OFDMA σε ένα πομπό του σταθμού βάσης είναι ότι οι χρήστες μπορούν να κατανεμηθούν σε οποιοδήποτε από τους υποφορείς στο πεδίο της συχνότητας. Αυτό είναι ένα πρόσθετο στοιχείο στην λειτουργία προγραμματισμού του HSDPA,

όπου οι κατανομές ήταν μόνο στο πεδίο χρόνου και στο πεδίο κώδικα αλλά πάντα κατέλαβαν το ολόκληρο το εύρος ζώνης. Η δυνατότητα των διαφορετικών υποφορέων στους κατανομημένους χρήστες επιτρέπει στον προγραμματιστή να ωφεληθεί από την ποικιλομορφία στο πεδίο συχνότητας, αυτή η ποικιλομορφία που οφείλεται στην στιγμιαία παρεμβολή και στις διαφορετικές εξασθενίσεις στα διάφορα μέρη του συστήματος εύρους ζώνης. Ο πρακτικός περιορισμός είναι η ανάλυση της σηματοδοσίας λόγω της κατάληξης από πάνω σημαίνει ότι η κατανομή δεν γίνεται σε μεμονωμένη βάση υποφορέων αλλά είναι βασισμένη σε block πόρων, κάθε ένας αποτελείται από 12 υποφορείς που έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη κατανομή του εύρους ζώνης που είναι 180KHz.

Όταν η αντίστοιχη ανάλυση κατανομής στο πεδίο του χρόνου είναι 1ms, η downlink μετάδοση κατανομή των πόρων σημαίνει την πλήρωση της συγκέντρωσης πόρων με 180KHz blocks στα 1ms ανάλυση όπως φαίνεται στο σχήμα. Η μετάδοση OFDMA στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από διάφορους παράλληλους υποφορείς, οι οποίοι στο πεδίο του χρόνου αντιστοιχούν σε πολλαπλά ημιτονοειδή κύματα με διαφορετικές συχνότητες γεμίζοντας το σύστημα του εύρους ζώνης με βήματα των 15 KHz. Αυτό προκαλεί τα όρια των διακυμάνσεων του σήματος να ποικίλουν έντονα όπως φαίνεται στο σχήμα, συγκριτικά με ένα κανονικό διαμορφωτή QAM ο οποίος στέλνει μόνο ένα σύμβολο τη φορά (στο πεδίο χρόνου). Το στιγμιαίο ποσό των ημιτονοειδών οδηγεί στην γκαουσιανή διανομή των διαφορετικών μέγιστων τιμών πλάτους. Αυτό προκαλεί μερικές προκλήσεις στο σχεδιασμό του ενισχυτή όπως σε ένα κυψελλωτό σύστημα, ένα πρέπει να στοχεύει στη μέγιστη απόδοση ισχύος του ενισχυτή για να επιτύχει την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Το σχήμα επεξηγεί πως ένα σήμα με υψηλή παραλλαγή των ορίων διακυμάνσεων απαιτεί τον ενισχυτή για χρησιμοποίηση πρόσθετη επιστροφή σε αντίθεση με το κανονικό σήμα φέροντος. Ο ενισχυτής πρέπει να μείνει σε περιοχή γραμμικότητας με τη χρήση της πρόσθετης επιστροφής ισχύος προκειμένου να αποτραπούν προβλήματα στο σήμα εξόδου και στο φάσμα. Η χρήση της πρόσθετης επιστροφής οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας της ισχύος του ενισχυτή ή σε μια μικρότερη έξοδο ισχύος. Αυτό προκαλεί είτε το φάσμα του uplink για να είναι μικρότερο ή όταν το ίδιο μέσο επίπεδο της ισχύος εξόδου διατηρείται, η ενέργεια της μπαταρίας καταναλώνεται γρηγορότερα λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος του ενισχυτή. Το τελευταίο δεν θεωρείται πρόβλημα σε σταθερές εφαρμογές όπου η συσκευή έχει ένα μεγάλο όγκο και είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο αλλά και για μικρές φορητές συσκευές που λειτουργούν με δικές τους μπαταρίες δημιουργεί περισσότερες προκλήσεις. Αυτός ήταν ο βασικός λόγος για τον οποίο το 3GPP αποφάσισε να χρησιμοποιήσει OFDMA στην διεύθυνση κατερχόμενης σύνδεσης αλλά και στην χρήση της αποδοτικότητας ισχύος του SC-FDMA στην κατεύθυνση της ανερχόμενης σύνδεσης.

### 3.8 SC-FDMA Basics

Η SC-FDMA έχει επιλεγεί για την ανερχόμενη ζεύξη (uplink), δηλαδή για την μετάδοση από το UE στο eNodeB. Η Single-carrier FDMA (SC-FDMA) [16], [25] αναφέρετε σε διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης, δηλαδή, η έκδοση του Single-carrier frequency-domain equalization (SC-FDE)) και υποστηρίζει πολλαπλούς χρήστες. Το SC-FDE μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμικά προκωδικοποιημένο σχέδιο OFDM, ενώ το SC-FDMA ως γραμμικά προκωδικοποιημένο OFDMA σχέδιο, άρα LP-OFDMA. Επίσης, μπορεί να αντιμετωπισθεί ως single carrier multiple access scheme. Ένα προεξέχον πλεονέκτημα των OFDM και OFDMA είναι ότι τα σήματα SC -FDE και LP- OFDMA/SC-FDMA έχουν χαμηλότερο peak-to-average power ratio (PAPR) λόγω της έμφυτης ενιαίας δομής των μεταφορέων (carrier).

Με την προσέγγιση του προκωδικοποιημένου FFT της ακολουθίας δεδομένων και την απεικόνιση των προκωδικοποιημένων FFT ακολουθίας δεδομένων σε ομοιόμορφα κατανομημένα subcarriers στην είσοδο του IFFT. Η ομοιόμορφη απόσταση καθορίζεται από τον παράγοντα επανάληψη Q. Ο πολλαπλασιασμός των επαναλαμβανόμενων σειράς δεδομένων με έναν συγκεκριμένο χρήστη διάνυσμα φάσης μπορεί να θεωρηθεί ως αλλαγή συχνότητας που εφαρμόζεται προκειμένου να απεικονίσει μεταδόσεις από πολλούς χρήστες σε μη επικαλυπτόμενα ορθογώνια subcarriers. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε σύμβολο

διαμόρφωσης δεδομένων είναι απλωμένο σε όλα τα subcarriers που χρησιμοποιείται από το UE. Αυτό μπορεί να παρέχει μια συχνότητα-ποικιλομορφίας παροχών σε επιλεκτική συχνότητα καναλιού. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν κάποιες επιπτώσεις στην απόδοση καθώς και λόγω της απώλειας της βελτίωσης της ορθογωνιότητας ή θορύβου όταν τα δεδομένα subcarriers εμπειρία επιλεκτικής συχνότητας ξεθωριάσματος. Εμείς θα αναφερθούμε στο IFDMA ως διανεμημένο FDMA (DFDMA). Η απεικόνιση του προκωδικοποιημένου FFT σειράς δεδομένων σε συνεχόμενα αποτελέσματα υποφορέων σε μία τοπική μετάδοση στο πεδίο της συχνότητας. Παρόμοια με την DFDMA, εντοπισμένη αποτελέσματα της απεικόνισης του επίσης σε ένα χαμηλό σήμα PAPR. Η διανομή και η τοπική απεικόνιση του προκωδικοποιημένου FFT ακολουθίας δεδομένων σε OFDM subcarriers μερικές φορές αναφέρονται ως DFT-εξάπλωση του OFDM.

Στο κατανεμημένο FDMA, τα εισερχόμενα δείγματα στο IFFT είναι:

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_{\frac{l}{Q}}, & l = Q \cdot k, 0 \leq k \leq M-1 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.30)$$

Ορίζουμε  $n = M \times q + m$ , όπου  $0 \leq q \leq Q-1$  και  $0 \leq m \leq M-1$ . Τα δείγματα στο πεδίο του χρόνου κατά την έξοδο του IDFT είναι:

$$\tilde{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{X}_l e^{j2\pi \frac{n}{N} l} \quad \text{από την εξίσωση } \tilde{X}_l \quad \Rightarrow \quad \tilde{x}_n = \frac{1}{Q \cdot M} \sum_{l=0}^{M-1} X_k e^{j2\pi \frac{n}{M} k} \quad (3.31)$$

Τότε

$$\tilde{x}_n = \frac{1}{Q \cdot M} \sum_{l=0}^{M-1} X_k e^{j2\pi \frac{M \times q + m}{M} k} = \frac{1}{Q} \left( \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} X_k e^{j2\pi \frac{m}{M} k} \right) = \frac{1}{Q} x_m \quad (3.32)$$

Σύμβολα στο πεδίο του χρόνου στην έξοδο μεγέθους N στο IDFT είναι επαναλήψεις συμβόλων στο πεδίο του χρόνου στην είσοδο μεγέθους M στο DFT.

Στο τοπικό FDMA, τα εισερχόμενα δείγματα στο IFFT είναι:

$$\tilde{X}_l = \begin{cases} X_l, & 0 \leq l \leq M-1 \\ 0, & M \leq l \leq N-1 \end{cases} \quad (3.33)$$

Ορίζουμε  $n = Q \times m + q$ ,  $0 \leq m \leq M$  και  $0 \leq q \leq M-1$ . Τα δείγματα στο πεδίο του χρόνου κατά την έξοδο του IDFT είναι:

$$\tilde{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{X}_l e^{j2\pi \frac{n}{N} l} \quad \text{από την εξίσωση } \tilde{X}_l \quad \Rightarrow \quad \tilde{x}_n = \frac{1}{Q \cdot M} \sum_{l=0}^{M-1} X_l e^{j2\pi \frac{Q \times m + q}{Q \cdot M} k} \quad (3.34)$$

Για  $q=0$  έχουμε:

$$\tilde{x}_n = \frac{1}{Q} \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} X_l e^{j2\pi \frac{m}{M} k} = \frac{1}{Q} \tilde{x}_m \quad (3.35)$$

Επομένως, κάθε Q-οστό στο πεδίο του χρόνου του δείγματος στην έξοδο μεγέθους N στο IDFT είναι το ίδιο με το δείγμα στο πεδίο του χρόνου στην είσοδο μεγέθους M στο DFT. Για  $q \neq 0$ , το δείγμα στο πεδίο του χρόνου στην έξοδο μεγέθους N στο IDFT είναι το άθροισμα των

δειγμάτων στο πεδίο του χρόνου κατά την είσοδο μεγέθους  $M$  στο DFT με διαφορετική περίπλοκη διαδικασία στάθμισης.

Όλα τα UES χρησιμοποιούν το ίδιο  $N$  μέγεθος στο IDFT. Ωστόσο, διαφορετικά UES μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά προκωδικοποιημένα DFT μεγέθη. Το μέγεθος του προκωδικοποιημένου DFT για ένα UE είναι ανάλογη με την ορθογωνιότητα των subcarriers που διατίθενται για το UE για την uplink μετάδοση. Έστω  $M_i$  το προκωδικοποιημένο DFT μέγεθος για το  $i$ -οστό UE, τότε έχουμε:

$$\sum_{i=1}^K M_i \leq (N - G) \quad (3.36)$$

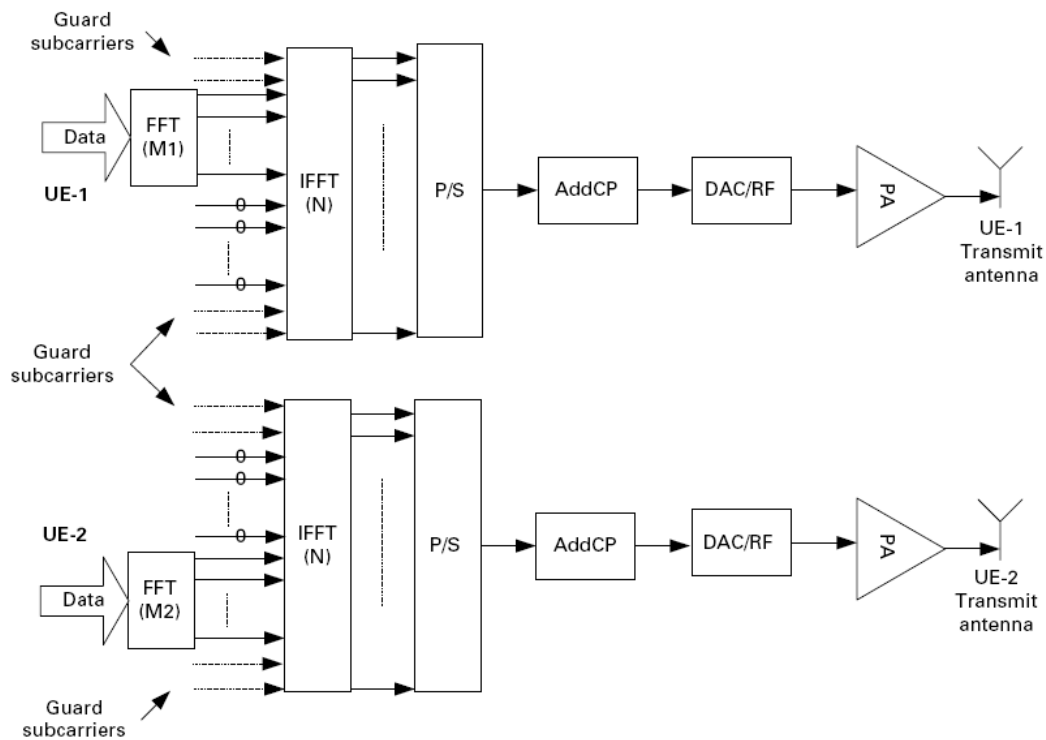
Όπου,

K: ο αριθμός των UEs ταυτόχρονης μετάδοσης

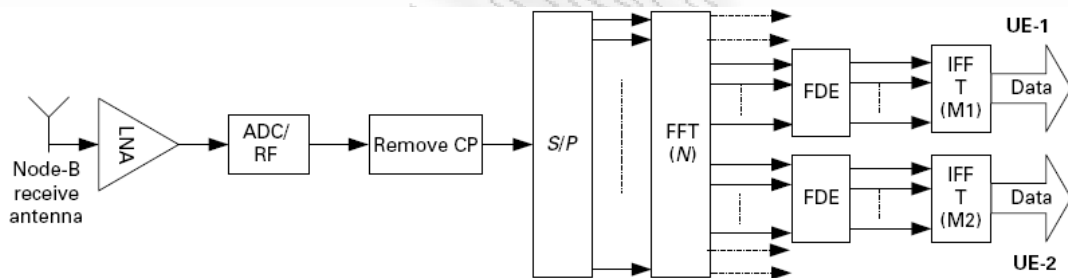
G: ο αριθμός των guard υποφορέων.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αλυσίδες μετάδοσης και λήψης για LFDMA. Ένα κυκλικό πρόθεμα προστίθεται μετά την λειτουργία του IDFT και η προκύπτουσα ακολουθία είναι up-converted σε RF, ενισχύεται και μεταδίδεται. Όλα τα UES ταυτόχρονη μετάδοσης με τα δεδομένα τους να αντιστοιχίζονται με ορθογώνια subcarriers εκτέλεσης αυτής της λειτουργίας ανεξάρτητα. Κάθε ενισχυτής ισχύος UE βλέπει στη συνέχεια μια ενιαία προκωδικοποιημένη FFT μετάδοση, η οποία οδηγεί σε χαμηλό peakiness σήμα μετάδοσης μονής φέρουσας. Στην μετάδοση λήψης για LFDMA, τα UE1 και UE2 χρησιμοποιούν DFT μεγέθη των  $M_1$  και  $M_2$ , για μετάδοση από τους αντίστοιχους ενισχυτές ισχύος τους. Αν απεικονίσουμε προκωδικοποιημένες FFTακολουθίες στοιχείων των UE1 και UE2 στην ίδια IDFT και μεταδίδουν από έναν μόνο ενισχυτή ισχύος που θα είναι πλέον ένα χαμηλό peakiness σήματος ενός φορέα μετάδοσης. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους SC-FDMA δεν θεωρείται γενικά για downlink μεταδόσεις. Στο downlink, το Node-B μεταδίδει γενικά ταυτόχρονα μηνύματα προς πολλαπλά UES σε ορθογώνια subcarriers χρησιμοποιώντας έναν ενιαίο κοινό ενισχυτή.

Στην πλευρά του δέκτη, το λαμβανόμενο σήμα φιλτράρεται, ενισχύεται και down-converted από RF. Το κυκλικό πρόθεμα δειγμάτων απορρίπτονται και ένα μέγεθος  $N$  στην DFT λειτουργία γίνεται με την ακολουθία των λαμβανόμενων δειγμάτων. Τα σύμβολα για κάθε UE χωρίζονται από τη συλλογή δεδομένων από τα subcarriers που διατίθενται σε ένα UE. Ένα πεδίο συχνότητας εξίσωσης (FDE) λειτουργίας γίνεται με εκτιμήσεις καναλιού που τα σήματα αναφοράς λαμβάνονται για κάθε UE. Μια IDFT λειτουργία στη συνέχεια γίνεται χωριστά για κάθε UE να ανακτήσει τα μεταδιδόμενα δεδομένα ακολουθίας. Τα στοιχεία αποδιαμόρφωσης στο SC-FDMA συμβαίνει στο πεδίο του χρόνου μετά την IDFT λειτουργία.



Εικόνα 3.21 Πομπός SC-FDMA.



Εικόνα 3.22 Δέκτης SC-FDMA.

Η SC-FDMA αποτελείται επίσης από subcarriers, όπως η OFDM αλλά μεταδίδεται σε subcarriers σε ακολουθία μη παράλληλων, η οποία εμποδίζει διακυμάνσεις στην παροχή ρεύματος σε SC-FDMA σήματα, δηλαδή το PAPR είναι χαμηλό. Αντίθετα, το υψηλό PAPR απαιτεί ακριβούς και ανεπαρκείς ενισχυτές ισχύος με υψηλές απαιτήσεις στη γραμμικότητα, η οποία αυξάνει το κόστος του τερματικού και εξαντλεί την μπαταρία γρηγορότερα.

Σε ένα κυψελοειδές σύστημα με μετάδοση σε multipath περιβάλλον, τα SC-FDMA σήματα μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων όταν φτάνουν στο σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί την προσαρμοστική εξίσωση στο πεδίο των συχνοτήτων για να ακυρωθεί η παρεμβολή μεταξύ συμβόλων.

Τα περισσότερα κινητά τερματικά έχουν μια μπαταρία, επομένως είναι μια καλή ιδέα να εκτελούνται ορισμένες σύνθετες λειτουργίες όπως η εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας στο σταθμό βάσης και όχι βάζοντας οποιαδήποτε επιβάρυνση, όπως γραμμική ενίσχυση ισχύος, από το κινητό τερματικό επειδή αρκετοί πόροι είναι διαθέσιμοι σε σταθμό βάσης.

Επομένως συμπεραίνουμε ότι η SC-FDMA συγκεντρώνει τις ομάδες πόρων με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώσει την ανάγκη για τη γραμμικότητα και την κατανάλωση ισχύος στον ενισχυτή ισχύος. Ένα χαμηλό PAPR βελτιώνει την κάλυψη και την απόδοση της κυψέλης.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

## Κεφάλαιο 4 –Scheduling Αλγόριθμοι

### 4.1 Χρονοπρογραμματισμός σε Ασύρματα Δίκτυα

Με τον όρο χρονοπρογραμματισμό (scheduling) εννοούμε το πρόβλημα εύρεσης μιας βέλτιστης σειράς για την εκτέλεση ενός συνόλου λειτουργιών, ενώ ταυτόχρονα δεν παραβιάζονται συγκεκριμένοι κανόνες. Επιπλέον, scheduling εννοούμε την διαδικασία επιλογής ενός πακέτου προς αποστολή.

Τα βασικά είδη των χρονοπρογραμματιστών (Schedulers) είναι τα παρακάτω:

- Μακροπρόθεσμος Χρονοπρογραμματιστής (Long-term scheduler ή job scheduler), ο οποίος επιλέγει από την ουρά εισόδου ποιες διεργασίες θα εισέλθουν στην ουρά έτοιμων διεργασιών. Ο μακροπρόθεσμος χρονοπρογραμματιστής καλείται αραιά και ελέγχει το βαθμό του πολυπρογραμματισμού.
- Βραχυπρόθεσμος Χρονοπρογραμματιστής (Short-term scheduler ή CPU scheduler), ο οποίος επιλέγει τη διεργασία η οποία θα εκτελεστεί και της αναθέτει την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Ο βραχυπρόθεσμος χρονοπρογραμματιστής καλείται πολύ συχνά (milliseconds) και πρέπει να είναι γρήγορος.

Τα Κριτήρια του Χρονοπρογραμματισμού είναι τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποίηση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU utilization). Η CPU πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο απασχολημένη.
- Ρυθμός διεκπεραίωσης (throughput). Το πλήθος των διεργασιών που ολοκληρώνουν την εκτέλεσή τους στη μονάδα του χρόνου.
- Χρόνος ολοκλήρωσης (turn around time). Ο χρόνος που μεσολαβεί από την υποβολή ως την ολοκλήρωση της διεργασίας.
- Χρόνος αναμονής (waiting time). Ο χρόνος που μια διεργασία περιμένει στην ουρά έτοιμων διεργασιών.
- Χρόνος απόκρισης (response time). Ο χρόνος που απαιτείται από την υποβολή μιας αίτησης που αφορά μια διεργασία μέχρι να δρομολογηθεί η διεργασία στην μονάδα επεξεργασίας (όχι όμως και να παράγει κάποιο ορατό στο χρήστη αποτέλεσμα).

Ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού προσπαθεί να επιτύχει:

- Την μεγιστοποίηση της χρησιμοποίησης της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας.
- Την μεγιστοποίηση του ρυθμού διεκπεραίωσης.
- Την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης.
- Την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής.
- Την ελαχιστοποίηση του χρόνου απόκρισης.
- Δικαιοσύνη (fairness).
- Αποδοτικότητα (efficiency).

Στις επόμενες ενότητες γίνεται μελέτη αλγορίθμων (Maximum CIR, Round Robin, Proportional Fair, HASA, Softer Frequency Reuse Scheduling, RSSA) χρονοπρογραμματισμού στο LTE. Σε ένα ασύρματο περιβάλλον όπως το LTE είναι αναγκαίο ο αποστολέας να ελέγχει την κατάσταση του καναλιού πριν από την μετάδοση. Όμως, ο συνεχής έλεγχος του μέσου και η περιττή λήψη πακέτων καταναλώνουν ενέργεια. Η κατανάλωση της ενέργειας αυτής μπορεί να μειωθεί αν στηρίζεται στην αποστολή πακέτων βάση ενός χρονοπρογραμματιστή. Ο χρονοπρογραμματιστής καθορίζει την χρονική στιγμή που ο αποστολέας θα στείλει τα δεδομένα μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας από τις άσκοπες μεταδόσεις.

## 4.2 Maximum CIR Algorithm (Max C/I)

Στο Max C/I scheduling, το κανάλι κατανέμεται σε κάθε Transmit Time Interval (TTI) προς το χρήστη έχοντας το καλύτερο Signal-to-Interference-and-Noise Ratio (SINR), με άλλα λόγια την καλύτερη ποιότητα καναλιού. Αυτός ο χρονοπρογραμματισμός μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα καναλιού αλλά δεν εγγυάται οποιαδήποτε QoS προς το χρήστη. Χρήστες στο όριο του κελιού έχουν μειωμένες συνθήκες καναλιού (εξαιτίας της απόσβεσης, της παρεμβολής και της απουσίας γρήγορου ελέγχου ισχύος) και εμπειρία χαμηλού ρυθμού bit [33].

Το bit rate του χρήστη επιτυγχάνεται από αυτόν το χρονοπρογραμματισμό που εξαρτάται από το μοντέλο ασύρματου καναλιού. Υπολογίζουμε το ρυθμό απόδοσης του κελιού και bit rate του χρήστη στην περίπτωση των ασυσχέτιστων και συσχετιζόμενων Rayleigh fading καναλιών.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η χωρητικότητα του κελιού και το bit rate του χρήστη, η πιθανότητα να δοθεί σε ένα χρήστη (π.χ. χρήστη  $i$ ) όπου είναι κατανομημένη στο κανάλι συμβολίζεται το  $\Pr(i)$  και στη συνέχεια υπολογίζεται ως εξής [30]:

$$\Pr(i) = \text{Prob}(\text{SINR}_i > \text{SINR}_j, \text{ για } j = 1 \dots N_u \text{ και } j \neq i) = \prod_{j \neq i}^{N_u} \text{Prob}(\text{SINR}_i > \text{SINR}_j) \quad (4.1)$$

όπου  $N_u$  είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών μέσα στο κελί. Η έκφραση  $\text{SINR}_i > \text{SINR}_j$  εκφράζεται ως εξής:

$$\left( \sum_{l_i=1}^{N_T} |a_{l_i,i}|^2 \right) X_i > \left( \sum_{l_j=1}^{N_T} |a_{l_j,j}|^2 \right) X_j \quad (4.2)$$

όπου το  $X_i$  για χρήστη  $i$  είναι :

$$X_i = \frac{10^{bs_i/10}}{\sum_{l \neq i} P_l \left( \frac{d_l}{d_i} \right)^{-\mu} 10^{bs_l/10}} \quad (4.3)$$

όπου  $s_i$  αντιστοιχεί σε log-normal σκίαση με μηδέν μέσο και τυπική απόκλιση  $\sigma$  ( $\sigma^2$  μεταξύ 8 και 12dB). Η χαμένη σκίαση  $s$  συσχετίζεται ανάμεσα στα BSs [34]. Το αποτέλεσμα αυτό συνήθως διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την σκίαση όπως ένα άθροισμα σε dB από ένα

κοινό στοιχείο προς όλους τους σταθμούς βάσεων  $s_c$  και ένα στοιχείο  $s_{si}$  συγκεκριμένο προς το σταθμό βάσης  $i$  κόμβου BS $i$ . Η έκφραση της χαμένης σκίασης δίνεται παρακάτω:

$$s_i = as_c + bs_{si} \quad (4.4)$$

όπου  $a^2 + b^2 = 1$ . Ο μέσος και οι διακυμάνσεις των log-normal μεταβλητών είναι:

$$E(s_i) = E(s_c) = E(s_{si}) = 0 \quad (4.5)$$

$$\text{Var}(s_i) = \text{Var}(s_c) = \text{Var}(s_{si}) = \sigma^2 \quad (4.6)$$



$$E(s_{si}s_{sk}) = 0 \text{ εάν } i \neq k \quad (4.7)$$

το  $a_{l,i}$  είναι το σύνθετο μονοπάτι του κέρδους μεταξύ του χρήστη  $i$  και serving NodeB,  $N_T$  είναι ο αριθμός των διαχωρίσιμων στοιχείων πολλαπλών διαδρομών και  $d_i$  είναι η απόσταση ανάμεσα του χρήστη  $i$  και serving NodeB.

Η συνάρτηση κατανομής της έκφρασης  $v = \left( \sum_{l=1}^{N_T} |a_l|^2 \right) X_i$  μπορεί να προσεγγιστεί από:

$$pdf(v) = \sum_{l=1}^{N_T} \frac{(\Omega_l)^{N_T-2}}{\prod_{r \neq l} (\Omega_l - \Omega_r)} \frac{\varepsilon}{\sqrt{2\pi\sigma_f v}} e^{-\frac{(10 \log v - 10 \log \Omega_l - \mu_f)^2}{2\sigma_f^2}} \quad (4.8)$$

όπου  $\Omega_l = E(|a_l|^2)$ ,  $\mu_f = -\varepsilon C + \mu_x$ ,  $\sigma_f^2 = \varepsilon^2 \zeta(2.2) + \sigma_x^2$ .  $C = 0.5772$  είναι η σταθερά του Euler και  $\zeta(2.2) = \pi^2/6$  είναι η συνάρτηση του Riemann-Zeta Function.

Η πιθανότητα  $\text{Prob}(SIR_i > SIR_j) =$

$$\sum_{l_i=1}^{N_T} \sum_{l_j=1}^{N_T} \frac{(\Omega_{l_i,i})^{N_T-2}}{\prod_{r_i \neq l_i} (\Omega_{l_i,i} - \Omega_{r_i,i})} \frac{(\Omega_{l_j,j})^{N_T-2}}{\prod_{r_j \neq l_j} (\Omega_{l_j,j} - \Omega_{r_j,j})} \times \left[ Q \left( -\frac{10 \log \Omega_{l_i,i} + \mu_{f,i} - 10 \log \Omega_{l_j,j} + \mu_{f,j}}{\sqrt{\sigma_{f,i}^2 + \sigma_{f,j}^2}} \right) \right] \quad (4.9)$$

Συνεπώς το bit rate του χρήστη  $i$  δίνεται από:

$$R_i = \text{Pr}(i) \sum_{CQI} \frac{R_{CQI} P_{CQI,i}}{N_s} = \text{Pr}(i) \sum_{CQI} \frac{TBS_{CQI} P_{CQI,i}}{CQI TTI_{delay} N_s} \quad (4.10)$$

όπου  $R_{CQI}$  είναι το στιγμιαίο bit rate αναφέροντας σε CQI (δείκτης ποιότητας καναλιού) και  $P_{CQI,i}$  είναι η διακριτή πιθανότητα και αναφέρεται στο CQI στη θέση του χρήστη  $i$ , το  $N_s$  είναι ο αριθμός των αντίστοιχων HARQ μεταδόσεων, το  $TBS_{CQI}$  είναι το transport block size αναφέρεται στο CQI σύμφωνα με τον πίνακα αντιστοιχίας σε σχέση με την τερματική κατηγορία και το  $TTI_{delay}$  είναι το χρονικό διάστημα μετάδοσης (ίσον με 2 ms στην περίπτωση του HSDPA-High Speed Downlink Packet-Access).

Στην περίπτωση της συσχέτιση Rayleigh fading, το bit rate του χρήστη μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο που περιγράψαμε προηγουμένως (δηλαδή στην

περίπτωση μη συσχέτισης Rayleigh fading). Συνεπώς, η πιθανότητα που το κανάλι κατανέμεται στον χρήστη  $i$  δίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \text{Pr}(i) &= \text{Prob}(\text{SINR}_i > \text{SINR}_j \text{ για } j=1 \dots N_u \text{ και } j \neq i) = \prod_{j \neq i}^{N_u} \text{Prob}(\text{SINR}_i > \text{SINR}_j) \quad (4.11) \\ &= \prod_{j \neq i}^{N_u} \frac{1}{\prod_{l_i=1}^{N_T} \lambda_{l_i,i}} \frac{1}{\prod_{l_j=1}^{N_T} \lambda_{l_j,j}} \sum_{l_i=1}^{N_T} \sum_{l_j=1}^{N_T} \frac{1}{\prod_{r_i \neq l_i}^{N_T} \left( \frac{1}{\lambda_{r_i,i}} - \frac{1}{\lambda_{l_i,i}} \right)} \frac{1}{\prod_{r_j \neq l_j}^{N_T} \left( \frac{1}{\lambda_{r_j,j}} - \frac{1}{\lambda_{l_j,j}} \right)} \\ &\times \left[ Q \left( - \frac{10 \log \lambda_{l_i,i} + \mu_{f,i} - 10 \log \lambda_{l_j,j} + \mu_{f,j}}{\sqrt{\sigma_{f,i}^2 + \sigma_{f,j}^2}} \right) \right] \quad (4.12) \end{aligned}$$

όπου  $\lambda_l, l = 1 \dots N_T$  είναι οι ιδιοτιμές του πίνακα DC. Οι πίνακες D και C είναι  $N_T \times N_T$  path ενέργειας και συνδιασποράς:

$$D = \begin{pmatrix} \Omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Omega_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Omega_{N_T} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{\rho_{12}} & \dots & \sqrt{\rho_{1N_T}} \\ \sqrt{\rho_{21}} & 1 & \dots & \sqrt{\rho_{2N_T}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sqrt{\rho_{N_T1}} & \sqrt{\rho_{N_T2}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

όπου  $\rho_{l,l'}$  είναι παράμετρος συσχέτισης μεταξύ των paths  $l$  και  $l'$ .

Ο αλγόριθμος Maximum Rate (MR) με στόχο τη μεγιστοποίηση του ρυθμού δεδομένων του συστήματος των OFDMA συστημάτων. Ο ρυθμός μεγιστοποίησης σε ένα πολλαπλό link σενάριο αποτελείται από ένα κλασικό πρόβλημα που έχει ως στόχο να αξιοποιήσει το εύρος ζώνης του συστήματος με αποτελεσματικό τρόπο, με την έννοια ότι το BS μπορεί να μεταδώσει, σε μια δεδομένη ευκαιρία μετάδοσης, με το μέγιστο ποσοστό συγκεντρωτικών στοιχείων στο να εξυπηρετούνται τα UEs [36].

Η λύση του προβλήματος MR είναι αρκετά απλή. Ο αλγόριθμος αναθέτει κάθε RU στο UE όπου το υψηλότερο κέρδος καναλιού επαληθεύεται για το RU. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να αναθέτει το καλύτερο κανάλι RU με τα αντίστοιχα UEs μέχρι να ανατεθούν όλα τα RU. Ο MR scheduler [37] παρουσιάζεται παρακάτω:

```

while  $N \neq 0$  and  $f \neq 0$  do
   $(f^*, n^*) \leftarrow \max_{f,n} \{ \gamma_{j,n} \mid j \in f \text{ and } n \in N \}$ 
   $N \leftarrow N - n^*$ 
   $\gamma_{j^*} \leftarrow \gamma_{j^*} + F(\gamma_{j^*}, n)$ 
end while

```

### 4.3 Round Robin Algorithm

Ο πιο βασικός πόρος για ένα multicarrier OFDMA σύστημα είναι το εύρος ζώνης. Το εύρος ζώνης διαιρείται σε υποφορείς, η χρήση των διαφορετικών τμημάτων του συστήματος bandwidths από τα διαφορετικά UEs γίνεται απλή. Επειδή η κατανομή συχνοτήτων είναι συνδεδεμένη με τις channel-aware λειτουργίες χρονοπρογραμματισμού πακέτων, οι δύο λειτουργίες θα εννοποιηθούν και θα αναφέρονται ως ένας scheduler. Η ελάχιστη διανεμημένη συχνότητα πόρου μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή μια ομάδα subcarriers και θα αναφέρεται ως μονάδα πόρου (RU).

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού Round Robin ή αλλιώς RR είναι ένας από τους παλαιότερους, πιο δίκαιος και πιο διαδεδομένος αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού. Η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού είναι σχετικά απλή και εύκολη.

Επομένως, η ιδέα του Round Robin Scheduler είναι να είναι δίκαιος, αναθέτοντας τον ίδιο αριθμό των RUs (Resource Unit) σε όλους τους ενεργούς UEs. Ο scheduler λειτουργεί με τη δημιουργία μιας τυχαίας διατεταγμένης λίστας με όλους τους ενεργούς UES και αναθέτοντας τυχαία RUs σε κάθε UE ακολουθώντας με σειρά τη λίστα. Η διαδικασία ξεκινά και πάλι από την αρχή της λίστας όταν όλα τα UES λάβουν RUs. Αλλά η προηγούμενη σειρά της λίστας παραμένει σταθερή [36].

Σημειώστε ότι ένας ίσος αριθμός επιχειρήσεων RUs δεν οδηγεί σε ίσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Οι RUs των UES θα είναι σε διαφορετικές καταστάσεις καναλιού με αποτέλεσμα σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ο Round Robin Scheduler [37] παρουσιάζεται παρακάτω:

```

 $j^* \leftarrow$  first element in  $f$  .
for all  $n \in N$  do
   $\gamma_{j^*} \leftarrow \gamma_{j^*} + F(\gamma_{j^*}, n)$ 
  if  $f = 0$  then
    end algorithm
  else
     $j^* \leftarrow$  next element in  $f$ 
  end if
end for

```

Παρ' όλο που ο αλγόριθμος αυτός προσφέρει δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών στην εκχώρηση των ράδιο πόρων, δεν είναι πρακτικός για χρήση στο LTE (Long Term Evolution) καθώς ένας χρήστης εξυπηρετείται σε ένα χρονικό διάστημα, συνεπώς, υποβαθμίζεται σημαντικά όλη η απόδοση του συστήματος [38].

#### 4.4 Proportional Fair Algorithm

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού Proportional Fair είναι μια βάση συμβιβασμού, δηλαδή βασισμένο στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ των δύο αντικρουόμενων συμφερόντων. Από τη μια η προσπάθεια να μεγιστοποιήσει τη συνολική απόδοση του ασύρματου δικτύου, και ταυτόχρονα να επιτρέπει σε όλους τους χρήστες ένα ελάχιστο επίπεδο εξυπηρέτησης. Αυτό γίνεται με την ανάθεση κάθε ροής δεδομένων με ρυθμό ή σε scheduling προτεραιότητα που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αναμενόμενη κατανάλωση των πόρων του.

Στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού Proportional Fair για OFDMA, αρχικά υπολογίζεται η προτεραιότητα του χρήστη σε κάθε μπλοκ πόρων (resource block - RB) όπου αποδίδεται το RB με τη μέγιστη προτεραιότητα του και ο αλγόριθμος συνεχίζει να αναθέτει το RB στον χρήστη με την επόμενη μέγιστη προτεραιότητα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ταξινομηθούν όλα τα RBs ή όλοι οι χρήστες να έχουν εξυπηρετηθεί με RBs.

Η προτεραιότητα του  $k$ -οστού χρήστη για το  $j$ -οστό resource block σε χρόνο “ $n$ ” υπολογίζεται [38] ως εξής:

$$P_{k,j}(n) = RDR_{k,j}(n) / R_k(n) \quad (4.15)$$

- $RDR_{k,j}(n)$  : ο αιτούμενος ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για τον  $k$ -οστό χρήστη κατά τη διάρκεια του  $j$ -οστού RB στο χρόνο  $n$ .
- $R_k(n)$  : το low-pass φίλτρο κατά μέσο όρο ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του  $k$ -οστού χρήστη.

Ο RDR υπολογίζεται χρησιμοποιώντας AMC (Adaptive Modulation and Coding), επιλογή η οποία βασίζεται στην τρέχουσα κατάσταση μετάδοσης καναλιού. RDR για αναμετάδοση είναι διαχωρισμένος από τον RDR των νέων αιτήσεων πόρων, καθώς η αναμετάδοση πρέπει να αντιμετωπίζεται με εγγύηση, για την επιτυχή υποδοχή στο δέκτη, υπολογίζεται ως εξής:

$$RDR_{k,j} = R_{MCS}(SNR_{AC}) \quad (4.16)$$

- $R_{MCS}$  : η συνάρτηση εκτίμησης ποσοστού.
- $SNR_{AC}$  : το συσσωρευμένο σήμα προς θόρυβο πάνω από το κανάλι μετάδοσης.
- Το  $R_k(n)$  ενημερώνεται σε κάθε διάστημα του χρονοπρογραμματισμού ως εξής:

$$R_k(n+1) = (1-a)R_k(n) + a.RDR_k(n) \quad (4.17)$$

- $a$  : ο μέσος λόγος μεγέθους παραθύρου
- $RDR_k(n)$  : το συνολικό ποσοστό των δεδομένων του  $k$ -οστού χρήστη σε χρόνο  $n$ .

Ο αλγόριθμος αυτός δεν κάνει διάκριση μεταξύ των χρηστών με βάση την τοποθέτησή τους στο κελί, ενώ κατανέμονται οι πόροι. Αυτό μπορεί να είναι μεγάλη υποβάθμιση των επιδόσεων, αν έχουμε την πρόθεση να αναπτύξουμε τις ημι-στατικές παρεμβολές του Intercell τεχνική συντονισμού, καθώς διακρίνει τον χρήστη που βρίσκεται στο κέντρο του κελιού από τον χρήστη που βρίσκεται στα όρια του κελιού που είναι βασική προϋπόθεση του.

Επομένως, ο αλγόριθμος αυτός δεν μπορεί να είναι κατάλληλος για 3GPP LTE.

#### 4.5 HASA Algorithm

Για να εξασφαλιστεί μια αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων μέσω του επιρρεπή σε λάθη (error-prone) downlink του LTE, χρησιμοποιείται το packet scheduling με προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC)

καθώς και το υβριδικό αυτόματο αίτημα επανάληψης (Hybrid Automatic Repeat Request-HARQ) της διαδικασίας. Οι περισσότεροι από τους αλγόριθμους packet scheduling είτε αποτυγχάνουν να ενσωματώσουν το HARQ, ή ακόμα και αν το κάνουν, δεν είναι αυτοί οι αλγόριθμοι κατάλληλοι για υπηρεσίες sensitive Guaranteed Bit Rate (GBR). Έχει προταθεί ένας νέος αλγόριθμος packet scheduling χρονοπρογραμματισμού πακέτων που δίνει προτεραιότητα σε HARQ χρήστες για να στηρίξει μια ευαίσθητη καθυστέρηση GBR υπηρεσία. Ο αλγόριθμος αυτός υπερτερεί παρέχοντας μεγαλύτερη σταθμισμένη καθυστέρηση (M-LWDF) με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των χαμένων πακέτων, διατηρώντας χαμηλή καθυστέρηση αναμονής και μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής απόδοσης των χρηστών.

Το packet scheduling είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά για την παροχή υψηλού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων στο downlink στα LTE συστήματα. Το AMC σύστημα εκμεταλλεύεται την ποικιλομορφία του multi-user με τη συνεχή προσαρμογή διαμόρφωσης και κωδικοποίησης του συστήματος (MCS) με βάση την ποιότητα του καναλιού που συνεχώς ενημερώνεται από κάποιον χρήστη του downlink. Ενώ ένας αριθμός "channel-aware" αλγορίθμων packet scheduling δεν λαμβάνουν υπόψη τα σφάλματα της ασύρματης ζεύξης μεταφοράς και τον αντίκτυπό τους στην υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος [39]. Ενώ, άλλοι αλγόριθμοι packet scheduling που ενσωματώνουν το HARQ επικεντρώνονται κυρίως στις μη εγγυημένες υπηρεσίες του ρυθμού μετάδοσης που δεν είναι ευαίσθητοι στην καθυστέρηση.

Η HARQ διαδικασία είναι ένας συνδυασμός της διόρθωσης σφαλμάτων και της αυτόματης αίτησης επανάληψης [40]. Αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για να ανακτήσει τα σφάλματα από την ασύρματη μετάδοση με το συνδυασμό πολλαπλών αναμεταδόσεων, βελτιώνοντας έτσι την αποκωδικοποίηση της αποδοτικότητας στο soft buffer του χρήστη [41]. Ένα πακέτο δεδομένων του χρήστη μεταδίδεται στο downlink σε ένα μπλοκ μεταφοράς (TB), το οποίο περιέχει μια ομάδα πακέτων και κεφαλίδες από κάθε στρώμα πρωτοκόλλου. Το μέγεθος του TB εξαρτάται από την υποστηριζόμενη MCS στο RBs που διατίθενται για τον χρήστη και το μέγεθος των δεδομένων που πρέπει να παρέχονται στο χρήστη. Κατά την λήψη, ο χρήστης αποκωδικοποιεί το TB, δημιουργεί και στέλνει μια HARQ ανατροφοδότηση για το packet scheduler. Εάν το TB είναι σωστά αποκωδικοποιημένο, ένα ACK αποστέλλεται από το packet scheduler ενώ ένα NACK δείχνει ότι το TB είναι κατεστραμμένο και απαιτεί την αναμετάδοση. Ο packet scheduler αναμεταδίδει το κατεστραμμένο TB μέχρι να αποκωδικοποιηθεί σωστά από τον χρήστη ή μέχρι να επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός των αναμεταδόσεων.

Μια μέθοδος αναμετάδοσης για ένα ακριβές αντίγραφο ενός κατεστραμμένου TB είναι γνωστή ως chase combining (CC), ενώ ο αυξητικός πλεονασμός (IR), ο οποίος είναι μια μέθοδος που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα του downlink LTE, στέλνει επιπλέον περιπτώσεις πληροφορίες σε κάθε αναμετάδοση. Είναι αποτελεσματική για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε ένα κατεστραμμένο TB μεταδίδοντας με χρήση χαμηλότερης κωδικοποίησης ως εκ τούτου καταναλώνει λιγότερους ράδιο πόρους από την αρχική μετάδοση [42].

Ένας νέος HARQ aware αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού (Hasa) που εκτείνει τον αλγόριθμο M-LWDF [43] και δίνει προτεραιότητα αναμετάδοσης προτείνεται να υποστηρίξει εγγυημένο ρυθμό bit (GBR) υπηρεσίες για το downlink σε ένα LTE σύστημα. Μια υπηρεσία GBR είναι ευαίσθητη στην καθυστέρηση και τα πακέτα της απορρίπτονται (και θεωρούνται χαμένα πακέτα) εάν διαμένουν εντός της eNodeB buffer για περισσότερο από τη λήξη της προθεσμίας της buffer καθυστέρησης. Η προθεσμία καθυστέρησης ζώνη παρεμβολής ορίζεται ως ο μέγιστος χρόνος αναμονής ενός πακέτου που βρίσκεται στην εξυπηρέτηση eNodeB buffer. Ο Hasa είναι σε θέση να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) των GBR υπηρεσιών με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των χαμένων πακέτων, διατηρώντας μια χαμηλή καθυστέρηση αναμονής, ενώ ταυτόχρονα τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής απόδοσης των χρηστών.

Ο M-LWDF είναι ένας από τους γνωστούς packet scheduling αλγόριθμους για την υποστήριξη πραγματικού χρόνου υπηρεσιών σε legacy συστήματα. Ο αλγόριθμος αυτός επιλέγει έναν χρήστη σε κάθε χρονικό διάστημα :

$$k = \arg \max \left\{ a_i * W_i(t) * \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \right. \quad (4.18)$$

$$a_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (4.19)$$

$$R_i(t) = \left( 1 - \frac{1}{t_c} \right) R_i(t-1) + \frac{1}{t_c} * r_i(t-1) \quad (4.20)$$

Όπου  $r_i(t)$ ,  $R_i(t)$ ,  $W_i(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των bits supportable για κατερχόμενη ζεύξη μετάδοσης (με βάση το MCS), ο μέσος όρος απόδοσης και head-of-line (HOL) καθυστέρηση πακέτου του  $i$  χρήστη τη χρονική στιγμή  $t$ , αντίστοιχα, το  $\tau_i$  είναι η προθεσμία καθυστέρηση του buffer του  $i$  χρήστη, το  $\delta_i$  είναι η μέγιστη πιθανότητα  $W_i(t)$  να υπερβαίνει το  $\tau_i$  και  $t_c$  είναι σταθερά χρόνου.

Αυτός ο αλγόριθμος προτείνεται σε ένα περιβάλλον στο οποίο όλα τα μεταδιδόμενα TBS υποτίθεται ότι λαμβάνονται σωστά. Ωστόσο, αυτό δεν είναι μια συνηθισμένη περίπτωση για τα ασύρματα κανάλια που είναι επιρρεπείς σε σφάλματα μετάδοσης. Για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης, ο Hasa επεκτείνει τον M-LWDF αλγόριθμο επιλέγοντας έναν χρήστη σε κάθε RB με βάση τα ακόλουθα:

$$k = \arg \max \left\{ \begin{array}{ll} a_i * W_i(t) * \frac{r_{i,j}(t)}{R_i(t)} & i = non-HARQ \text{ χρήστη και } Q_i(t) > r_{i,j}(t) \\ a_i * W_i(t) * \frac{Q_i(t)}{R_i(t)} & i = non-HARQ \text{ χρήστη και } Q_i(t) < r_{i,j}(t) \\ a_i * e^{\left( \frac{\tau_i * a}{\tau_i - W_i(t)} \right)} * \frac{r_{i,j}(t)}{R_i(t)} & i = HARQ \text{ χρήστη} \end{array} \right. \quad (4.21)$$

όπου  $Q_i(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των bits στο buffer του χρήστη  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $r_{i,j}(t)$  είναι ο συνολικός αριθμός των bits που υποστηρίζονται για τη μετάδοση του downlink του χρήστη  $i$  στο RB  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$  και  $a$  είναι μια σταθερά. Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν παρόμοιο ορισμό όπως στο M-LWDF αλγόριθμο.

Στο [44] ο αλγόριθμος Hasa χρησιμοποιεί διαφορετικές εξισώσεις για HARQ και μη HARQ χρήστες. Ένας χρήστης HARQ ορίζεται στο παρόν έγγραφο ως μια οντότητα που έχει πακέτα στον buffer eNodeB που περιμένουν για αναμετάδοση, ενώ μια μη HARQ χρήστη ορίζεται ως μια οντότητα που έχει πακέτα στον buffer eNodeB που περιμένουν για την αρχική μετάδοση. Λόγω της αποδοτικότητας αποκωδικοποίηση στο μαλακό buffer των χρηστών και να κερδίσουν απόδοσης που προέρχονται από τη χρήση της μεθόδου IR, Hasa δίνει προτεραιότητα πάντα HARQ χρήστες όπως ότι πληρούνται οι απαιτήσεις QoS των υπηρεσιών GBR. Αυτό επιτυγχάνεται με το χειρισμό της τιμής του  $a$  έτσι ώστε η υψηλή τιμή του  $a$  οδηγεί σε αύξηση κατά προτεραιότητα για την HARQ χρήστες ενώ μια χαμηλή τιμή οδηγεί στο αντίθετο.

Προγραμματισμός προτεραιότητας μεταξύ των χρηστών HARQ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επείγουσα ανάγκη της HOL πακέτα του κάθε χρήστη HARQ. Ένα HARQ χρήστη με τα πακέτα με τις καθυστερήσεις που πρόκειται να λήξουν δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με άλλους χρήστες HARQ τέτοια ώστε ο αριθμός των χαμένων πακέτων που οφείλεται σε καθυστέρηση παραβιάσεις ελαχιστοποιούνται. Επιπλέον, η μέθοδος IR επιτρέπει την αναμετάδοση να χρησιμοποιούν όσο το δυνατόν λιγότερα RB δυνατόν επιτρέποντας έτσι στο υπόλοιπο RBs να διατεθούν σε άλλους μη HARQ χρήστες.

Εάν οι χρήστες HARQ δεν είναι διαθέσιμοι εντός του συστήματος, κάθε RB κατανέμεται στον χρήστη με την υψηλότερη προτεραιότητα που βασίζεται σε ένα τροποποιημένο M-LWDF αλγόριθμο. Εάν η μέση απόδοση και πακέτων πληροφοριών καθυστέρησης του κάθε χρήστη υποτίθεται παρόμοια, το πακέτο χρονοπρογραμματιστής επιλέγει σε κάθε RB ο χρήστης να έχει μέγιστο αριθμό των bits που μπορεί να λάβει, ανάλογα με  $r_i, j(t)$  ή  $Q_i(t)$ , έτσι ώστε ο RB να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά.

#### 4.6 Softer Frequency Reuse Scheduling Algorithm

Προκειμένου να μειωθεί η συχνότητα επιλεκτικού χρονοπρογραμματισμού αύξησης απώλειας και αύξησης του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων στα όρια του κελιού, προτείνεται το σχήμα του Softer Frequency Reuse [45]. Σε αυτό το σύστημα ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης συχνότητων τόσο στο κέντρο του κελιού όσο και στα όρια του κελιού είναι 1. Η ζώνη υψηλής συχνότητας ισχύος είναι διαφορετική μεταξύ των γειτονικών κελιών.

Ο σχεδιασμός του frequency scheduler λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι χρήστες στα όρια του κελιού να έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνότητων με μεγαλύτερη δύναμη και οι χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο του κελιού να έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα χρήσης της ζώνης συχνότητων με χαμηλότερη ισχύ.

Γίνεται μια μικρή τροποποίηση στο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού Proportional Fair στην εξίσωση (4.15) ως εξής:

$$P_{k,j}(n) = RDR_{k,j}(n) / R_k(n) * F_{k,j} \quad (4.22)$$

Όπου,

$F_{k,j}$ : είναι ο παράγοντας προτεραιότητας και μπορεί να είναι ένα από τα ακόλουθα και μπορεί να έχει τιμές μεταξύ των 0 και 1.

$F_{1,1}$ : ο χρήστης κ στο κέντρο του κελιού, το j resource block είναι χαμηλή η ισχύς.

$F_{1,2}$ : ο χρήστης κ στο κέντρο του κελιού, το j resource block είναι υψηλή η ισχύς.

$F_{2,1}$ : ο χρήστης κ στα όρια του κελιού, το j resource block είναι χαμηλή η ισχύς.

$F_{2,2}$ : ο χρήστης κ στα όρια του κελιού, το j resource block είναι υψηλή η ισχύς.

Με την εκχώρηση των τιμών στο  $F_{k,j}$  γίνεται έλεγχος των πόρων για τους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο του κελιού και στα όρια του κελιού.

Επομένως ο αλγόριθμος αυτός αξιοποιεί όλες τις εργασίες που εκτελούνται στον Proportional Fair, επιπλέον, εκτελεί τους υπολογισμούς πιθανοτήτων στους ράδιο πόρους για τον προσδιορισμό, όπου οι πόροι μπορούν να ανατεθούν στους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο του κελιού και οι πόροι που μπορούν να ανατεθούν στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια του κελιού. Με άλλα λόγια, αυτό ο αλγόριθμος είναι ο ίδιος με τον Proportional Fair αλγόριθμο, αλλά μετράει επιπλέον την τοποθέτηση του χρήστη στο κελί στον οποίο οι πόροι έχουν ανατεθεί.

Το σύστημα αυτό φαίνεται να είναι καλό, δηλαδή κρίνει τις απαιτήσεις του χρήστη σχετικά με τους ράδιο πόρους, την κατάσταση του καναλιού και την θέση του χρήστη στο συγκεκριμένο σημείο στο κελί. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ιδανικά με ημι-στατική τεχνική για συντονισμό διακαναλικής παρεμβολής για να επιτύχει την καλύτερη συνολική απόδοση του συστήματος.

#### 4.7 RSSA

Ο αλγόριθμος Relative Strength Scheduling (RSSA) που προτείνεται στο [46], δίνει αυξημένη προτεραιότητα χρονοπρογραμματισμού στους αδύναμους χρήστες στα ισχυρά physical resources blocks τους (PRBs), με αποτέλεσμα μια πιο ισότιμη κατανομημένη διαδικασία κατανομής των πόρων σε ένα σύμβολο OFDM. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει βραχυπρόθεσμα δίκαιη κατανομή των πόρων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ρυθμό απόδοση όπου συνδέεται με την εκχώρηση των πόρων αυτών. Ο αλγόριθμος RSSA είναι περισσότερο κατάλληλος για την πραγματική κίνηση του χρόνου, για την οποία υπάρχουν απαιτήσεις στους περιορισμούς καθυστέρησης και χαμηλής απόδοσης. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι η συμβατική έννοια της μέτρησης της δικαιοσύνης από την άποψη της απόδοσης θα αποτύχει να απεικονίσει με ακρίβεια τον στόχο της βελτιστοποίησης της RSSA. Η σχετική δύναμη μέτρησης συγκρίνει τη στιγμιαία δύναμη PRB του κάθε χρήστη με τον μέσο όρο δύναμης συμβόλου OFDM. Οι PRBs του  $k$ -οστού χρήστη διαπιστώθηκε ότι πάνω από το μέσο όρο συμβόλου δύναμης που βιώνουν αυτόν τον χρήστη δίνεται αυξημένη προτεραιότητα και PRBs ασθενέστερη από τον μέσο όρο που μειώνεται κατά προτεραιότητα. Ο αλγόριθμος RSSA επιλέγει έναν χρήστη ανάλογα με:

$$k^* = \arg \max_{1 \leq k \leq K} \left( \frac{\alpha_{k,c}(t)}{\bar{\alpha}_k(t)} \right)^\gamma \alpha_{k,c}(t) \quad (4.23)$$

Όπου,

$\alpha_{k,c}(t)$ : η δύναμη PRB.

$\bar{\alpha}_k(t)$ : ο μέσος όρο δύναμης συμβόλου.

Η  $\gamma$  παράμετρος τονίζει την εξάρτηση των μετρήσεων ως προς την παράμετρο της σχετικής δύναμης. Για  $\gamma=0$ , ο αλγόριθμος μειώνει τον χρονοπρογραμματισμό Greedy Algorithm.

Ο Greedy Algorithm μεγιστοποιεί την ρυθμό απόδοση ολόκληρου του συστήματος και αναθέτει ένα PRB  $c$  στον ισχυρότερο χρήστη και βασίζεται στο τύπο:

$$k^* = \arg \max_k \alpha_{k,c}(t)$$

Για  $\gamma=50$ , παρέχει έναν καλό συμβιβασμός μεταξύ της ρυθμοαπόδοσης και της δικαιοσύνης για ένα σενάριο όπου η εμπειρία των χρηστών διαφέρει στα διαφορετικά επίπεδα του SNR.

Αλγόριθμοι	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Max C/I	Μεγιστοποίηση χωρητικότητας καναλιού.	Όχι εγγυημένο QoS στον χρήστη.
Round Robin	Είναι δίκαιος και αναθέτει τον ίδιο των αριθμό RUs σε όλους τους ενεργούς UEs.	Δεν έχει καλή απόδοση για χρήση στο LTE.
Proportional Fair	Μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του ασύρματου δικτύου και ταυτόχρονα	Δεν κάνει διάκριση μεταξύ των χρηστών με βάση την



	επιτρέπει σε όλους τους χρήστες ένα ελάχιστο επίπεδο εξυπηρέτησης.	τοποθέτησή τους στο κελί.
HASA	Ελαχιστοποιεί τον αριθμό των χαμένων πακέτων.	Πολύ μεγάλη καθυστέρηση πακέτων.
Softer Frequency Reuse	Κάνει διάκριση μεταξύ των χρηστών με βάση την τοποθέτησή τους στο κελί.	Χρησιμοποιείται μόνο με ημι-στατική τεχνική για συντονισμό διακαναλικής παρεμβολής.
RSSA	Παρέχει μια πιο ισότιμη κατανεμημένη διαδικασία κατανομής των πόρων σε ένα σύμβολο OFDM.	Δεν λαμβάνει υπόψη την ρυθμό απόδοσης.

## Κεφάλαιο 5 – Ενέργεια

### 5.1 Energy Efficiency

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει πλέον απαραίτητες παρέχοντας στους χρήστες τους την δυνατότητα πρόσβασης σε υπηρεσίες και δεδομένα ανεξάρτητα του χρόνου και του χώρου που βρίσκονται. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στην ανάπτυξη συσκευών μικρές σε μέγεθος και εξαιρετικά εξελιγμένες. Επομένως, η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων όπως το IEEE 802.16m [47] και το Third Generation Partnership Program (3GPP) Long Term Evolution (LTE) [48] θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν ένα αποτελεσματικό μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας για να πετύχουν την μεγαλύτερη διάρκεια της ζωής στις μπαταρίες ενώ ταυτόχρονα να παρέχουν βελτιωμένη εμπειρία χρήστη και ποιότητα υπηρεσίας (QoS) [49], [50], [51], [52], [53].

Η λειτουργία του packet scheduling σε HSDPA και LTE δίκτυα θεωρείται ευρέως ως ένα από τα βασικότερα στοιχεία που πρέπει να εξετάζονται για την διασφάλιση της ποιότητας της προσφερόμενης υπηρεσίας (QoS), ενώ παράλληλα μεγιστοποιούν την παρεχόμενη χωρητικότητα του συστήματος. Πέραν από τις δύο αυτές βασικές λειτουργίες στις οποίες συμβάλουν οι packet scheduling αλγόριθμοι, θα πρέπει να εξετασθεί η ενεργειακή απόδοση του συστήματος και η εξοικονόμηση ενέργειας με την πραγματοποίηση ενός σχεδιασμού κατάλληλων αλγορίθμων.

Οι αλγόριθμοι Proportional Fair, Round Robin, Maximum CIR (Max C/I) είναι μια πρώτη προσπάθεια για την μελέτη της ενεργειακής τους απόδοσης σε ένα LTE σύστημα [54].

Στο [54], γίνεται η ανάλυση της απόδοσης των packet schedulers μέσω της ρυθμοαπόδοσης κελιού θεωρώντας την κυκλοφορία fullbuffer. Αρχικά αξιολογείτε η απόδοση του χρονοπρογραμματισμού βασισμένη στην αναλογία μεταξύ της ακτινοβολούμενης ισχύος και την εξυπηρέτηση της ρυθμοαπόδοσης του κελιού. Έτσι ορίζεται ο δείκτης κατανάλωσης RF:

$$n_{RF}^{(i)} = \frac{P_{RF}^{(i)}}{T^{(i)}} = \frac{\text{μέσος όρος RF ισχύος}}{\text{μέσος όρος DL ρυθμοαπόδοσης κελιού}} \quad (5.1)$$

στο i-οστό snapshot.

Επομένως για N snapshot έχουμε :

$$n_{RF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_{RF}^{(i)} \quad (5.2)$$

Επομένως, ένα μοντέλο ισχύος, για την ανάλυση των επιδόσεων όσον αφορά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας [52] είναι:

$$n_{IN}^{(i)} = \frac{P_{IN}^{(i)}}{T^{(i)}} = \frac{\text{μέση κατανάλωση ισχύος από το eNB}}{\text{μέσος όρος DL ρυθμοαπόδοσης κελιού}} \quad (5.3)$$

στο i-οστό snapshot.

Ο δείκτης  $n_{RF}$  θεωρείται ως ένας ενδιάμεσος όρος της  $n_{IN}$  και δείχνει πόσο αποτελεσματικό είναι το packet scheduler από το σημείο της εκπεμπόμενης ισχύος. Ο δείκτης  $n_{IN}$  δείχνει την επίδραση του υλικού και των αλγορίθμων στα αποτελέσματα του system level.

Οι δύο αυτοί δείκτες συνδέονται αυστηρά και η σχέση τους εξαρτάται από το μοντέλο ισχύος. Στην περίπτωση που η κίνηση είναι fullbuffer, τότε η σχέση των δύο δεικτών θα γίνει ως εξής:

$$n_{RF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{RF}}{T^{(i)}} \quad (5.4)$$

όπου η εκπεμπόμενη ισχύς  $P_{RF}$  είναι σταθερή για όλα τα διαφορετικά  $N$  στιγμιότυπα και η κατανάλωση ενέργειας είναι σταθερή, παίρνοντας το γραμμικό μοντέλο:

$$P_{IN} = aP_{RF} + b \quad (5.5)$$

Τότε:

$$\begin{aligned} n_{IN} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{IN}}{T^{(i)}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{aP_{RF} + b}{T^{(i)}} = \\ &= \frac{aP_{RF} + b}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{T^{(i)}} = \frac{aP_{RF} + b}{P_{RF}} n_{RF} = kn_{RF} \Rightarrow \\ &\Rightarrow n_{IN} = kn_{RF} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Που σημαίνει ότι μεταξύ των δεικτών υπάρχει μια αναλογικότητα, δηλαδή το σχετικό κέρδος του  $P_{RF}$  είναι σχετικό με το κέρδος του  $P_{IN}$ :

$$\frac{\Delta n_{IN}}{n_{IN}} = \frac{k \Delta n_{IRF}}{kn_{IRF}} = \frac{\Delta n_{IRF}}{n_{IRF}} \quad (5.7)$$

Άρα, σε ένα σύστημα σε κατάσταση πλήρους απασχόλησης η εξοικονόμηση ενέργειας του συστήματος περιορίζεται από τη φασματική απόδοση του packet scheduler και τα σχετικά κέρδη δεν εξαρτώνται από το συγκεκριμένο γραμμικό μοντέλο ισχύος.

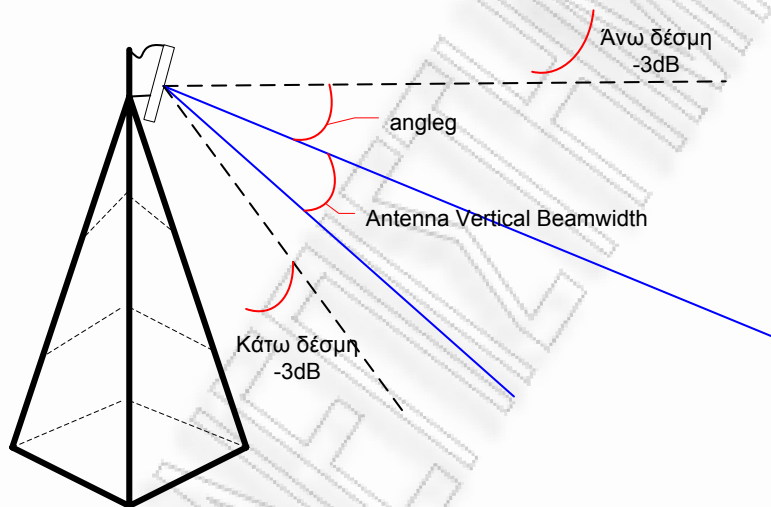
## 5.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας στον Σταθμό Βάσης (BS)

Σε περιοχές που καλύπτονται από κάποιο hotspot όπως σε ένα εμπορικό ή επιχειρηματικό κέντρο, όπου έχουμε μεγάλη κίνηση πληροφορίας λόγω του μεγάλου αριθμού χρηστών, απαιτεί διαθέσιμη μεγάλη χωρητικότητα από τα συστήματα δικτύων επικοινωνιών. Γενικά, η πιο κοινή μέθοδος να μειωθεί η συμφόρηση είναι να αυξηθούν οι σταθμοί βάσεις και να αυξηθεί το ποσοστό κάλυψης με σκοπό να βελτιωθεί η χωρητικότητα του συστήματος [55]. Παρ' όλα αυτά σε αυτές τις περιοχές η κίνηση δεν είναι πάντα αυξημένη και επίσης δεν υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή εξαιτίας της κίνησης, σε όλες τις ώρες της ημέρας και από αυτό συνεπάγεται ότι έχουμε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.

Η αδρανοποίηση και η επαναφορά των eNBs σε δίκτυα 3GPP LTE – Advanced εφαρμόζονται, με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης η αυτοβελτιστοποίηση της διαμόρφωσης της κεραίας χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τους τομείς κάλυψης και σε συνδυασμό με ένα μηχανισμό ενεργοποίησης-βελτιστοποίησης σε μια ειδική UE κατάσταση έχουν προταθεί για την εφαρμογή της αδρανοποίησης και της διαδικασίας αφύπνισης [56].

Ένας συνηθισμένος τρόπος να ελεγχθεί η περιοχή κάλυψης στον κάθε τομέα είναι να ρυθμιστεί το downtilt και το azimuth της κεραίας καθώς και η ισχύς μετάδοση του Common Pilot Channel (CPICH) [57]. Οι παράμετροι αυτοί παίζουν σπουδαίο ρόλο στην διαδικασία βελτιστοποίησης του δικτύου. Η διαδικασία διαμόρφωσης της κεραίας μπορεί να διαχειριστεί αυτόματα με χρήση του μηχανισμού αυτό-βελτιστοποίησης στα LTE συστήματα.

Η γωνία κλίσης της κεραίας (antenna downtilt) ορίζεται από τον γεωμετρικό παράγοντα (angleg) και από τον παράγοντα κάθετου εύρους δέσμης της κεραίας (antenna vertical beamwidth):



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση γωνιών της κεραίας βάσης.

Ο τύπος της γωνίας του antenna downtilt υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους και τα σχετικά ύψη της κεραίας βάσης και της κινητής κεραίας απεικονίζονται στην εικόνα 5.2:

$$\text{angleg} = \tan^{-1}\left(\frac{h_1 - h_2}{d}\right) \quad (5.8)$$

όπου,

$h_1$  : το ύψος της κεραίας βάσης (ft)

$h_2$  : το ύψος της κινητής κεραίας (ft)

d: η απόσταση (ft)

$$\text{antenna downtilt angle} = \text{angleg} + \frac{\text{angleg}_{-3dB}}{2} \quad (5.9)$$

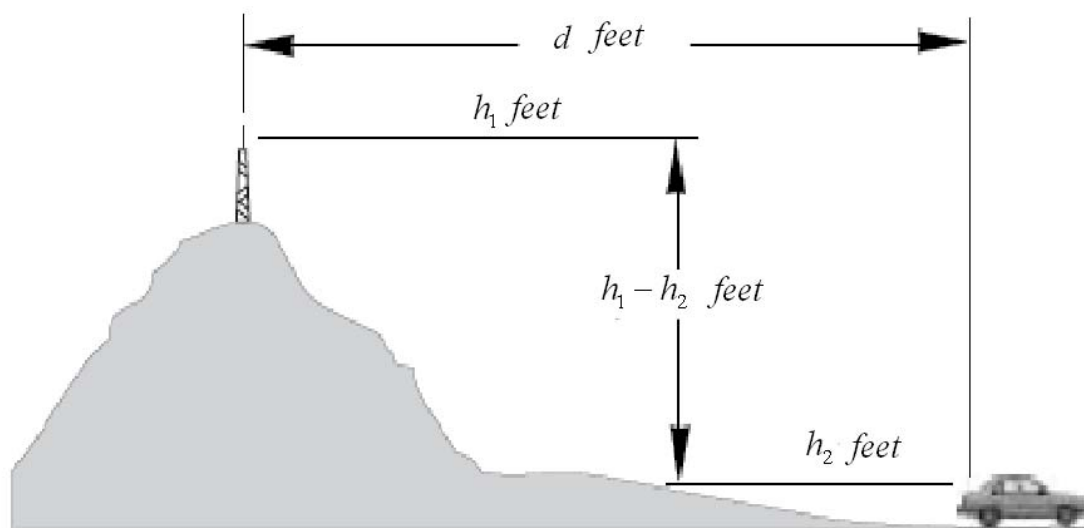
όπου,

$\text{angleg}_{-3dB}$  : η τιμή της μισής ενέργειας της κεραίας (antenna vertical beamwidth)

Η απόσταση πεδίου τομέα D είναι:

$$D = \frac{H}{\tan\left(\text{angleg} + \frac{\text{angleg}_{-3dB}}{2}\right)}$$

(5.10)



Εικόνα 5.2 Απεικόνιση του ύψους της κεραίας βάσης και το ύψος της κινητής κεραίας.

Η γωνία της κεραίας (antenna downtilt) είναι μια βασική παράμετρος διαμόρφωσης της κεραίας για την βελτιστοποίηση της τοπολογίας του δικτύου [56], [58]. Οι γωνίες της κεραίας ποικίλουν ανάλογα με τα διαφορετικά σενάρια. Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω σχήμα η γωνία της κεραίας επηρεάζεται από την απόσταση. Σε κανονικές αστικές περιοχές, η μεγάλη απόσταση μεταξύ δύο σημείων (ISD) οδηγεί σε μια μικρότερη γωνία της κεραίας, το οποίο μπορεί να βελτιώσει ικανοποιητικά την απόδοση του συστήματος και να μειώσει την παρεμβολή.

Συνήθως η κεραία τοποθετείται σε υψηλή τοποθεσία όπως φαίνεται για παράδειγμα στο παραπάνω σχήμα. Μόλις γίνει έστω και μια μικρή αλλαγή της γωνίας της κεραίας τότε μπορεί να επηρεάσει την κάλυψη της.

Η γωνία της κεραία χωρίζεται σε δύο έννοιες, την μηχανική γωνία (MDT) και την ηλεκτρική γωνία (EDT).

Το MDT ρυθμίζεται με την αλλαγή της φυσικής γωνίας του βραχίονα που η κεραία έχει τοποθετηθεί και κατευθύνει τα φυσικά στοιχεία της κεραίας προς το έδαφος, δεδομένου ότι ο βραχίονας είναι σταθερός, αυτό απαιτεί επίσκεψη στον χώρο εγκατάστασης της κεραίας, το οποίο το καθιστά πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία.

Το EDT περιλαμβάνει διάφορα είδη συστημάτων όπως η προκαθορισμένη ηλεκτρική κλίση, η μεταβλητή κλίση (VET), η απομακρυσμένη ηλεκτρική κλίση (RET) και η συνεχή ηλεκτρική ρυθμιζόμενη γωνία κλίσης (CAEDT).

Σε RET κεραίες δεν χρειάζεται επίσκεψη στην τοποθεσία εγκατάστασης της, αλλά η γωνία κλίσης προσαρμόζεται από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου. Το CAEDT είναι ενίσχυση του RET συστήματος όπου η γωνία μπορεί να αλλάζει από μακριά και συνεχώς [59].

Η μετάδοση ισχύος σε CPICH είναι μια βασική παράμετρος που επηρεάζει την κάλυψη [57]. Για την κάλυψη του δικτύου μπορεί να διευρυνθεί το πεδίο τομών απόστασης από κύρια eNBs, τα οποία είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία με περιοχές κατά τη διάρκεια της περιόδου αδράνειας, με στόχο την κάλυψη των αδρανοποιημένων eNBs. Επομένως, μια αύξηση της ισχύος του CPICH είναι αναγκαία στα κύρια eNBs.

Η μέτρηση της ποιότητας σύνδεσης είναι:

$$\frac{\text{Ενέργεια}}{\text{θόρυβος φασματικής ποικνότητας}} = \frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{CPICH}}{P_{rx} L_k} \quad (5.11)$$

όπου,

$P_{CPICH}$  : η ισχύς του CPICH του αντίστοιχου τομέα.

$P_{rx}$  : η συνολική λήψη ισχύος ευρείας ζώνης.

$L_k$  : το pathloss της κάτω ζεύξης.

Με  $\text{pathloss} = 34.53 + 38 * \log_{10}(d)$ .

d: η απόσταση μεταξύ του UE και των εξυπηρετούμενων eNBs σε μέτρα.

Άρα, σε εκτεταμένη περιοχή με την ίδια ποιότητα σύνδεσης θα αυξηθεί η  $P_{CPICH}$ , εξαιτίας του pathloss.

Σε ένα σύστημα αδρανοποίησης και αφύπνισης υπάρχουν τρεις διαδικασίες που πρέπει να ληφθούν: η διαδικασία απόφασης της αδρανοποίησης, δηλαδή η διάρκεια του χρόνου αδρανοποίησης και η πρόγνωση της κίνησης και η χωρητικότητα του συστήματος από απόσταση, δεύτερον η διαδικασία αδρανοποίησης και τέλος η διαδικασία αφύπνισης.

Η διάρκεια του χρόνου αδρανοποίησης αποφασίζει το πότε θα ξεκινήσει η διαδικασία αδρανοποίησης. Επίσης, χρειάζεται να οριστεί ένα κάτω όριο της μέγιστης χωρητικότητας του συστήματος. Επομένως, σε υψηλή τιμή του κάτω ορίου υπάρχει καλύτερη σταθερότητα του συστήματος, ενώ με χαμηλή τιμή του ορίου υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην πρόγνωση της κίνησης και της χωρητικότητας του συστήματος από απόσταση εφαρμόζεται ένα νέο μοντέλο με την εξής στατιστική μέθοδο:

Έστω  $J = \{1, \dots, 24\}$ , η ώρα της ημέρας και

$I = \{1, \dots, I\}$ , ένα σύνολο από eNBs στο δίκτυο της περιοχής στόχου.

Η κίνηση του TCH και ο αριθμός των UEs σε ένα συγκεκριμένο eNBi κατά τη διάρκεια j ώρας

μπορεί να οριστεί ως  $T_{ij}$  και  $N_{ij}$  για  $(i \in I, j \in J)$ . Η δυνατότητα του κάθε UE στο eNBi συμβάλει στην κίνηση στην j ώρα:

$$P_{ij} = \frac{T_{ij}}{N_{ij}} \text{ και } \bar{P}_{ij} = \frac{\sum T_{ij}}{\sum N_{ij}}$$

Υποδηλώνει ένα στατιστικό μοντέλο της μέσης πιθανότητας του κάθε UE που δημιουργεί κίνηση στην  $j$  ώρα.

Όμως, η κίνηση είναι διαφορετική σε κάθε διαφορετικό τετράμηνο, δηλ  $\bar{P}_{1j}(\kappa)$  για  $\kappa=\{1,2,3,4\}$ .

Η συνολική πρόβλεψη κίνησης είναι:

$$T_{total} = \sum N_{ij} * \bar{P}_{1j}(\kappa) \quad (5.12)$$

Ο μέσος όρος κίνησης είναι :

$$T_{ave} = \frac{\sum N_{ij} * \bar{P}_{1j}(\kappa)}{I} \quad (5.13)$$

Η εξοικονόμηση ενέργειας [56] είναι :

$$\frac{N_{tol} * (24 - T_d) + N_n * T_d * 0.11 + N_m * (1 + CI)}{N_{tol} * 24} \quad (5.14)$$

$N_{tol}$  : ο συνολικός αριθμός των eNBs στην περιοχή του hotspot.

$T_d$  : η χρονική διάρκεια της αδρανοποίησης.

$N_n$  : ο αριθμός των αδρανοποιημένων eNBs.

$N_m$  : ο αριθμός των κύριων eNBs.

$CI$  : η CPICH δύναμη προσαύξησης.

## Κεφάλαιο 6 – Μοντέλα LTE

Οι κινητές συσκευές για πρόσβαση στο Internet, όπως τα eReaders, τα tablet PCs, τα smartphones και τα netbooks έχουν μεγάλη ζήτηση στην αγορά και για αυτό γίνεται προσπάθεια να εξελιχθούν στο επίπεδο της ενεργειακής κατανάλωσης, ώστε οι χρήστες τους να μην χρειάζεται να φορτίζουν τις συσκευές τους ανά τακτικά χρονικά διαστήματα. Επίσης, είναι αναπόφευκτο ότι οι μελλοντικές συσκευές θα περιέχουν LTE modems εκτός από τις κοινές διεπαφές, όπως Wi-Fi, Bluetooth ή USB. Στόχος σε αυτήν την εργασία είναι η δημιουργία ενός μοντέλου με τη χρήση της LTE HARQ/ARQ διαδικασίας που μοντελοποιείται ως μια αλυσίδα του Markov για την εξοικονόμηση ενέργειας στο LTE modem.

Στο LTE, τα δεδομένα μπορούν να διαβιβασθούν μέσω πολυάριθμων Modulation Coding Schemes (MCS) [60], [61], το καθένα με διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά την μετάδοση των δεδομένων και την προστασία των σφαλμάτων. Επιπλέον, το LTE χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό του Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) σε ένα χαμηλό επίπεδο και του απλού ARQ σε υψηλό επίπεδο προκειμένου να αντιμετωπίσει τις λανθασμένες μεταδόσεις [62]. Το HARQ ενώνει τις έννοιες της προς τα εμπρός διόρθωσης των σφαλμάτων του ARQ, συνδυάζοντας ελαττωματικά πακέτα με τις αναμεταδόσεις όπου παράγουν την κωδικοποίηση και την αύξηση της επανάληψης [40], [63].

### 6.1 Μοντέλο των J. Dohi και G. Fettweis

Στο μοντέλο των J. Dohi και G. Fettweis [64] χρησιμοποιούνται οι διαδικασίες HARQ/ARQ και μοντελοποιείται ως μια αλυσίδα Markov [65], [66], [67], [68]. Παίρνουν μέχρι τέσσερις αναμεταδόσεις. Η διαδικασία αρχίζει με την μετάδοση της κίνησης "1", η οποία αποτυγχάνει με πιθανότητα  $p_1$ , που έχει ως αποτέλεσμα μια δεύτερη μετάδοση και σημειώνεται με "2". Λόγω της HARQ διαδικασίας, οι πιθανότητες αποτυχίας δεν είναι συνήθως ίσες. Μετά από έναν μέγιστο αριθμό  $N_r$  αποτυχημένων μεταδόσεων το υψηλό επίπεδο της διαδικασίας ARQ αρχίζει ξανά την μετάδοση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται εάν φτάσει μια επιτυχημένη μετάδοση, δηλαδή να βρεθεί στην κατάσταση "OK".

Η δεδομένη διαδικασία Markov της HARQ / ARQ είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο που ισχύει μόνο υπό τις ακόλουθες παραδοχές. Υποθέτουν ότι το κανάλι ανατροφοδότησης HARQ και ο εντοπισμός εσφαλμένων πακέτων δουλεύουν εσφαλμένα δωρεάν. Υποθέτουν ότι υπάρχουν επαρκή μέτρα για να εξασφαλιστεί ότι οι διαδικασίες HARQ σε πομπό και δέκτη είναι πάντα συγχρονισμένες. Με σκοπό να μοντελοποιηθεί η διαδικασία RLC ως μια μετάδοση επιστροφής στην κατάσταση "1" υποθέτοντας ότι οι παράμετροι μετάδοσης έχουν αλλάξει κατά τη διάρκεια RLC ARQ.

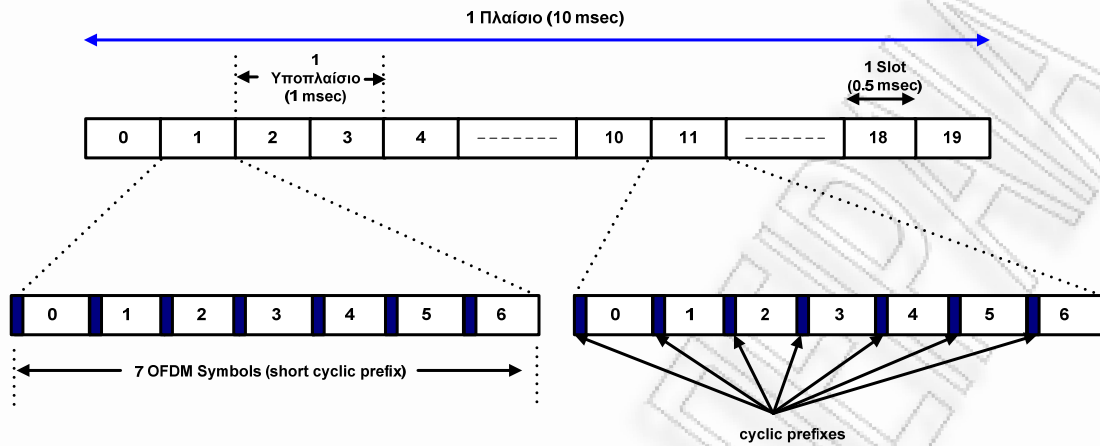
Το μοντέλο που προκύπτει είναι μια ειδική περίπτωση μιας αλυσίδας Markov που έχει ακριβώς μια κατάσταση απορρόφησης. Στο μοντέλο αυτό είναι η "Ok κατάσταση".

### 6.2 Προτεινόμενο Νέο Μοντέλο

Οι μεταδόσεις στο LTE για το downlink και το uplink οργανώνονται σε ράδιο πλαίσια με διάρκεια  $T_f = 10\text{msec}$  [69]. Το LTE χρησιμοποιεί δύο είδη διαμορφώσεων, τη διαμόρφωση συχνότητας (Frequency-division duplexing - FDD) και τη διαμόρφωση χρόνου (Time-Division Duplex - TDD) [61]. Στην παρούσα εργασία μελετάμε τη διαμόρφωση συχνότητας FDD στο LTE. Στο downlink του FDD, τα πλαίσια που αποστέλλονται, αποτελούνται από 20 slots με διάρκεια  $T_{\text{slot}}=0.5\text{msec}$  το κάθε ένα. Τα slots ομαδοποιούνται σε υποπλαίσια, έτσι ώστε ένα υποπλαίσιο να αποτελείται από 2 συνεχόμενα slots όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Το κάθε slot αποτελείται είτε από 6 είτε από 7 OFDM symbols και εξαρτάται είτε από το normal είτε από το extended cyclic prefix.

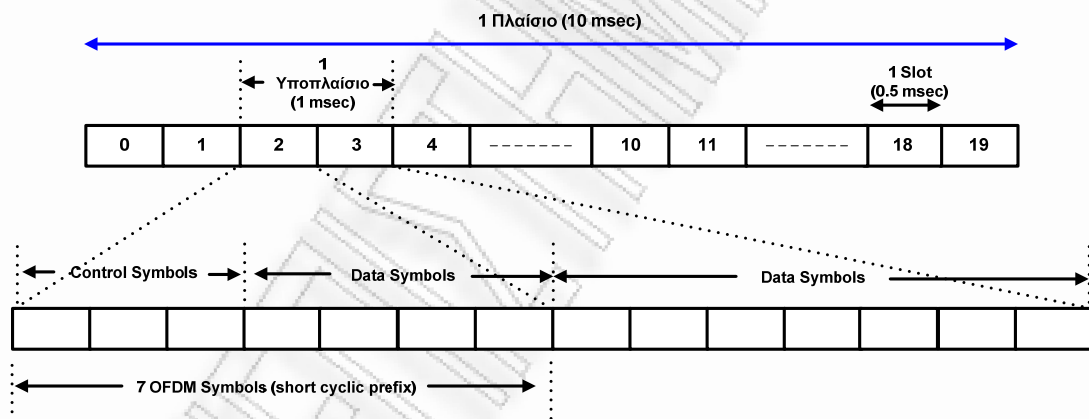


Το μέγεθος κάθε slot στο LTE είναι 6144 bits = 768 bytes [70]. Το κάθε υποπλαίσιο είναι  $2 \cdot 768 = 1536$  bytes. Άρα το 1 πλαίσιο είναι  $10 \cdot 1536 = 15360$  bytes.



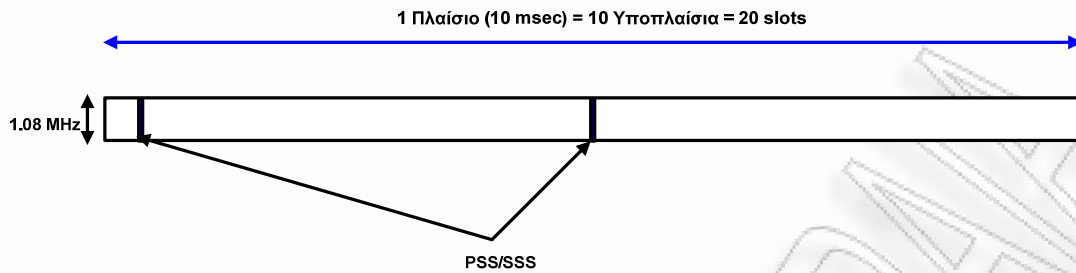
**Εικόνα 6.1 Η δομή του πλαισίου στο LTE.**

Προηγουμένως, αναφέραμε ότι ένα υποπλαίσιο αποτελείται από δύο συνεχόμενα slots, το πρώτο slot με διάρκεια 0,5 msec αποτελείται από το Physical Downlink Control Channel (PDCCH), ενώ το δεύτερο slot με διάρκεια 0,5 msec αποτελείται από το Physical Downlink Shared Channel (PDSCH). Το πρώτο slot χωρίζεται σε δύο τμήματα, δηλαδή τα 3 πρώτα OFDM symbols είναι τα Control Symbols και τα υπόλοιπα OFDM symbols είναι τα Data Symbols. Ενώ, στο δεύτερο slot τα 7 OFDM symbols είναι τα Data Symbols.



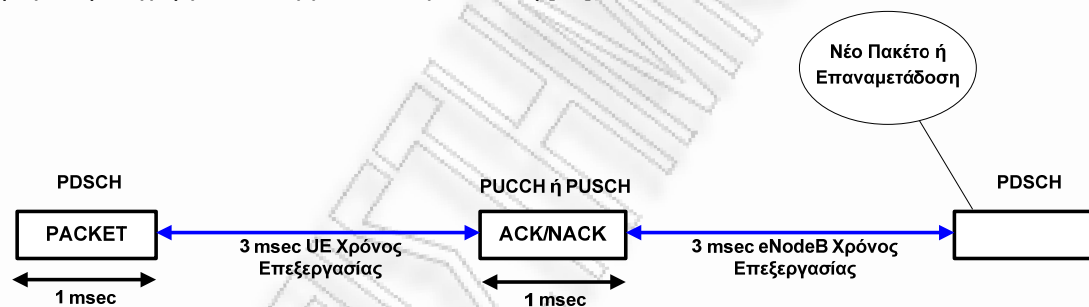
**Εικόνα 6.2 Η δομή του downlink slot στο LTE.**

Υπάρχουν 504 Physical Cell Identities (PCIs) τιμές στο LTE σύστημα, σε σύγκριση με τους 512 πρωτεύον κώδικες κωδικοποίησης στο WCDMA. Το πρωτεύον σήμα συγχρονισμού (Primary Synchronization Signal - PSS) και τα δευτερεύον σήματα συγχρονισμού (Secondary Synchronization Signals - SSS) μεταδίδονται, όμοια στο κανάλι PBCH, πάντα με το 1.08 MHz bandwidth, τοποθετούνται στο 1ο και στο 11ο slots (slots 0 και 10) των 10 msec πλαισίου [16] [72].



Εικόνα 6.3 Συγχρονισμός στο LTE.

Η λειτουργία της διαδικασίας HARQ του LTE υποστηρίζει το soft combining και την χρήση του στοιχειώδη πλεονασμού. Η χρήση του soft combining σημαίνει ότι η επαναμετάδοση έχει ακριβώς τον ίδιο ρυθμό παραμέτρων, όπως η αρχική μετάδοση και έτσι μεταδίδονται ακριβώς τα ίδια σύμβολα. Με την χρήση του στοιχειώδη πλεονασμού, η επαναμετάδοση μπορεί να έχει διαφορετικό ποσοστό παραμέτρων όπως η αρχική μετάδοση. Η ελάχιστη καθυστέρηση μεταξύ του τέλους ενός πακέτου και της έναρξη της αναμετάδοσης είναι 7 msec. Ο UE θα στείλει το ACK / NACK για ένα πακέτο στο πλαίσιο N, στο πλαίσιο N+4 της ανερχόμενης ζεύξης. Αυτό αφήνει περίπου 3 msec χρόνο επεξεργασίας για τον UE, ανάλογα με το uplink / downlink χρονοδιάγραμμα και ελέγχεται από τη διαδικασία χρονοδιαγράμματος. Η χρονική στιγμή του downlink για μία μονή μετάδοση πακέτου στο downlink απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Η άμεση αναμετάδοση στο downlink υπόκειται στον scheduler του eNodeB και έτσι το timing είναι η πρώτη στιγμή για να συμβεί επαναμετάδοση [16].



Εικόνα 6.4 Ο χρόνος που απαιτείται για την μετάδοση ενός πακέτου στο downlink στο LTE HARQ .

Η χρήση του OFDMA είναι ιδανική στο downlink του 3GPP LTE. Το βασικό διάστημα του κάθε υποφορέα subframe είναι 15 kHz. Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τις παραμέτρους του OFDM [72], [73], [74].

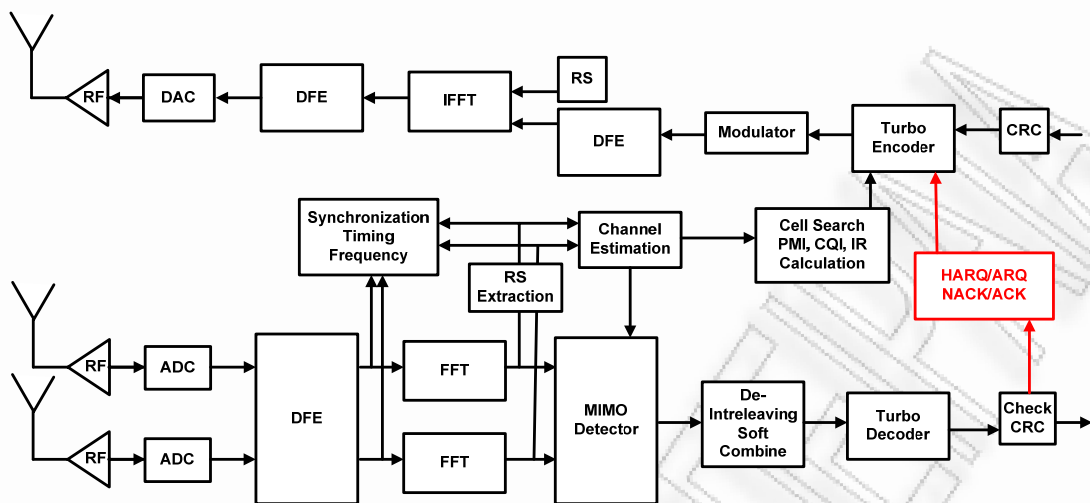
Μετάδοση Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Διάρκεια Υποπλαίσιου	1msec					
Διάστημα Υποπλαίσιου	15kHz					
Δείγματα Συχνότητας (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
Μέγεθος FFT	128	256	512	1024	1536	2048

OFDM symbols ανά slot		7/6					
Μήκος CP	Normal	(4.69/9) x6, (5.21/10) x1	(4.69/18)x 6, (5.21/20)x 1	(4.69/36)x 6, (5.21/40)x 1	(4.69/72)x 6, (5.21/80)x 1	(4.69/108)x 6, (5.21/120)x 1	(4.69/144)x 6, (5.21/160)x 1
	Extended	(16.67/32)	(16.67/64)	(16.67/128)	(16.67/256)	(16.67/384)	(16.67/512)

Διαμόρφωση		Μήκος Cyclic Prefix	
		$T_s$	$\mu\text{sec}$
Normal CP	$\Delta f=15\text{kHz}$	160 για $l=0$ 144 για $l=1,2,\dots,5$	5.21 για $l=0$ 4.69 για $l=1,2,\dots,5$
	$\Delta f=15\text{kHz}$	512	16.67
Extended CP	$\Delta f=15\text{kHz}$	1024	33.33

Το φυσικό κανάλι ελέγχου downlink μεταφέρει εργασίες χρονοπρογραμματισμού και άλλες πληροφορίες ελέγχου. Ένα φυσικό κανάλι ελέγχου μεταδίδει σε ομαδοποίηση ένα ή πολλά στοιχεία στο κανάλι ελέγχου (Control Channel Elements - CCEs), όπου ένα στοιχείο στο κανάλι ελέγχου αντιστοιχεί σε ένα σύνολο των resource elements. Πολλαπλά PDCCHs μπορούν να μεταδοθούν σε ένα υποπλαίσιο. Το κανάλι PDCCH στέλνεται σε κάθε υποπλαίσιο (1 msec). Το power control εκτελείται μία φορά σε κάθε 2-3 msec [75].

Για το LTE, το power control είναι αργό για το uplink. Όμως στο downlink δεν υπάρχει κανένα power control. Καθώς το εύρος ζώνης διαφέρει λόγω των διακυμάνσεων των δεδομένων, την απόλυτη μετάδοση ισχύος του UE που επίσης αλλάζει. Το power control δεν ελέγχει πραγματικά την απόλυτη ισχύ, αλλά περισσότερο την φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density - PSD), ισχύς ανά Hz, για μια συγκεκριμένη συσκευή. Η χρήση ενός αργού ρυθμού για το power control είναι η χρήση των ορθογώνιων resources στο uplink του LTE, που αποφεύγει το πρόβλημα που απαιτεί γρήγορο power control σε δίκτυα WCDMA. Το βασικό κίνητρο για το power control είναι η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας του τερματικού και να αποφευχθεί ένα υπερβολικά μεγάλο δυναμικό εύρος του δέκτη eNodeB, αντί για το μετριασμό παρεμβολών. Στον δέκτη PSDs των διαφόρων χρηστών πρέπει να είναι λογικά κοντά το ένα στο άλλο έτσι ώστε ο δέκτης A / D μετατροπέα έχει λογικές απαιτήσεις, και τα αποτελέσματα της παρέμβολής από την το μη ιδανικό σχήμα του φάσματος του πομπού UE βρίσκεται υπό έλεγχο. Κατά την αλλαγή του ρυθμού δεδομένων του PSD παραμένει σταθερό το power control του uplink του LTE, αλλά το συνολικό αποτέλεσμα της ισχύος κατά την μετάδοση ρυθμίζεται σε σχέση με την αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Το πραγματικό power control με βάση την εκτίμηση του pathloss, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους των κελιών και στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της (συσσωρευμένης) τιμής του συντελεστή διόρθωσης που έλαβε από το eNodeB. Ανάλογα με τις ρυθμίσεις των παραμέτρων στο υψηλότερο στρώμα, το power control που χρησιμοποιείται είναι είτε 1 dB πάνω ή προς τα κάτω ή το σύνολο των [-1dB, 0, +1 dB, +3 dB]. Οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν επίσης το power control που είναι απόλυτη τιμή, αλλά με βάση την προτεραιότητα στο κείμενο, δεν προβλέπεται ότι αυτό θα χρησιμοποιηθεί στην πρώτη φάση των δικτύων. Το συνολικό δυναμικό εύρος του power control είναι ελαφρώς μικρότερο σε σχέση με το WCDMA και οι συσκευές έχουν τώρα ένα ελάχιστο επίπεδο ισχύος από -41 dBm σε σύγκριση με -50 dBm στο WCDMA [16].



Εικόνα 6.5 Λειτουργική ροή στο downlink της αλυσίδας του δέκτη σε ένα LTE Modem.

Η ραδιοσυχνότητα (RF - Radio Frequency) είναι ένα ποσοστό της ταλάντωσης της τάξης των 3 kHz-300GHz. Η RF αντιστοιχεί στην συχνότητα των ραδιοκυμάτων και στα εναλλασσόμενα ρεύματα που μεταφέρουν τα σήματα ραδιοσυχνοτήτων [76].

Ο μετατροπέας του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC - Digital to Analog Converter) είναι μια συσκευή που μετατρέπει τον ψηφιακό κώδικα σε ένα αναλογικό σήμα.

Ο μετατροπέας του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC - Analog to Digital Converter) εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία του DAC. Ο ADC είναι μια συσκευή που μετατρέπει την συνεχή ποσότητα σε ψηφιακό διακριτό χρόνο [77].

Το FFT είναι ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, ενώ το IFFT είναι ο αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier.

Το DFE (Digital Front - End) είναι η γέφυρα μεταξύ του αναλογικού Front - End και του ψηφιακού baseband στα ασύρματα συστήματα. Η λειτουργία του DFE αποκτά έλεγχο, μετατροπή του ρυθμού δειγμάτων, παλμό διαμόρφωσης, φιλτράρισμα και φάση προσαρμογής. Το DFE είναι ένα μπλοκ από ψηφιακά φίλτρα.

Στο LTE, ο εκτιμητής καναλιού χρησιμοποιεί σήματα αναφοράς (Reference Signals - RS). Τα σήματα αναφοράς είναι ενσωματωμένα στα physical resource blocks. Τα Reference Signals μεταδίδονται κατά τη διάρκεια του πρώτου και του πέμπτου συμβόλων OFDM σε κάθε slot, όταν το short CP χρησιμοποιείται και κατά τη διάρκεια του πρώτου και του τέταρτου συμβόλων OFDM, όταν χρησιμοποιείται το long CP. Τα Reference Signals μεταδίδονται σε κάθε έκτο υποφορέα.

Το Synchronization timing frequency είναι υπεύθυνο για τον συγχρονισμό και υπάρχει σε κάθε OFDM σύστημα.

Στο LTE για να έχουμε αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων και υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών κατά τη μετάδοση τους μέσω ασύρματων καναλιών χρησιμοποιούνται κώδικες ελέγχου λαθών (FEC). Αντίστοιχα, υπάρχουν μηχανισμοί κωδικοποίησης (encoder) και αποκωδικοποίησης (decoder) για τους turbo codes.

Η απεικόνιση της κεραίας αποτελείται από την απεικόνιση επιπέδου και το precoding. Η απεικόνιση επιπέδου πολυπλέκει (modulates) τα σύμβολα που ανήκουν σε ένα ή δύο κώδικες λέξεων σε διαφορετικό αριθμό στρωμάτων (ή codeblocks) για τη μετάδοση. Το precoding φορτώνει σύμβολα από κάθε στρώμα και απεικονίζει αυτά σε διαφορετικές κεραίες και υποφορείς.

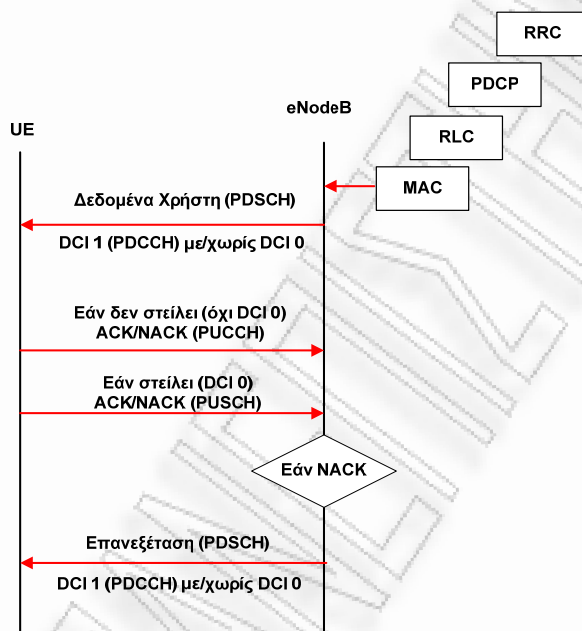
Ο κυκλικός έλεγχος πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check - CRC) είναι μια συνηθισμένη τεχνική για την ανίχνευση σφαλμάτων κατά τη μετάδοση δεδομένων. Είναι ένα είδος συνάρτησης hash που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός checksum, σταθερό αριθμό bits ανά μπλοκ δεδομένων, όπως ένα πακέτο του δικτύου ή ένα μπλοκ ενός αρχείου υπολογιστή. Το checksum χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων μετά την μετάδοση και κατά την αποθήκευση του πακέτου. Τα μηνύματα που μεταδίδονται χωρίζονται σε προκαθορισμένα μήκη και χωρίζονται από έναν σταθερό διαιρέτη [78][79].

Σύμφωνα με τον υπολογισμό, το υπόλοιπο προστίθεται και στέλνεται σε μήνυμα. Όταν το μήνυμα ληφθεί, ο υπολογιστής υπολογίζει εκ νέου το υπόλοιπο και το συγκρίνει με το μεταδιδόμενο μέρος για να επιβεβαιώσει ότι δεν επήλθαν αλλαγές κατά τη μετάδοση. Εάν οι αριθμοί δεν ταιριάζουν, τότε διαπιστώνεται σφάλμα.

Τα πρωτόκολλα επιπέδου MAC λειτουργούν σε επίπεδο μεταφερόμενων block (Transport Block). Για την υποστήριξη ανίχνευσης σφαλμάτων, τα TB αρχικά προσαρτώνται με μια ακολουθία με κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC) που υπολογίζονται από όλα τα κομμάτια στο TB χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια πολυώνυμο 24-bit CRC gA (D).

Η εκτίμηση του καναλιού (Channel estimation) είναι σημαντική στον σχεδιασμό του δέκτη στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Η επίδραση του καναλιού στις μεταδιδόμενες πληροφορίες πρέπει να υπολογιστεί ώστε να γίνεται σωστά η ανάκτηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας [80].

Η αναζήτηση κελιού (cell search), ο υπολογισμός του Precoding Matrix Indication (PMI) και της Channel Quality Indication (CQI) στον χρήστη UE αποτελούν σημαντικές λειτουργίες και χειρίζονται από τον επεξεργαστή baseband [81].



Εικόνα 6.6 Διαδικασία HARQ και downlink στο LTE Modem

Το Αυτόματο αίτημα επανάληψης (Automatic Repeat reQuest - ARQ), γνωστό και ως αυτόματο ερώτημα επανάληψη (Automatic Repeat Query), είναι μια μέθοδος ελέγχου σφάλματος για τη μετάδοση των δεδομένων που χρησιμοποιεί πακέτα επιβεβαίωσης (ACK), που στέλνονται από τον παραλήπτη και επιβεβαιώνουν την επιτυχή λήψη των πακέτων, και τα χρονικά όρια (timeouts) σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους όπου επιτρέπεται να παρέλθουν πριν από την λήψη ενός ACK, για να επιτευχθεί αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων πάνω από μια αναξιόπιστη υπηρεσία. Αν ο αποστολέας δεν λάβει ένα ACK πριν από αυτό το χρονικό όριο,



τότε το πλαίσιο/πακέτο επαναμεταδίδεται έως ότου ο αποστολέας λάβει μια επιβεβαίωση ή ο αριθμός των προκαθορισμένων επαναμεταδόσεων υπερβεί έναν αριθμό.

Οι μέθοδοι ARQ και FEC είναι βασικές τεχνικές για τον έλεγχο λαθών. Ο συνδυασμός των μεθόδων αυτών είναι το υβριδικό ARQ (Hybrid ARQ - HARQ), το οποίο αυξάνει την επίδοση. Η διαδικασία ARQ έχει χαμηλή πολυπλοκότητα, καλή ρυθμαπόδοση και δεν απαιτεί μνήμη στην πλευρά του παραλήπτη. Η διαδικασία HARQ χρησιμοποιείται μαζί με το FEC για να βελτιώσει την ρυθμαπόδοση από τις επαναμεταδόσεις πακέτων, αλλά λόγω πλεονασμού κώδικα η ρυθμαπόδοση είναι λιγότερο κανάλι θορύβου είναι χαμηλότερη από την ρυθμαπόδοση του ARQ. Η διαδικασία HARQ απαιτεί ένα μεγάλο soft buffer στην προτεραιότητα του ρυθμού των δεδομένων [86].

#### Διαδικασία HARQ/ARQ και downlink στο LTE Modem σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο.

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Το υψηλό επίπεδο δικτύου (RRC) μεταδίδει στο χαμηλότερο επίπεδο τα δεδομένα.

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Το χαμηλότερο επίπεδο δικτύου μεταδίδει τα δεδομένα στην κινητή συσκευή του χρήστη (UE) μέσω του καναλιού PDSCH.

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Η κινητή συσκευή του χρήστη UE λαμβάνει τα δεδομένα που στέλνονται μέσω του καναλιού PDSCH.

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Η κινητή συσκευή του χρήστη UE ελέγχει τα δεδομένα που στέλνονται μέσω του καναλιού PDSCH για CRC λάθη.

Βήμα 5<sup>ο</sup>: Εδώ υπάρχουν 2 επιλογές:

- Εάν ο UE έχει κάποια δεδομένα να μεταδώσει στο δίκτυο, τότε στέλνει το αποτέλεσμα του CRC ελέγχου (ACK/NACK) μέσω του καναλιού PUSCH.
- Εάν ο UE δεν έχει δεδομένα να μεταδώσει στο δίκτυο, τότε στέλνει το αποτέλεσμα του CRC ελέγχου μέσω του καναλιού PUCCH.

Βήμα 6<sup>ο</sup>: Το δίκτυο λαμβάνει τα αποτελέσματα του CRC ελέγχου από τον UE και εφαρμόζει ένα από τα ακόλουθα βήματα:

- Εάν λάβει επιβεβαίωση επιτυχούς μετάδοσης (ACK), το δίκτυο μεταδίδει το επόμενο πακέτο δεδομένων.
  - Εάν ο αριθμός των επιτυχημένων διαδοχικών μεταδόσεων είναι μεγαλύτερος ή ίσος από ένα threshold A ( $ACK \geq A$ ), τότε οι μεταδόσεις αλλάζουν διαμόρφωση από HARQ σε ARQ.
  - Εάν ο αριθμός των επιτυχημένων διαδοχικών μεταδόσεων είναι μικρότερος από ένα threshold A ( $ACK < A$ ), τότε οι μεταδόσεις ακολουθούν διαδικασία HARQ.
- Εάν δεν λάβει επιβεβαίωση επιτυχούς μετάδοσης, δηλαδή εάν λάβει μήνυμα αποτυχημένης μετάδοσης ( $NACK \geq 1$ ), η διαδικασία HARQ επαναμεταδίδει το συγκεκριμένο πακέτο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται το πολύ 3 διαδοχικές μεταδόσεις.

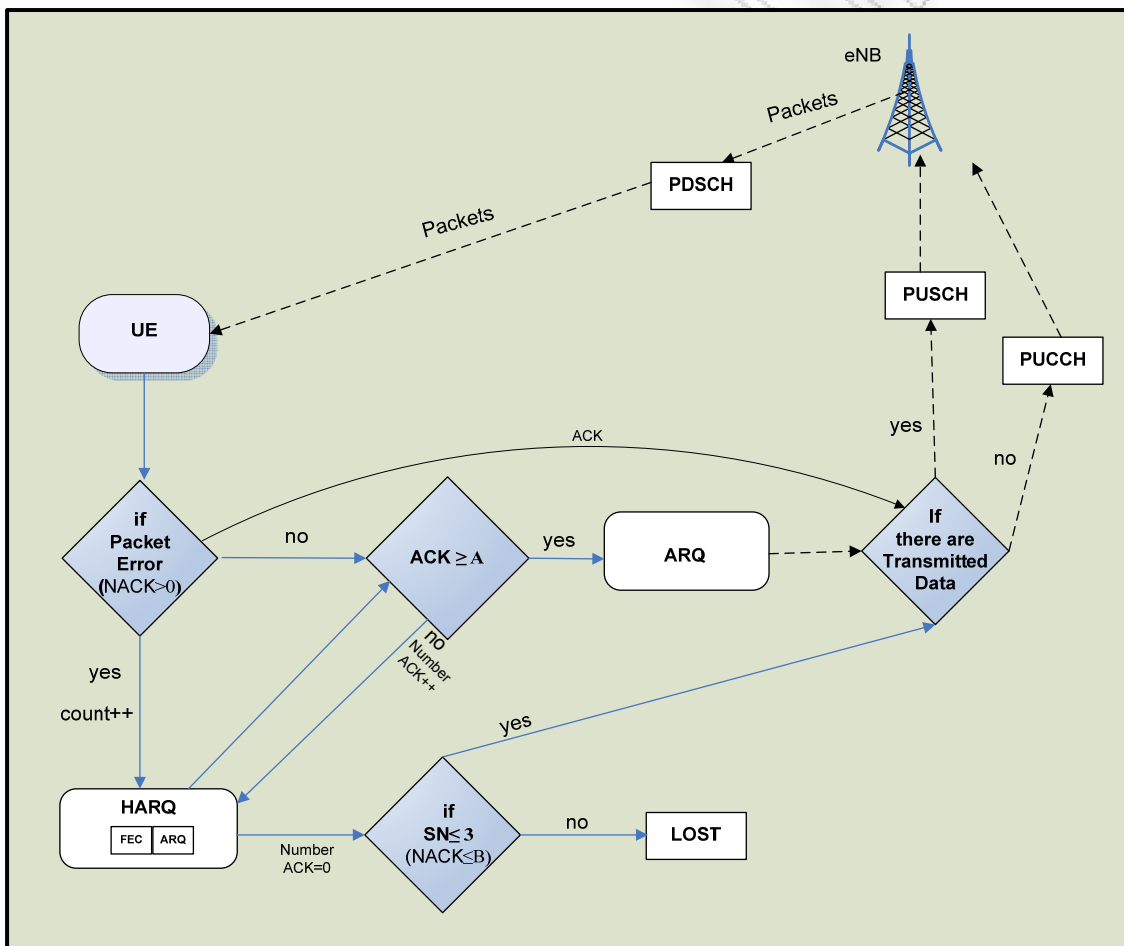
Βήμα 7<sup>ο</sup>: Εάν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή πηγαινε στο Βήμα 1, αλλιώς το μόντεμ της κινητής συσκευής του χρήστη μπαίνει σε κατάσταση αδράνειας.

#### Ψευδοκώδικας HARQ/ARQ και downlink στο LTE Modem σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο.

- 1) **If** (packets>0)
- 2)     **If** (NACK>0)
- 3)     count++;
- 4)     HARQ();
- 5)     Number\_ACK=0;
- 6)             **if** (SN≤3)

```

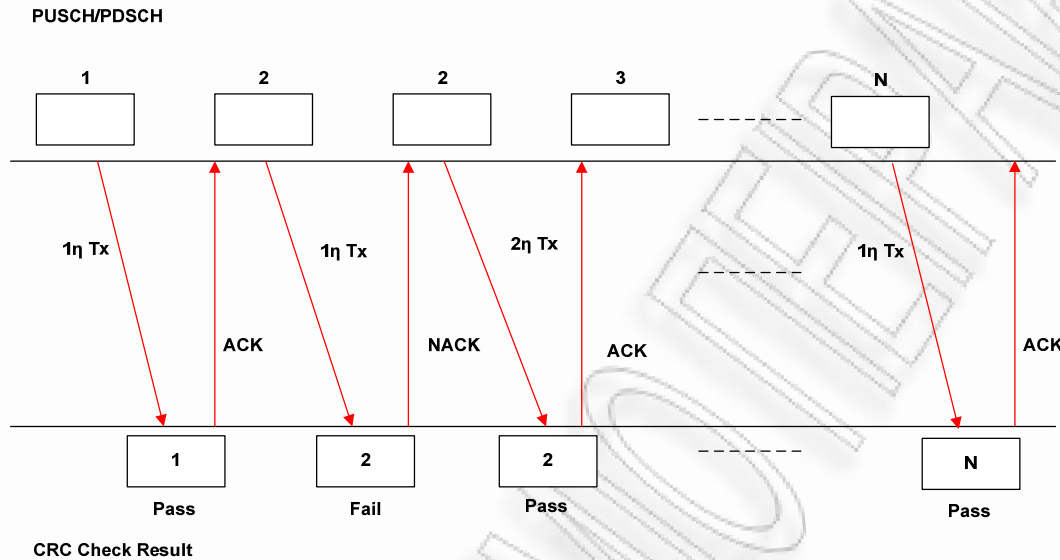
7)          go to 1
8)          else
9)          packet_Lost ();
10)         else
11)         If (SN≤3)
12)         ARQ ();
13)         go to 1
14)         else
15)         ACK++;
16)         go to 4
17) else
18) finish ();
    
```



Εικόνα 6.7 Αρχιτεκτονική προτεινόμενου μοντέλου.

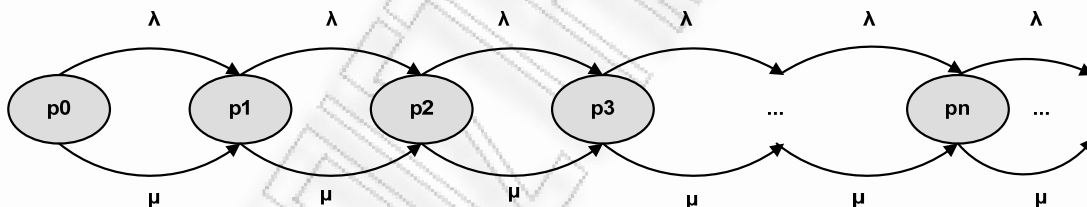
Παράδειγμα χρήσης του μοντέλου

Έστω ότι ο eNodeB θέλει να μεταδώσει N πακέτα σε έναν χρήστη. Επίσης, έστω ότι το 1ο από αυτά μεταδίδεται και αποκωδικοποιείται από τον χρήστη επιτυχώς. Όμως, το 2ο πακέτο αποτυγχάνει να μεταδοθεί και να αποκωδικοποιηθεί με την 1η προσπάθεια και γι' αυτό χρειάζεται και 2η προσπάθεια. Το παράδειγμα αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



**Εικόνα 6.8** Παράδειγμα χρήσης μοντέλου με βάση τη διαδικασία ARQ και HARQ.

Σε ένα πραγματικό σενάριο χρήσης του προηγούμενου μοντέλου εικόνα 6.7 (επιτυχείς και αποτυχείς) με αναμεταδώσεις, το μοντέλο διαμορφώνεται ως μια αλυσίδα του Markov ως εξής:



**Εικόνα 6.9** Υπολογισμός δυναμικής ενέργειας προτεινόμενου μοντέλου με βάση του Markov.

Στο LTE, το ARQ υλοποιείται σε δύο σταδιακά μοντέλα [64]. Η διαδικασία HARQ τρέχει σε ένα χαμηλό επίπεδο και ως εκ τούτου επιτρέπει τις πολύ γρήγορες αναμεταδόσεις. Μετά από N αποτυχημένες μεταδόσεις η μετάδοση του πακέτου αναφέρεται στα ανώτερα στρώματα, ότι απέτυχε.

Το νέο προτεινόμενο μοντέλο είναι πιο αξιόπιστο του προηγούμενου μοντέλου, το οποίο αναλύεται παρακάτω.

Η συνολική κατανάλωση της ενέργειας E είναι το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής ενέργειας, η οποία είναι:

$$E = E_{\sigma t} + E_{\delta} \tag{6.1}$$

Για τη στατική ενέργεια, υποθέτουμε και παίρνουμε ως E<sub>μ</sub> την ενέργεια που καταναλώνεται για ένα OFDM σύμβολο:



$$E_{\mu} = P_{\alpha} T_{\alpha} + P_{on} T_{on} + P_{off} T_{off} \quad (6.2)$$

Όπου,

$P_{\alpha}$  : η κατανάλωση ισχύος όταν το modem είναι σε κατάσταση αδράνειας.

$T_{\alpha}$  : η χρονική διάρκεια που το modem είναι σε κατάσταση αδράνειας.

$P_{on}$  : η κατανάλωση ισχύος όταν το modem μπαίνει σε λειτουργία.

$T_{on}$  : η χρονική διάρκεια που το modem μπαίνει σε λειτουργία.

$P_{off}$  : η κατανάλωση ισχύος όταν κλείνει το modem.

$T_{off}$  : η χρονική διάρκεια όταν κλείνει το modem.

Η στατική ενέργεια των J. Dohl και G. Fettweis δεν υπολογίζεται όταν το modem μπαίνει σε λειτουργία ούτε και όταν το modem κλείνει, όπως υπολογίζεται στην εξίσωση (6.3).

Υποθέτουμε ότι η τιμή του  $P_{\alpha}$  θεωρείται αμελητέα σε σχέση με την ενέργεια του modem  $E_{\mu}$ , επειδή η κατανάλωση ισχύος είναι δυνατόν να αγνοηθεί όταν το modem βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας. Άρα:

$$E_{\mu} = P_{on} T_{on} + P_{off} T_{off} \quad (6.3)$$

Έστω  $E_{\mu t}$  η συνολική ενέργεια του modem για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα:

$$E_{\mu t} = \sum_{j=1}^N P_{on_j} T_{on_j} + \sum_{k=1}^N P_{on_k} T_{on_k} \quad (6.4)$$

Άρα, η συνολική στατική ενέργεια είναι:

$$E_{\sigma t} = \sum_{j=1}^N P_{on_j} T_{on_j} + \sum_{k=1}^N P_{on_k} T_{on_k} \quad (6.5)$$

Η συνολική στατική ενέργεια των J. Dohl και G. Fettweis δεν υπολογίζεται, όπως υπολογίζεται στην εξίσωση (6.5).

Εκτός από την στατική κατανάλωση ενέργειας στο modem, υπάρχει και η κατανάλωση ενέργειας για την επεξεργασία των OFDM συμβόλων που λαμβάνονται από το LTE modem και

είναι η δυναμική ενέργεια  $E_{\delta}$ .

Το προτεινόμενο σύστημα για τις επιτυχείς και αποτυχείς μεταδόσεις καθώς και για τις επαναμεταδόσεις με βάση το HARQ/ARQ απεικονίζεται στην εικόνα 6.7.

Στο προτεινόμενο μοντέλο όταν οι αποτυχίες είναι μεγαλύτερες ή ίση του 1 ( $NACK \geq 1$ ) τότε οι μεταδόσεις ακολουθούν HARQ διαμόρφωση. Εάν όμως δεν υπάρχουν αποτυχίες και εάν οι επιτυχίες αυτές είναι διαδοχικές και είναι μεγαλύτερες ή ίσες του threshold A ( $ACK \geq A$ ) τότε οι μεταδόσεις αλλάζουν διαμόρφωση από HARQ σε ARQ. Το threshold A είναι μια παράμετρος

και χρησιμοποιείται για το όριο των επιτυχημένων μεταδόσεων. Επομένως, αν κατά τη διάρκεια των μεταδόσεων υπάρξει έστω μία αποτυχημένη μετάδοση τότε το σύστημα ακολουθεί διαμόρφωση HARQ.

Η δυναμική ενέργεια των J. Dohi και G. Fettweis είναι  $E_d = E_{bit} \cdot N_{ti} \cdot N_c$  όπου,

$N_c$ : το ποσό του code bits ανά OFDM σύμβολο.

$N_{ti}$ : ο αριθμός των turbo επαναλήψεων.

$$E_{bit}(b) = \frac{1 - \nu}{N_{\max}}$$

Η  $E_{bit}(b)$  είναι η ενέργεια της επεξεργασίας ενός bit ανά επανάληψη, όπου το  $b$  είναι ένα διάνυσμα.

Στη συνέχεια, στο [64] υπολογίζεται το  $N_{\max}$  ως εξής:  $N_{\max} = \max[N_{ti}(b) \cdot N_c(b)]$ , και παρατηρούμε ότι δεν είναι σωστός ο τύπος, αλλά θα πρέπει να υπολογιστεί σωστά ως εξής:

$N_{\max} = \max[N_{ti}(b), N_c(b)]$ . Δηλαδή δεν είναι  $N_{ti}$  στο τετράγωνο, αλλά το maximum των  $N_{ti}$  και  $N_c$ .

Επιπλέον στο [64] δεν υπολογίζονται οι επιτυχείς μεταδόσεις και ούτε παίρνουν ένα threshold, όπως το υπολογίζεται παρακάτω.

Στο νέο προτεινόμενο μοντέλο, η αλλαγή του συστήματος από HARQ σε ARQ μετάδοση μας επιτρέπει την καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και την καλύτερη απόδοση του.

Υποθέτουμε ότι ο αριθμός της άφιξης των δεδομένων στο modem ακολουθεί μια κατανομή Poisson με μέσο ρυθμό άφιξης  $\lambda$  και χρόνος εξυπηρέτησης, μια εκθετική κατανομή, με μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης  $1/\mu$ .

Επειδή το μοντέλο (εικόνα 6.7) ακολουθεί κατανομή Poisson [82], [83], κάθε κυκλάκι στην μαρκοβιανή αλυσίδα (εικόνα 6.9) αναπαριστά ένα στιγμιότυπο του μοντέλου.

Στο προτεινόμενο μοντέλο ο μέγιστος αριθμός εργασιών στο σύστημα είναι  $K$ . Μια εργασία άφιξης εισέρχεται στην ουρά εάν δεν βρει περισσότερες από  $K$  εργασίες στο σύστημα, αλλιώς η εργασία αυτή θα χαθεί.

Οι αριθμοί αφίξεων και αναχωρήσεων είναι:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & 0 \leq n < K \\ 0, & n \geq K \end{cases}$$

$$\mu_n = \begin{cases} \mu, & 0 < n \leq K \\ 0, & n > K \end{cases}$$

Το σύστημα ουράς περιέχει έναν μόνο εξυπηρετητή. Η συνθήκη για ένα σταθερό σύστημα είναι όταν ο λόγος του αριθμού άφιξης προς τον αριθμό εξυπηρέτησης είναι μικρότερο της μονάδας:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} < 1$$

Αριθμός των σφαλμάτων bit (BER)

Στην ψηφιακή μετάδοση, ο αριθμός των σφαλμάτων bit (bit error rate ή bit error ratio ή BER) είναι ο αριθμός των bits που έλαβε μια ροή δεδομένων πάνω από ένα κανάλι επικοινωνίας που έχουν αλλάξει εξαιτίας του θορύβου, των παρεμβολών. Το bit error rate είναι ο αριθμός των bit errors δια του συνολικού αριθμού των μεταδιδόμενων bits κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Το BER είναι συνάρτηση της  $E_b/N_0$ :

$$BER = \frac{1}{2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{E_b/N_0/\sqrt{2}}^{\infty} e^{-t^2} dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow BER = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{E_b/N_0/\sqrt{2}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (6.6)$$

Εξασθένηση σήματος (Rayleigh)

Η εξασθένηση σήματος υπολογίζεται από την κατανομή Rayleigh ως εξής:

$$f(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (6.7)$$

Όπου,

z: είναι το SIR και ισχύει  $z > 0$ .

σ: είναι η τυπική απόκλιση.

Μετ'επιστροφή καθυστέρηση

Το RTT είναι η μετ'επιστροφή καθυστέρησης και είναι το μήκος του χρόνου που απαιτείται για ένα σήμα που θα σταλεί συν το μήκος του χρόνου που χρειάζεται για την απόδειξη ότι το σήμα έχει ληφθεί. Η χρονική αυτή καθυστέρηση στο LTE είναι μικρότερη των 10 msec και υπολογίζεται ως εξής:

$$RTT = t_{\text{downlink}} + t_{\text{uplink}} \quad (6.8)$$

όπου,

$t_{\text{downlink}}$  = χρόνος μετάδοσης+χρόνος διάδοσης+χρόνος επεξεργασίας+ χρόνος παραμονής στο buffer.

$t_{\text{uplink}}$  = χρόνος μετάδοσης+χρόνος διάδοσης+χρόνος επεξεργασίας+ χρόνος παραμονής στο buffer.

$$\text{Χρόνος μετάδοσης} = \frac{\text{Μέγεθος Πλαισίου}}{\text{Bandwidth}} \quad (6.9)$$

$$\text{Χρόνος διάδοσης} = \frac{\text{απόσταση}}{c} \quad (6.10)$$

$c = 3 \cdot 10^8$  m/sec, ταχύτητα φωτός.

Το μήκος του χρόνου που απαιτείται για ένα σήμα που θα σταλεί (πακέτο συν ACK/NACK) είναι 8 msec.

Η διαδικασία ελέγχου του χρόνου είναι απαραίτητη έτσι ώστε οι μεταδόσεις στο uplink από διαφορετικούς χρήστες να φτάνουν στο eNodeB εντός του cyclic prefix. Ο συγχρονισμός αυτός απαιτείται στο uplink για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των χρηστών που έχουν προγραμματιστεί στο ίδιο υποπλάισιο. Το eNodeB μετρά συνεχώς το χρονοδιάγραμμα του UE uplink σήματος και προσαρμόζει το χρόνο μετάδοσης uplink. Εντολές ελέγχου του χρόνου

αποστέλλονται μόνο όταν μια ρύθμιση χρονισμού είναι πραγματικά απαραίτητη. Ο χρόνος που απαιτείται για αυτήν την εντολή ελέγχου του χρόνου είναι  $0,52 \mu\text{s} = 0,52 \cdot 10^{-3} \text{ msec}$ , και εξαρτάται από το χρονοδιάγραμμα λήψης του πλαισίου στο downlink στο UE.

Αγνοούμε τους χρόνους μετάδοσης, διάδοσης και  $t_{\text{uplink}}$  διότι οι τιμές τους είναι σε msec όπου τείνουν στο μηδέν, άρα το  $RRT \approx 8 \text{ msec}$ .

### Σύγκρουση (Collision)

Πακέτα για  $N$  χρήστες περιμένουν σε ένα buffer και οι πόροι είναι κατανομημένοι μια φορά σε κάθε Transmission Time Interval (TTI) ή σε χρονοπρογραμματισμένη περίοδο.

Έστω ότι έχουμε  $B$  σταθμούς βάσεων (BSs), δηλαδή  $1, \dots, B$ , όπου μοιράζονται από μία ομάδα των  $M$  resource units. Τα resource units είναι ομάδες και χρησιμοποιούνται για να μειωθεί η επιβάρυνση ανατροφοδότησης σήματος. Κάθε σταθμός βάσεων  $i$ , όπου  $i=1, \dots, B$  επιλέγει  $R_i$  units, επιλέγονται τυχαία από τα διαθέσιμα  $M$  units. Θέλουμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα  $p$  που παριστάνει τα  $p$  από τα  $NB$  units που έχουν επιλεγεί από τον σταθμό βάσης  $B$  και παρουσιάζουν σύγκρουση [84].

Κάθε δοσμένο resource unit ανήκει σε ένα και μόνο ένα υποσύνολο  $i$ , όπου  $i=0, 1, \dots, 2^{B-1}-1$ . Έστω  $t_i$  ορίζουμε τον αριθμό των resource units που μοιράζονται αποκλειστικά από το υποσύνολο  $i$  και το σταθμό βάσης  $B$  και  $p_{b,B}$  είναι ίσο με το άθροισμα όλων των  $t_i$  για τα οποία το bit συσχετίζεται με τον σταθμό βάσης  $b$ .

$$p_{b,B} = \sum_{i \bmod 2^b = 2^{b-1} \dot{\vee} 2^{b-1} + 1 \dot{\vee} \dots 2^b - 1} t_i \quad (6.11)$$

Για 2 σταθμούς βάσεων η πιθανότητα σύγκρουσης είναι:

$$P(p | R_1, R_2, M) = \frac{\binom{R_2}{p} \binom{M - R_2}{R_1 - p}}{\binom{M}{R_1}} \quad (6.12)$$

Για  $B$  σταθμούς βάσεων η πιθανότητα σύγκρουσης είναι:

$$P(p | R_1, R_2, \dots, R_B, M) = \left( \prod_{k=1}^{B-1} \binom{M}{R_k} \right)^{-1} \times \sum_{t_1=0}^p \sum_{t_2=0}^p \dots \sum_{t_{2^{B-1}-1}=0}^p \binom{R_B}{p} \times \binom{p}{t_1, t_2, \dots, t_{2^{B-1}-1}} \prod_{k=1}^{B-1} \binom{M - R_B}{R_k - p_{k,B}} \quad (6.13)$$

### Παράδειγμα

Έστω ότι στέλνονται 45.000 kbytes. Το κάθε πακέτο έχει μέγεθος 1536 bytes = 1,5 kbytes όπως αναφέραμε παραπάνω. Άρα στέλνονται 30.000 πακέτα. Για να σταλθεί ένα πακέτο στο downlink του LTE χρειαζόμαστε χρόνο 8 msec, από εικόνα 6.4. Τα 30.000 πακέτα χρειάζονται χρόνο 240.000 msec. Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των πιθανοτήτων των αποτυχημένων και των επιτυχημένων μεταδόσεων των πακέτων. Γίνεται χρήση της κατανομής Poisson.

Πιθανότητα αποτυχίας στο HARQ – Αριθμός πακέτων

Η πιθανότητα αποτυχίας στο HARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $\chi$  όπου  $3 \geq \text{NACK} \geq 1$  εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 P(1 \leq X \leq 3) &= P(X = 1) + P(X = 2) + P(X = 3) = \\
 &= \frac{(\lambda 2 N_1 t)^1 e^{-\lambda 2 N_1 t}}{1} + \frac{(\lambda 3 N_2 t)^2 e^{-\lambda 3 N_2 t}}{2} + \frac{(\lambda 4 N_3 t)^3 e^{-\lambda 4 N_3 t}}{6} \Rightarrow \\
 P(1 \leq X \leq 3) &= \frac{(\lambda 2 N_1 t)^1 e^{-\lambda 2 N_1 t}}{1} + \frac{(\lambda 3 N_2 t)^2 e^{-\lambda 3 N_2 t}}{2} + \frac{(\lambda 4 N_3 t)^3 e^{-\lambda 4 N_3 t}}{6}
 \end{aligned}$$

(6.14)

Όπου,

 $t = \text{BER} * f(z) * \text{RTT} * P(\rho | R_1, R_2, \dots, R_B, M).$ 

N1: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 1)$ .

N2: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 2)$ .

N3: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 3)$ .

Η πιθανότητα αποτυχίας στο HARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $\chi$  όπου  $\text{NACK} = 0$  εκφράζεται παρακάτω. Όταν  $\text{NAK} = 0$  τότε το σύστημα αλλάζει από HARQ σε ARQ.

$$P(X = 0) = \frac{(\lambda N_a)^0 e^{-\lambda N_a t}}{1} = e^{-\lambda N_a t} \Rightarrow$$

$$P(X = 0) = e^{-\lambda N_a t} \quad (6.15)$$

Na: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 0)$ .

Η πιθανότητα αποτυχίας στο HARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $\chi$  όπου  $\text{NACK} > 3$  εκφράζεται ως εξής:

$$P(X > 3) = 1 - (P(X = 0) + P(X = 1) + P(X = 2) + P(X = 3)) \quad (6.16)$$

Η πιθανότητα για να σταλθεί ένα πακέτο για  $\text{NAK} = 1$  είναι:

$$P(X = 1) = 2.5 * 10^{-7}$$

Η πιθανότητα για να σταλθεί ένα πακέτο για  $\text{NAK} = 2$  είναι:

$$P(X = 2) = 1.69 * 10^{-10}$$

Η πιθανότητα για να σταλθεί ένα πακέτο για  $\text{NAK} = 3$  είναι:

$$P(X = 3) = 1.35 * 10^{-13}$$

Η πιθανότητα για να σταλθεί ένα πακέτο για  $\text{NAK} = 0$  είναι:

$$P(X = 0) = 3.35 * 10^{-4}$$

Η πιθανότητα για να σταλθεί ένα πακέτο για  $\text{NAK} > 3$  είναι:

$$P(X > 3) = 0.99$$

Συμπέρασμα για ένα πακέτο:

$$P(X > 3) > P(X = 0) > P(X = 1) > P(X = 2) > P(X = 3)$$

Η πιθανότητα για να σταλθούν 30.000 πακέτα για NAK=1 είναι:

$$P(X = 1) = 8.5 * 10^{-21}$$

Η πιθανότητα για να σταλθούν 30.000 πακέτα για NAK=2 είναι:

$$P(X = 2) = 2.17 * 10^{-30}$$

Η πιθανότητα για να σταλθούν 30.000 πακέτα για NAK=3 είναι:

$$P(X = 3) = 5.84 * 10^{-40}$$

Η πιθανότητα για να σταλθούν 30.000 πακέτα για NAK=0 είναι:

$$P(X = 0) = 3.77 * 10^{-11}$$

Η πιθανότητα για να σταλθούν 30.000 πακέτα για NAK>3 είναι:

$$P(X > 3) = 0.99$$

Συμπέρασμα για 30.000 πακέτα:

$$P(X > 3) > P(X = 0) > P(X = 1) > P(X = 2) > P(X = 3)$$

Οι εξισώσεις που μας δίνουν τα εξής πακέτα:

$$N = N\alpha + N1 + N2 + N3 + N\kappa \quad (6.17)$$

$$N1 = \frac{1}{2\lambda t} (\ln(N\lambda 2)) \quad (6.18)$$

$$N2 = -\frac{1}{\lambda 3t} W\left(-\frac{\lambda 3t}{e^{\lambda 2N1t}}\right) \quad (6.19)$$

$$N3 = \frac{1}{2\lambda t} W\left(-\frac{1}{2} \ln\left(\frac{3t^2}{8N\lambda}\right)\right) \quad (6.20)$$

$$N\alpha = \frac{1}{\lambda t} W\left(\frac{t}{2} e^{\lambda 2N1t}\right) \quad (6.21)$$

$$N\kappa = N - \frac{1}{2\lambda t} (\ln(N\lambda 2)) - \left(-\frac{1}{\lambda 3t} W\left(-\frac{\lambda 3t}{e^{\lambda 2N1t}}\right)\right) - \frac{1}{2\lambda t} W\left(-\frac{1}{2} \ln\left(\frac{3t^2}{8N\lambda}\right)\right) - \frac{1}{\lambda t} W\left(\frac{t}{2} e^{\lambda 2N1t}\right) \quad (6.22)$$

Όπου,

N: είναι το σύνολο των πακέτων.

N1: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 1)$ .

N2: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 2)$ .

N3: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 3)$ .

Nα: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X = 0)$ .

Nκ: είναι ο αριθμός των πακέτων για  $P(X > 3)$ .

Σύνδεση HARQ με ARQ

Για να συνδέσουμε το HARQ με το ARQ χρησιμοποιούμε την δεσμευμένη πιθανότητα. Τα δύο ενδεχόμενα  $X1=(X=0)$  και  $X2=(ACK \geq A)$  είναι ανεξάρτητα αν και μόνον αν  $P(X1 \cap X2) = P(X1)P(X2)$ . Το  $P(X1) > 0$ , τότε ορίζουμε την δεσμευμένη πιθανότητα ως εξής:

$$P(X2 | X1) = \frac{P(X2 \cap X1)}{P(X1)} = \frac{P(X2)P(X1)}{P(X1)} = P(X2) = P(ACK \geq A)$$

$$\text{Άρα, } P(X2 | X1) = P(ACK \geq A) \quad (6.23)$$

Πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ

Η πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $k$ , όπου  $ACK \geq A$  είναι:

$$p(k) = P(ACK \geq A) = 1 - \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A)^k e^{-\lambda A}}{k!} \quad (6.24)$$

όπου  $A$  είναι το threshold.

Η  $p(k)$  υπολογίζει τις συνεχόμενες  $A$  επιτυχημένες μεταδόσεις.

$$p(0) = 1 - e^{-\lambda A} \quad (6.25)$$

Όταν το σύστημα είναι ενεργό, έχουμε:

$$-(\lambda + \mu)p_1 + \lambda p_0 + \mu p_2 = 0 \quad (6.26)$$

$$-(\lambda + \mu)p_n + \lambda p_{n-1} + \mu p_{n+1} = 0, \text{ για } n \geq 2 \quad (6.27)$$

$$-\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \quad (6.28)$$

Η παρακάτω εξίσωση (6.28) είναι η συνθήκη κανονικοποίησης και πρέπει να ικανοποιείται.

$$\sum_{n=1}^{\infty} p_n = 1 \quad (6.29)$$

$$p_0 = 1 - e^{-\lambda A} \quad (6.30)$$

Από τις εξισώσεις (6.26) και (6.28) θα υπολογιστεί η  $p_1$ :

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu} (1 - e^{-\lambda A}) \quad (6.31)$$

Από τις εξισώσεις (6.28), (6.30) και (6.31) θα υπολογιστεί η  $p_2$ :

$$\mu p_2 = (\lambda + \mu)p_1 - \lambda p_0 \Rightarrow$$

$$p_2 = \frac{\lambda^2}{\mu^2} (1 - e^{-\lambda A}) \quad (6.32)$$

Επομένως η  $p_n$  είναι:

$$p_n = \frac{\lambda^n}{\mu^n} (1 - e^{-\lambda A}) \Rightarrow$$

$$p_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n (1 - e^{-\lambda A}) \quad (6.33)$$

Προσδιορίζοντας τις μέσες τιμές, τη διακύμανση ή τις στιγμές των τυχαίων μεταβλητών γίνεται συχνά αρκετά κουραστικό. Για να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες αυτές χρησιμοποιούνται μετατροπείς, καθώς η συνάρτηση μάζας πιθανότητας καθορίζεται μοναδικά από το  $z$ . Συνεπώς, εάν δύο μεταβλητές έχουν τον ίδιο μετατροπέα έχουν και την ίδια συνάρτηση κατανομής και αντίστροφα.

Ορίζουμε στην (6.33) τη γεννήτρια συνάρτηση της μάζας πιθανότητας  $p_n = P(X=n)$  για  $n=1,2,\dots$  και για  $-1 \leq z \leq 1$

$$G_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n z^n \quad (6.34)$$

Από τις εξισώσεις (6.33) και (6.34) έχουμε

$$G_0(z) = (1 - e^{-\lambda A}) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} z\right)^n \quad (6.35)$$

Πιο αναλυτικά η εξίσωση (6.34) αποτελείται από 2 περιπτώσεις και είναι:

Περίπτωση 1

Έστω  $|z| < \frac{\lambda}{\mu}$  τότε

$$G_0(z) = (1 - e^{-\lambda A}) \left( \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{\mu} z - 1\right)^2} - 1 \right) \quad (6.36)$$

Περίπτωση 2

Έστω  $|z| \geq \frac{\lambda}{\mu}$  τότε

$$G_0(z) = (1 - e^{-\lambda A}) \left( \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu} z\right)^n - 1}{\left(\frac{\lambda}{\mu} z - 1\right)^2} - 1 \right) \quad (6.37)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6.31), (6.32) και (6.33) με  $z=1$  έχουμε:

$$G_0(1) = (1 - e^{-\lambda A}) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \quad (6.38)$$

$$G_0(1) = (1 - e^{-\lambda A}) \left( \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{\mu} - 1\right)^2} - 1 \right) \quad (6.39)$$



$$G_0(1) = (1 - e^{-\lambda A}) \left( \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n - 1}{\left(\frac{\lambda}{\mu} - 1\right)^2} - 1 \right) \quad (6.40)$$

$$\text{Έστω, } L(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n p_n z^n = \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} &= z \frac{d}{dz} \left( \sum_{n=1}^{\infty} p_n z^n \right) = \\ &= z \frac{d}{dz} G_0(z) = \end{aligned} \quad (6.42)$$

$$= z(1 - e^{-\lambda A}) \frac{d}{dz} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} z\right)^n \quad (6.43)$$

τότε υπολογίζουμε το  $L(1)$  ως τον συνολικό αριθμό εργασιών στο LTE modem:

$$L(1) = (1 - e^{-\lambda A}) \frac{d}{dz} \Big|_{z=1} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu} z\right)^n \quad (6.44)$$

Όπου το  $L(1)$  είναι ο μέσος αριθμός εργασιών στο σύστημα  $K$ , δηλαδή  $L(1) = \bar{K}$ .

Σύμφωνα με τον Little κανόνα, ο μέσος συνολικός χρόνος που μια εργασία ξοδεύει στο σύστημα ουράς, στο LTE modem είναι:

$$\bar{T} = \frac{L(1)}{\lambda} \quad (6.45)$$

Το μήκος ουράς  $Q$  είναι ο αριθμός εργασιών στην ουρά και το μέσο μήκος της ουράς είναι:

$$\bar{Q} = \lambda \bar{W} \quad (6.46)$$

Ο χρόνος αναμονής  $W$  είναι ο χρόνος που μια εργασία ξοδεύει στην ουρά αναμονής.

Ο συνολικός μέσος χρόνος  $\bar{T}$  που μια εργασία ξοδεύει στο σύστημα ουράς είναι ο χρόνος αναμονής και ο χρόνος εξυπηρέτησης:

$$\bar{T} = \bar{W} + \frac{1}{\mu} \quad (6.47)$$

Γενικά η ρυθμοαπόδοση σε ένα σύστημα ουράς είναι  $\lambda$ , δηλαδή ο μέσος αριθμός εργασιών, στον οποίο η επεξεργασία έχει ολοκληρωθεί σε ένα τμήμα του χρόνου. Στην περίπτωση που ο buffer είναι πεπερασμένος στο σύστημα ουράς, η ρυθμοαπόδοση είναι διαφορετική του  $\lambda$ . Επομένως, η ρυθμοαπόδοση είναι:

$$\begin{aligned} \text{ρυθμοαπόδοση} &= \lambda(1 - p_n) \\ \Rightarrow \text{ρυθμοαπόδοση} &= \lambda \left(1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n (1 - e^{-\lambda A})\right) \end{aligned} \quad (6.48)$$

Η κατανάλωση της δυναμικής ενέργειας ( $E_{\delta 1}$ ) είναι:

$$E_{\delta 1} = G_0(1)P_{ενεργου} \frac{L(1)}{\lambda} Eb \quad (6.49)$$

Όπου,

$P_{ενεργου}$ : είναι η μέση κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια λήψης δεδομένων (όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση).

$E_b$ : είναι η ενέργεια ανά πληροφορία bit

Ρυθμός bit (R) - Σηματοθορυβικός λόγος (S/N)- Ενέργεια ανά bit πληροφορία ( $E_b$ )

Από το θεώρημα Shannon- Hartley, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης ενός καναλιού με θόρυβο του οποίου το εύρος ζώνης είναι B Hz και ο σηματοθορυβικός λόγος είναι S/N και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R \leq C = B \log_2 \left( \frac{S}{N} + 1 \right) \quad (6.50)$$

Όπου

R: είναι αυτό που μπορούμε να στείλουμε στο κανάλι.

C: είναι η χωρητικότητα καναλιού (bps).

B: είναι το εύρος ζώνης (Hz).

S: είναι το σήμα.

N: είναι ο θόρυβος.

Το λαμβανόμενο σήμα ισχύος εκφράζεται ως  $S = E_b * R$ , όπου  $E_b$  είναι η λαμβανόμενη ενέργεια ανά πληροφορία bit και R είναι ο ρυθμός πληροφορίας. Ο θόρυβος ισχύος εκφράζεται ως  $N = N_0 * B$ , όπου  $N_0$  είναι η σταθερά ισχύος θορύβου φασματικής πυκνότητας (W/Hz). Επομένως, ο παραπάνω τύπος εκφράζεται ως:

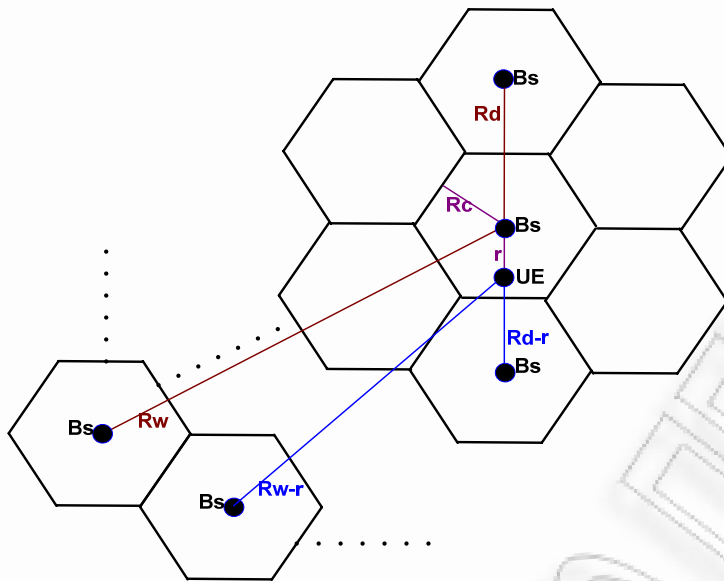
$$R \leq C = B \log_2 \left( \frac{S}{N} + 1 \right) = B \log_2 \left( \frac{E_b R}{N_0 B} + 1 \right) \quad (6.51)$$

Αντικαθιστώντας το  $\gamma = \frac{R}{B}$  στην ανισότητα, έχουμε:

$$\gamma \leq \log_2 \left( \gamma \frac{E_b}{N_0} + 1 \right) \quad (6.52)$$

Ένα χαμηλό όριο στην απαιτούμενη λαμβανόμενη ενέργεια ανά πληροφορία bit, κανονικοποιώντας την πυκνότητα της ισχύος του θορύβου, για ένα δοσμένο  $\gamma$ :

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \min \left\{ \frac{E_b}{N_0} \right\} = \frac{2^\gamma - 1}{\gamma} \quad (6.53)$$



Εικόνα 6.11 Τα κελιά του δικτύου και οι αποστάσεις των Bs και UE.

Τα κελιά του δικτύου είναι εξάγωνα, όπου η ακτίνα του κελιού είναι  $R_c$ . Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών eNodeBs είναι  $R_d$  και το εύρος του δικτύου είναι  $R_n$ .

Όταν ο δέκτης (χρήστη) βρεθεί σε ένα κελί, δέχεται από τον σταθμό βάσης (eNodeB) σήμα ( $S$ ) μαζί με θόρυβο και παρεμβολές και είναι το σύνολο της ισχύος ( $P$ ). Η ολική ισχύς είναι το άθροισμα της ισχύος που λαμβάνεται από το κελί που τον εξυπηρετεί ( $P_s$ ) και η ισχύς ( $P_o$ ) που προέρχεται από τα κελιά που βρίσκονται γύρω από τον χρήστη. Το  $S$  όπως αναφέραμε είναι μέρος του  $P$  και εξυπηρετεί τον χρήστη με την χρήση της τεχνολογίας του OFDMA, που σημαίνει ότι μηδενίζει τις παρεμβολές στο κελί του χρήστη λόγω της ορθογωνιότητας, επομένως ο τύπος της ισχύος είναι ο εξής:

$$P = P_s + P_o \quad (6.54)$$

Επομένως, το  $P_o$  είναι το σύνολο παρεμβολής που επηρεάζει τον χρήστη.

Ο συντελεστής παρεμβολής ( $Int$ ) για κάθε χρήστη είναι ο λόγος της συνολικής ισχύος που επηρεάζεται από τα γύρω κελιά προς την λαμβανόμενη ισχύ από το κελί εξυπηρέτησης.

$$Int = \frac{P_o}{P_s} = \frac{P_o}{S} \quad (6.55)$$

Επομένως, το  $(Int)^{-1}$  είναι το σήμα προς τον θόρυβο, δηλαδή το SIR, όπου το  $P_s$  και το  $P_o$  είναι συναρτήσεις ως προς την απόσταση.

$$(Int)^{-1} = \frac{S}{P_o} \quad (6.56)$$

Οι σταθμοί βάσεων και οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι στο δίκτυο [85]. Η ισχύς των σταθμών βάσεων είναι  $P_b$  και είναι η ίδια σε όλους τους eNodeBs. Επομένως, οι πυκνότητες των σταθμών βάσεων  $p_b$  και χρηστών  $p_u$  είναι σταθερές. Οι υπολογισμοί μας γίνονται σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα δικτύου. Η πυκνότητα των σταθμών βάσεων είναι:

$$p_b = \frac{1}{(2\sqrt{3}(\frac{R_d}{2})^2)} \quad (6.57)$$

Όταν ο χρήστης είναι σε απόσταση  $r$  από τον σταθμό βάσης που λαμβάνει το σήμα, τότε το όφελος ( $g$ ) κατά την μετάδοση του σήματος στον χρήστη εξαιτίας του μέσου διάδοσης, μας το δίνει η εξίσωση:

$$g = Kr^{-n} \quad (6.58)$$

Όπου,

$K$ : είναι μια σταθερά.

$n$ : είναι ο εκθέτης της απώλειας κατά τη μετάδοση (παράγοντας pathloss).

$$P_o = \int_0^{2\pi} \int_{R_d-r}^{R_n-r} p_b P_b K z^{-n} z dz d\theta \Rightarrow \quad (6.59)$$

$$P_o = \frac{2\pi p_b P_b K}{n-2} \left[ (R_d-r)^{-n+2} - (R_n-r)^{-n+2} \right] \quad (6.60)$$

Άρα, το SIR είναι:

$$SIR = (Int)^{-1} = \frac{S}{P_o} = \frac{P_b K r^{-n}}{P_o} \Rightarrow \quad (6.61)$$

$$SIR = \frac{r^{-n}(n-2)}{2\pi p_b \left[ (R_d-r)^{-n+2} - (R_n-r)^{-n+2} \right]} \quad (6.62)$$

Το SIR εξαρτάται από την απόσταση του χρήστη από τον σταθμό βάσης, δηλαδή το  $r$ , που σημαίνει ότι το SIR ορίζεται για κάθε περιοχή του δικτύου. Για ένα μεγάλο δίκτυο το  $R_n$  είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το  $R_c$ , οπότε το SIR εκφράζεται ως:

$$SIR = \frac{r^{-n}(n-2)}{2\pi p_b (R_d-r)^{-n+2}} \quad (6.63)$$

Ο ρυθμός bit είναι:

$$R[Mbps] = B[MHz] * \log\left(\frac{S}{N} + 1\right) \quad (6.64)$$

Ο θόρυβος  $N$  είναι:

$$N = kTB \quad (6.65)$$

Όπου,

$k = 1.380650 \cdot 10^{-23}$  J/K είναι η σταθερά του Boltzmann.

$T$ : είναι η θερμοκρασία Kelvin.

$B$ : είναι το εύρος ζώνης.

Επομένως, η ενέργεια ανά πληροφορία bit ( $E_b$ ) είναι:

$$Eb = \frac{(SIR * N)}{R} \quad (6.66)$$

Εξοικονόμηση ενέργειας στους eNBs

Η εξοικονόμηση ενέργειας στους eNBs από το κεφάλαιο 5.2 είναι :

$$\frac{N_{tol} * (24 - T_d) + N_n * T_d * 0.11 + N_m * (1 + CI)}{N_{tol} * 24} \quad (5.14)$$

$N_{tol}$  : ο συνολικός αριθμός των eNBs στην περιοχή του hotspot.

$T_d$  : η χρονική διάρκεια της αδρανοποίησης.

$N_n$  : ο αριθμός των αδρανοποιημένων eNBs.

$N_m$  : ο αριθμός των κύριων eNBs.

$CI$  : η CPICH δύναμη προσαύξησης.

Πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για  $ACK \geq A$  και εξαρτάται από τα BER,  $f(z)$ , RTT και  $P(\rho|R1, R2, \dots, RB, M)$ 

Η πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $k$ , όπου  $ACK \geq A$  είναι:

$$p(k) = P(ACK \geq A) = 1 - \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A t)^k e^{-\lambda A t}}{k!} \quad (6.67)$$

όπου

A: είναι το threshold.

$t = BER * f(z) * RTT * P(\rho|R1, R2, \dots, RB, M)$ .

Πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για  $ACK < A$ 

Η πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $k$ , όπου  $ACK < A$ , δηλαδή όταν δεν ισχύει το  $ACK \geq A$ , άρα έχουμε αλλαγή από ARQ σε HARQ επομένως:

$$P(ACK < A) = 1 - \left(1 - \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A)^k e^{-\lambda A}}{k!}\right) = \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A)^k e^{-\lambda A}}{k!} \quad (6.68)$$

όπου

A: είναι το threshold

Πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για  $ACK < A$  και εξαρτάται από τα BER,  $f(z)$ , RTT και  $P(\rho|R1, R2, \dots, RB, M)$ 

Η πιθανότητα επιτυχίας στο ARQ για μια τυχαία μεταβλητή  $k$ , όπου  $ACK < A$ , δηλαδή όταν δεν ισχύει το  $ACK \geq A$ , άρα έχουμε αλλαγή από ARQ σε HARQ επομένως:

$$P(ACK < A) = 1 - \left(1 - \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A t)^k e^{-\lambda A t}}{k!}\right) = \sum_{k=0}^A \frac{(\lambda A t)^k e^{-\lambda A t}}{k!} \quad (6.68)$$

όπου

A: είναι το threshold

$t = BER * f(z) * RTT * P(\rho|R1, R2, \dots, RB, M)$ .

Συνολική κατανάλωση ενέργειας

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας γίνεται:

$$E = E_{\sigma\tau} + E_{\delta} \Rightarrow$$

$$E = E_{\sigma\tau} + E1 + E2 + E3 + E_{\delta1} \quad (6.69)$$

όπου,

$$E1 = P(1 \leq X \leq 3) * 8P_1 E_b \quad (6.70)$$

$$E2 = P(X > 3) * 8P_3 E_b \quad (6.71)$$

$$E3 = P(ACK < A) * 8P_2 E_b \quad (6.72)$$

$$E_{\delta1} = G_0(1)P_{ενεργο\tau} \frac{L(1)}{\lambda} E_b \quad (6.73)$$

Συγκεκριμένα,

E1: είναι η ενέργεια του FEC ( $P(1 \leq X \leq 3)$ ) του HARQ.

P1: είναι η ισχύς του FEC ( $P(1 \leq X \leq 3)$ ) του HARQ.

E2: είναι η ενέργεια του  $P(X > 3)$ .

P2: είναι η ισχύς του  $P(X > 3)$ .

E3: είναι η ενέργεια του  $P(ACK > A)$ .

P3: είναι η ισχύς του  $P(ACK > A)$ .

Eδ: είναι η ενέργεια του  $P(ACK \leq A)$ .

Ρενεργοτ: είναι η μέση κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια λήψης δεδομένων  $P(ACK \leq A)$  (όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση).

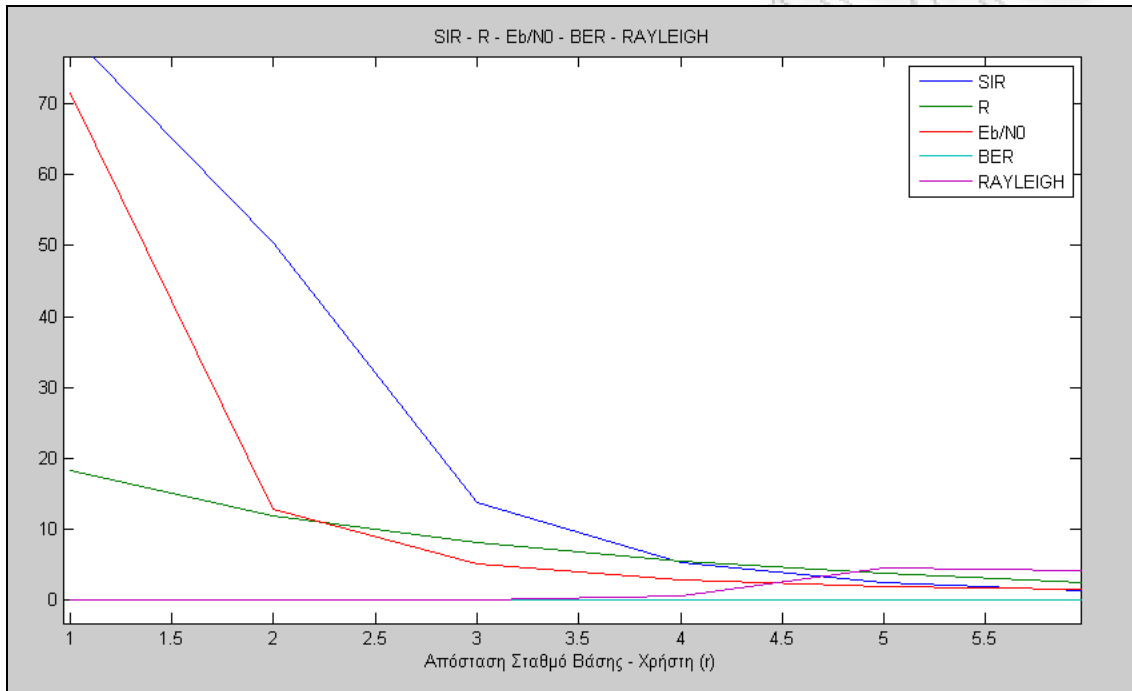
Άρα, η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$E = \sum_{j=1}^N P_{on_j} T_{on_j} + \sum_{k=1}^N P_{on_k} T_{on_k} + \quad (6.74)$$

$$+ \left( P(1 \leq X \leq 3) * 8P_1 + P(ACK < A) * 8P_2 + P(X > 3) * 8P_3 + G_0(1)P_{ενεργο\tau} \frac{L(1)}{\lambda} \right) E_b \quad (6.75)$$

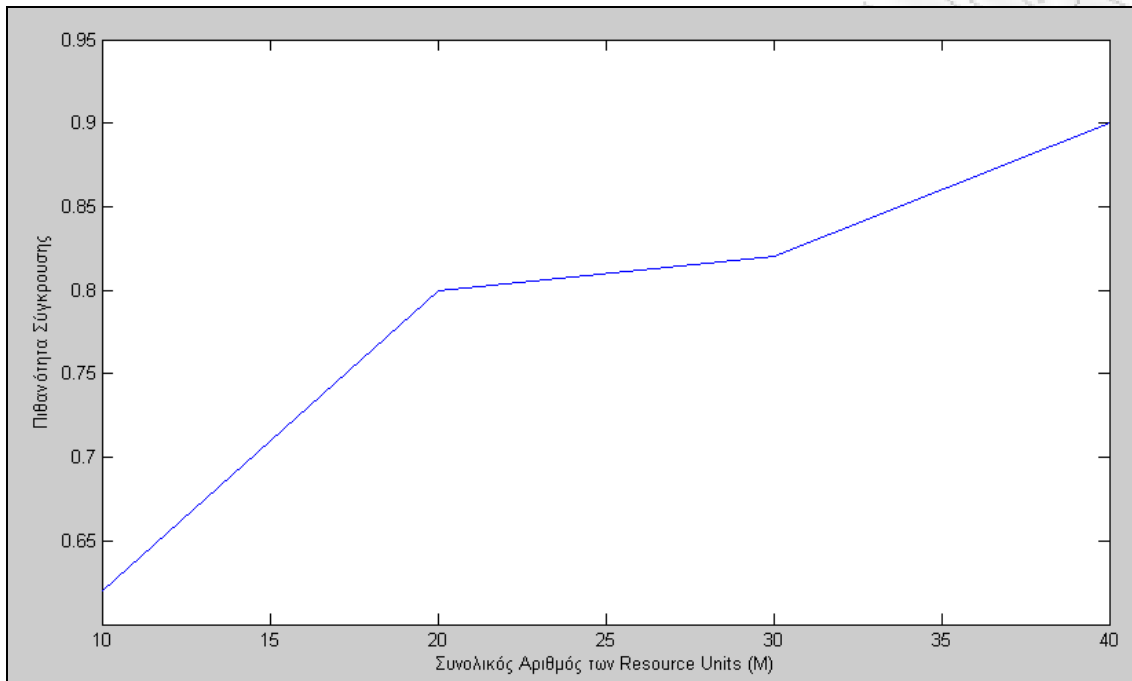
## Κεφάλαιο 7 – Αξιολόγηση Επίδοσης Προτεινόμενου Μοντέλου

Στην εικόνα 7.1 απεικονίζονται τα SIR (σηματοθόρυβος), R (ρυθμός bit),  $E_b/N_0$  (ενέργεια ανά πληροφορία bit προς τον θερμικό θόρυβο), BER (Αριθμός των σφαλμάτων bit) και Rayleigh (εξασθένιση σήματος) όταν ο χρήστης έχει απόσταση  $r$  από τον σταθμό βάσης. Παρατηρούμε στην εικόνα 7.1 ότι όσο αυξάνεται απόσταση  $r$  μειώνονται και τα SIR, R και  $E_b/N_0$  Ενώ το BER παραμένει περίπου σταθερό και το Rayleigh από την τιμή  $r = 4$  αυξάνεται.



Εικόνα 7.1 Απεικονίζονται τα SIR, R,  $E_b/N_0$ , BER και Rayleigh όταν ο χρήστης έχει απόσταση  $r$  από τον σταθμό βάσης.

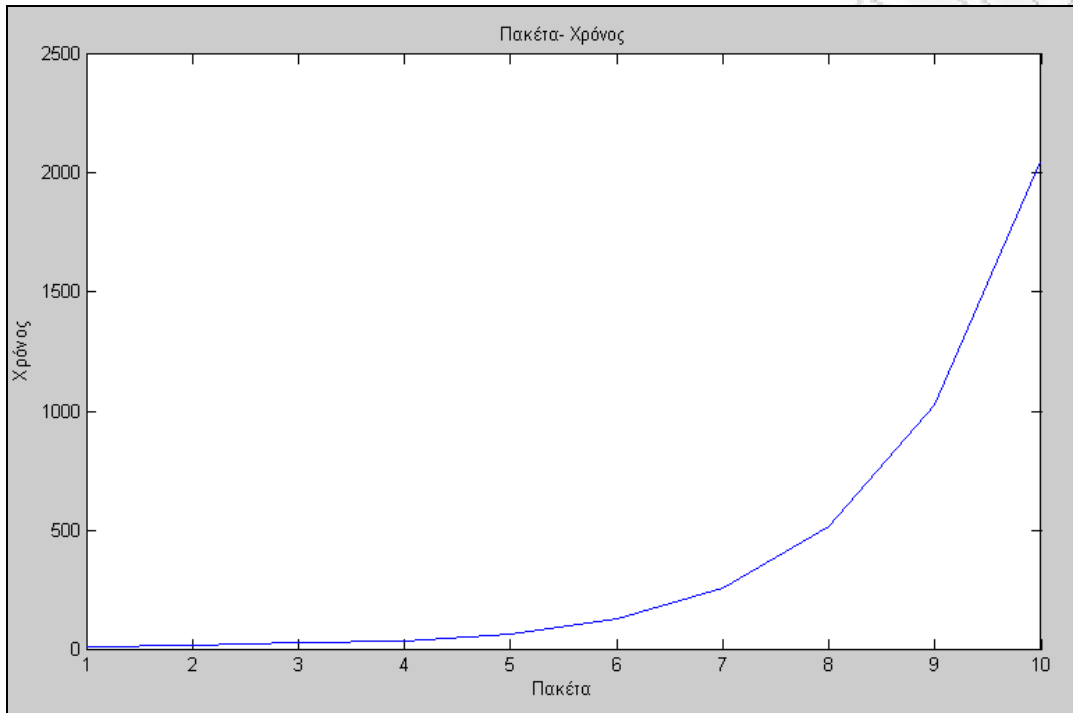
Στην εικόνα 7.2 απεικονίζεται η πιθανότητα σύγκρουσης όταν ο συνολικός αριθμός των resource units είναι  $M$ . Ο αριθμός των σταθμών βάσεων είναι 2 και ο αριθμός των resource units είναι 2. Παρατηρούμε στην εικόνα 7.2 ότι όσο αυξάνεται το  $M$  αυξάνεται και η πιθανότητα σύγκρουσης.



**Εικόνα 7.2** Απεικονίζεται η πιθανότητα σύγκρουσης όταν ο συνολικός αριθμός των resource units είναι  $M$ .



Στην εικόνα 7.3 απεικονίζονται τα πακέτα σε σχέση με το RTT (μετ'επιστροφή καθυστέρηση) όπου ένα πακέτο αντιστοιχεί σε 8 msec. Παρατηρούμε στην εικόνα 7.3 ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος αυξάνονται τα πακέτα.

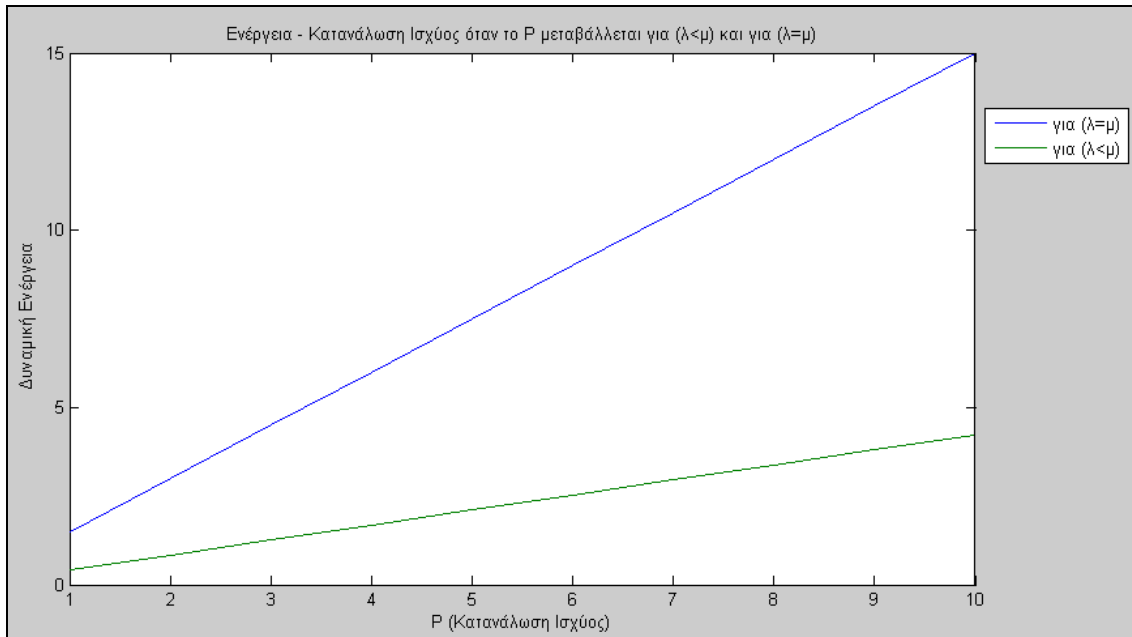


Εικόνα 7.3 Αριθμός πακέτων σε σχέση με τον χρόνο του downlink.

Στον πίνακα 7.4 και στην εικόνα 7.4 απεικονίζεται η δυναμική ενέργεια σε σχέση με την μέση κατανάλωση ενέργειας όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Από την εικόνα 7.4 φαίνεται η γραμμική αύξηση της δυναμικής ενέργειας. Όταν η κατανάλωση ισχύος μεταβάλλεται για  $\lambda=\mu$  και για  $\lambda<\mu$ .

P	Δυναμική ενέργεια για ( $\lambda=\mu$ )	Δυναμική ενέργεια για ( $\lambda<\mu$ )
1	1,5	0,4224
2	3	0,844799
3	4,5	1,267199
4	6	1,689599
5	7,5	2,111999
6	9	2,534398
7	10,5	2,956798
8	12	3,379198
9	13,5	3,801598
10	15	4,223997

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το P μεταβάλλεται για  $\lambda<\mu$  και  $\lambda=\mu$ .

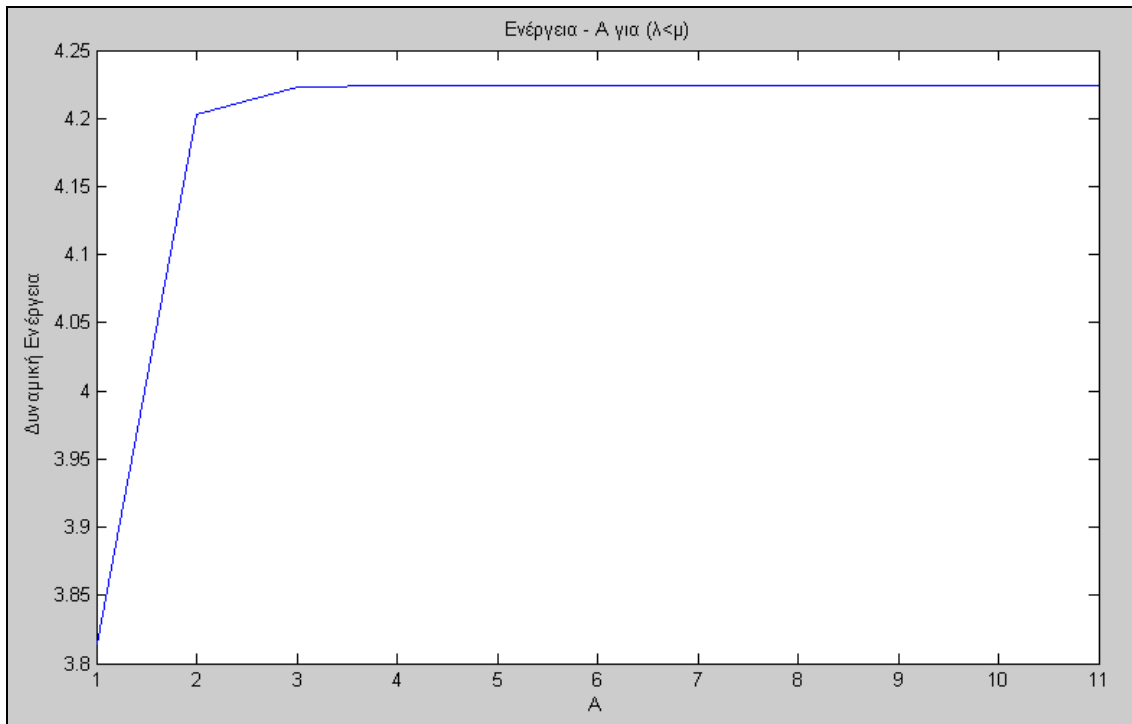


Εικόνα 7.4 Απεικόνιση της δυναμικής ενέργειας όταν το P μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$  και  $\lambda = \mu$ .

Στον πίνακα 7.5 και στην εικόνα 7.5 απεικονίζεται η δυναμική ενέργεια σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή. Από τον πίνακα 7.5 και την εικόνα 7.5 συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια παίρνει την ίδια τιμή όταν το A γίνει μεγαλύτερο ή ίσο του 5. Επομένως, για  $\lambda < \mu$  η βέλτιστη λύση threshold είναι το  $A=5$ .

A	Δυναμική Ενέργεια
1	3,813869
2	4,203085
3	4,222957
4	4,223948
5	4,223997
6	4,224
7	4,224
8	4,224
9	4,224
10	4,224

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .

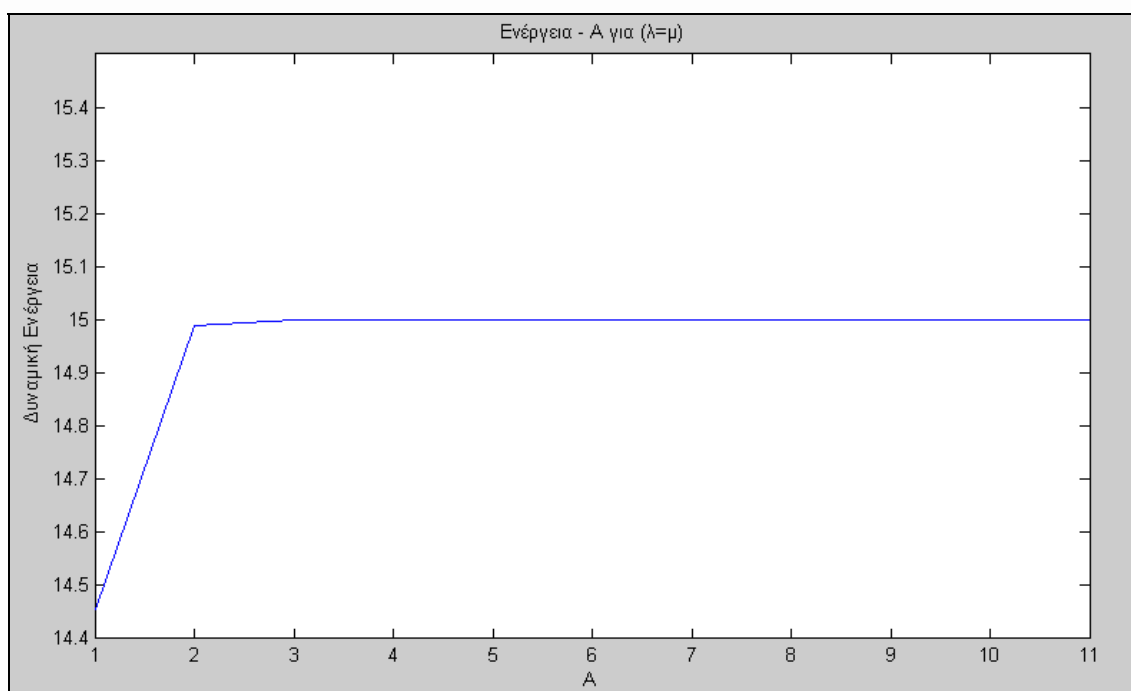


Εικόνα 7.5 Απεικόνιση της δυναμικής ενέργειας όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .

Στον πίνακα 7.6 και στην εικόνα 7.6 απεικονίζεται η δυναμική ενέργεια σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται και για  $\lambda = \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή. Από τον πίνακα 7.3 και την εικόνα 7.3 συμπεραίνουμε ότι η ενέργεια παίρνει την ίδια τιμή όταν το A γίνει μεγαλύτερο ή ίσο του 5. Επομένως, για  $\lambda = \mu$  η βέλτιστη λύση threshold είναι το  $A=5$ .

A	Δυναμική Ενέργεια
1	14,45556
2	14,98994
3	14,99982
4	15
5	15
6	15
7	15
8	15
9	15
10	15

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda = \mu$ .

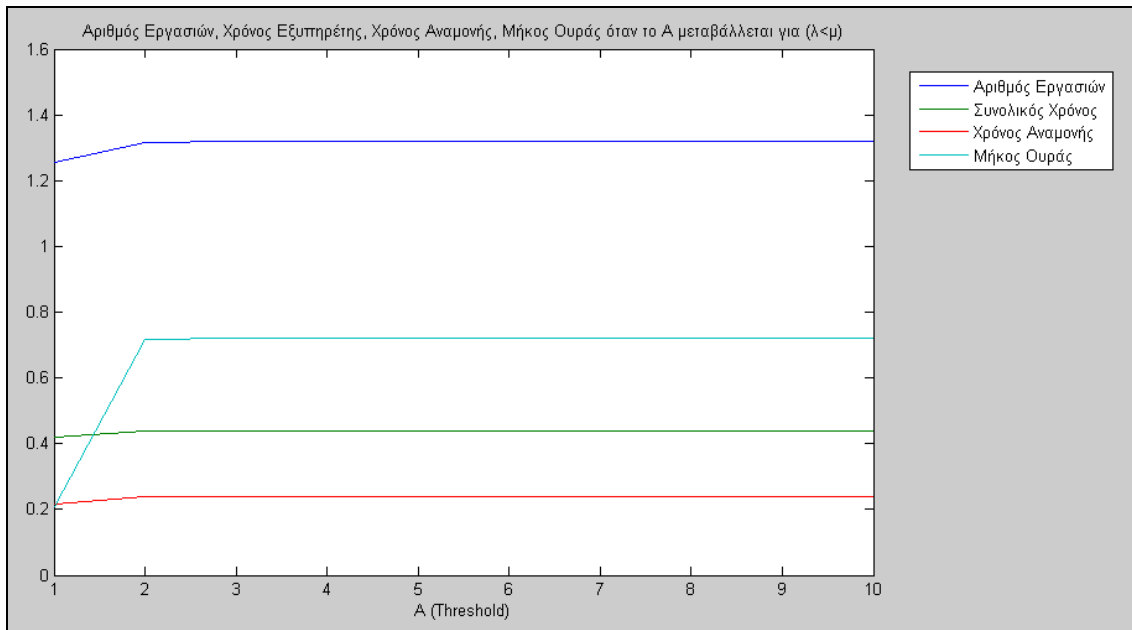


Εικόνα 7.6 Απεικόνιση της δυναμικής ενέργειας όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda=\mu$ .

Στον πίνακα 7.7 και στην εικόνα 7.7 απεικονίζεται ο Αριθμός Εργασιών (L1), ο Συνολικός Χρόνος (T), ο Χρόνος Αναμονής (W) και το Μήκος της ουράς (Q) σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή.

A	L1	T	W	Q
1	1,2542	0,4180	0,2180	0,2101
2	1,31672	0,4389	0,2389	0,7167
3	1,31983	0,43994	0,23994	0,71983
4	1,319991	0,43999	0,23999	0,7199
5	1,3199	0,4399	0,2399	0,71999
6	1,3199	0,4399	0,2399	0,71999
7	1,3199	0,44	0,24	0,71999
8	1,32	0,44	0,24	0,72
9	1,32	0,44	0,24	0,72
10	1,32	0,44	0,24	0,72

Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα του L1, του T, του W και του Q όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .

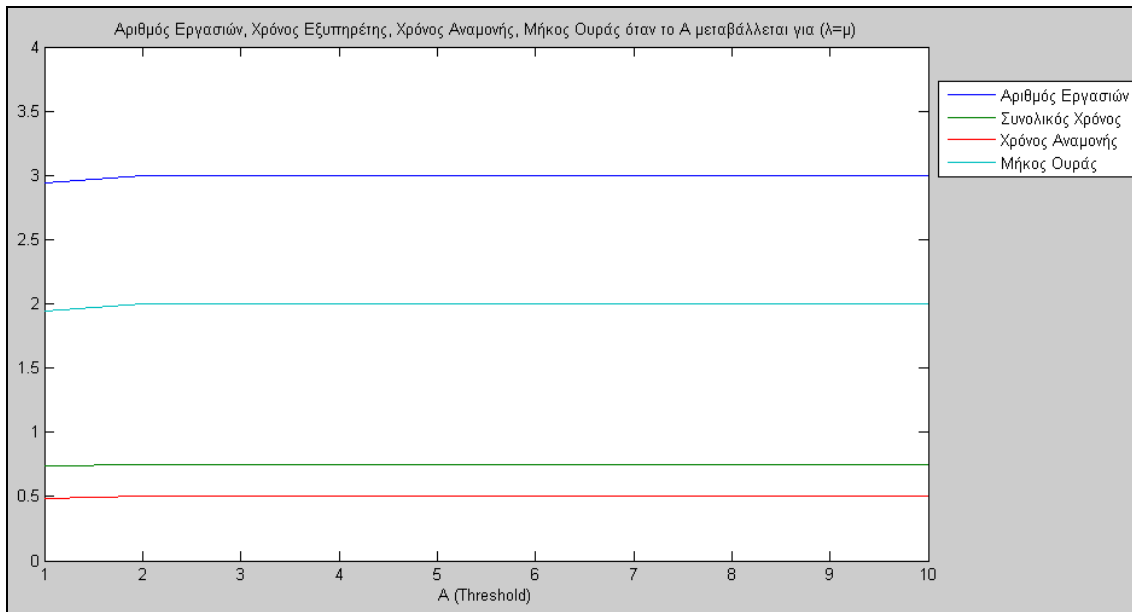


Εικόνα 7.7 Απεικόνιση του L1, του T, του W και του Q όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .

Στον πίνακα 7.8 και στην εικόνα 7.8 απεικονίζεται ο Αριθμός Εργασιών (L1), ο Συνολικός Χρόνος (T), ο Χρόνος Αναμονής (W) και το Μήκος της ουράς (Q) σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται για  $\lambda = \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή.

A	L1	T	W	Q
1	2,945053	0,736263	0,486263	1,94505
2	2,998994	0,749748	0,499748	1,99899
3	2,999982	0,749995	0,499995	1,99998
4	2,999999	0,749999	0,499999	1,9999996
5	3	0,75	0,5	1,99999
6	3	0,75	0,5	2
7	3	0,75	0,5	2
8	3	0,75	0,5	2
9	3	0,75	0,5	2
10	3	0,75	0,5	2

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα του L1, του T, του W και του Q όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda = \mu$ .

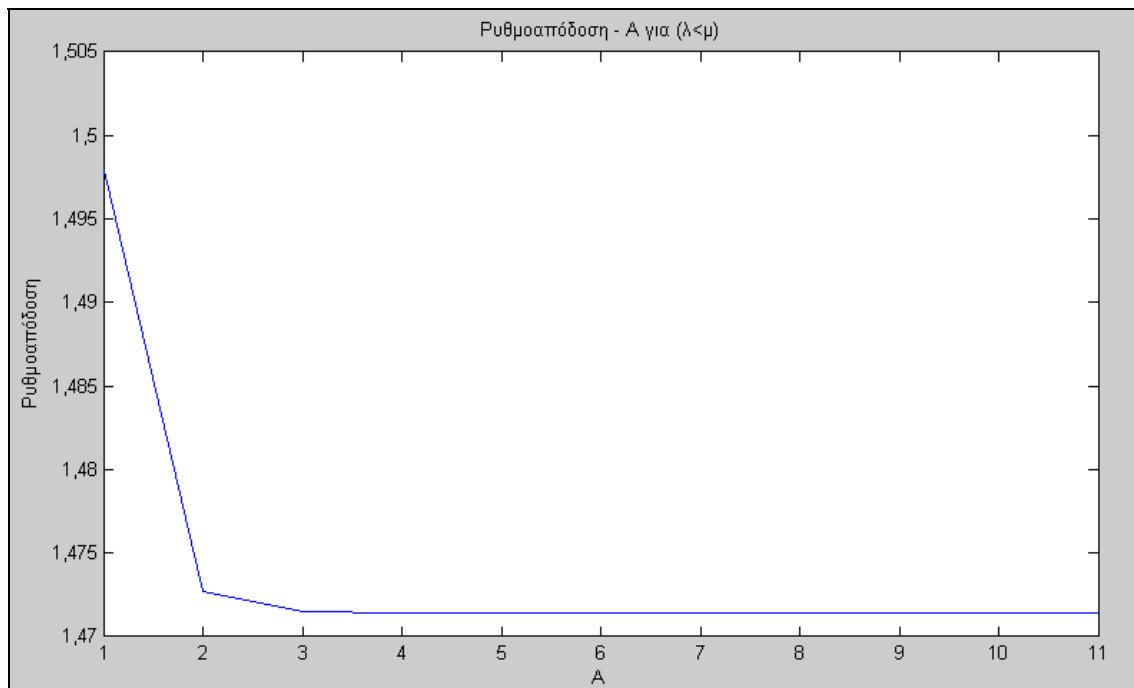


Εικόνα 7.8 Απεικόνιση του L1, του T και του W όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda=\mu$ .

Στον πίνακα 7.9 και στην εικόνα 7.9 απεικονίζεται η ρυθμοαπόδοση σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται και όταν το  $\lambda < \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή.

A	Ρυθμοαπόδοση
1	1,49796
2	1,472684
3	1,471507
4	1,471449
5	1,471446
6	1,471446
7	1,471446
8	1,471446
9	1,471446
10	1,471446

Πίνακας 7.9 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .



Εικόνα 7.9 Απεικόνιση της ρυθμοαπόδοσης όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda < \mu$ .

Επομένως από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι το threshold  $A=5$  είναι το όριο των επιτυχημένων μεταδόσεων για την καλύτερη απόδοση της ενέργειας.

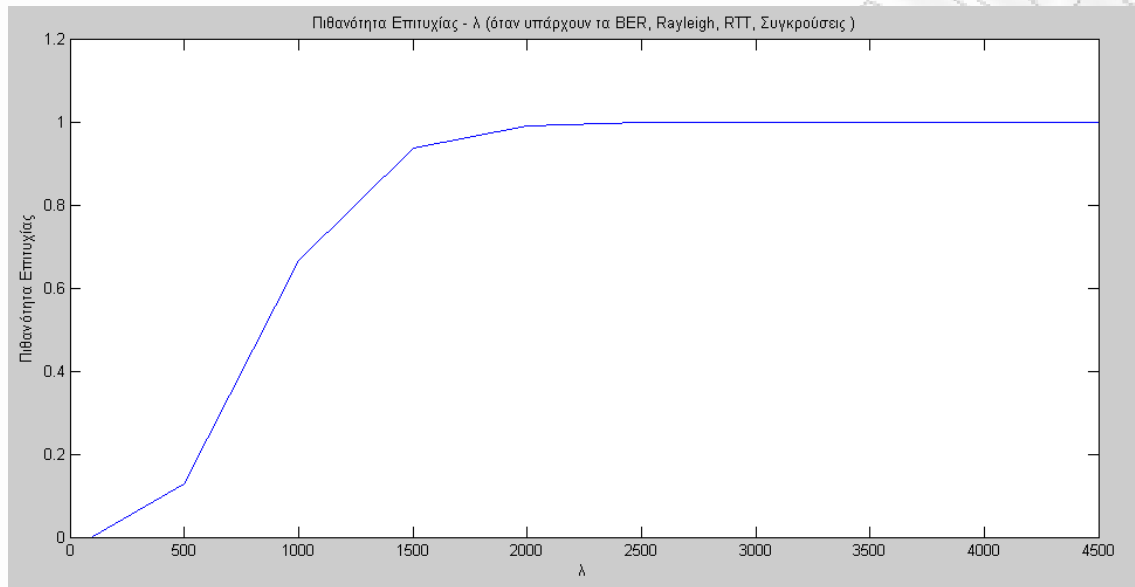
Στον πίνακα 7.10 και στην εικόνα 7.10 απεικονίζεται το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold  $A=5$  και μεταβάλλεται το  $\lambda$  υπολογίζουμε την πιθανότητα επιτυχημένων συνεχών και διαδοχικών μεταδόσεων για ACK μεγαλύτερο ή ίσο του  $A=5$  και εξαρτάται από τα BER,  $f(z)$ , RTT,  $P(\rho|R_1, R_2, \dots, R_B, M)$ , στην παρακάτω εξίσωση (7.1) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 7.10 και στη εικόνα 7.10.

$$p(k) = 1 - \sum_{k=0}^5 \frac{(\lambda 5t)^k e^{-\lambda 5t}}{k!} \quad (7.1)$$

$t = \text{BER} * f(z) * \text{RTT} * P(\rho|R_1, R_2, \dots, R_B, M)$ .

Πιθανότητα Επιτυχίας	$\lambda$
0,000074883	100
0,1273	500
0,6684	1000
0,9383	1500
0,9924	2000
0,99993	2500
0,9999	3000
1	3500

1	4000
1	5000

Πίνακας 7.10 Αποτελέσματα της πιθανότητας επιτυχίας όταν το  $\lambda$  μεταβάλλεται.Εικόνα 7.10 Απεικόνιση της πιθανότητας επιτυχίας όταν το  $\lambda$  μεταβάλλεται.

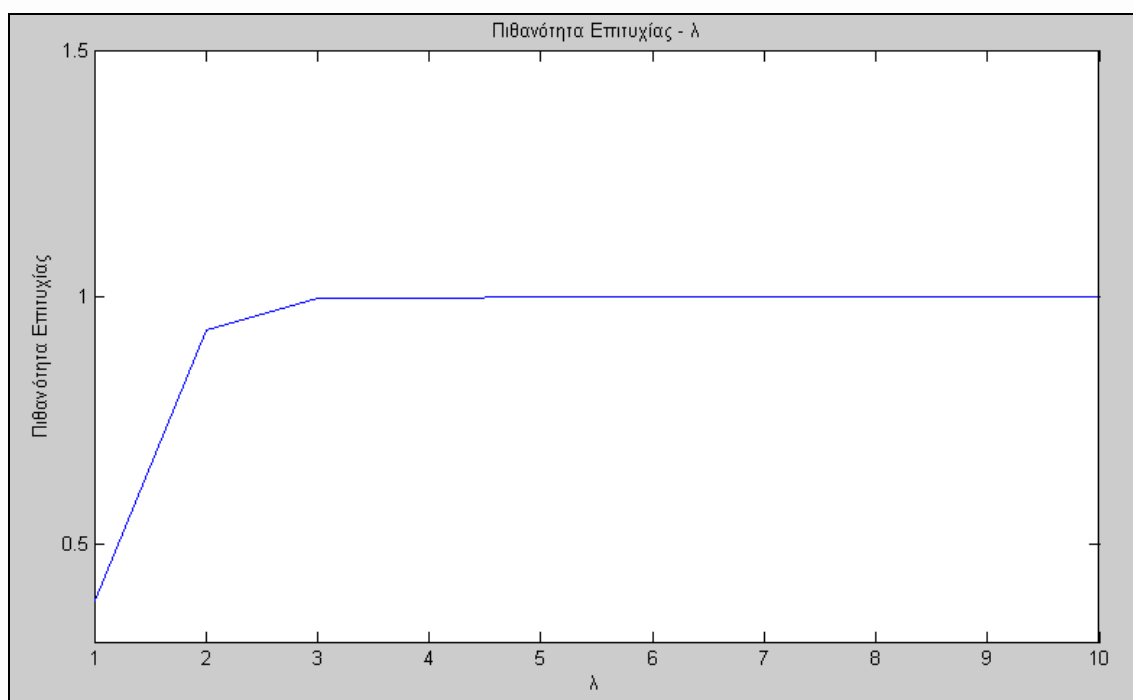
Στον πίνακα 7.11 και στην εικόνα 7.11 απεικονίζεται το threshold  $A$  όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold  $A=5$  και μεταβάλλεται το  $\lambda$  υπολογίζουμε την πιθανότητα επιτυχημένων συνεχών και διαδοχικών μεταδόσεων για ACK μεγαλύτερο ή ίσο του  $A=5$  και δεν εξαρτάται από τα BER,  $f(z)$ , RTT,  $P(p|R_1, R_2, \dots, R_B, M)$ , στην παρακάτω εξίσωση (7.2) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 7.10 και στη εικόνα 7.11.

$$p(k) = 1 - \sum_{k=0}^5 \frac{(\lambda 5)^k e^{-\lambda 5}}{k!} \quad (7.2)$$

Πιθανότητα Επιτυχίας	$\lambda$
0,384	1
0,9329	2
0,9972	3
0,9999	4
1	5
1	6
1	7
1	8
1	9
1	10

Πίνακας 7.11 Αποτελέσματα της πιθανότητας επιτυχίας όταν το  $\lambda$  μεταβάλλεται.



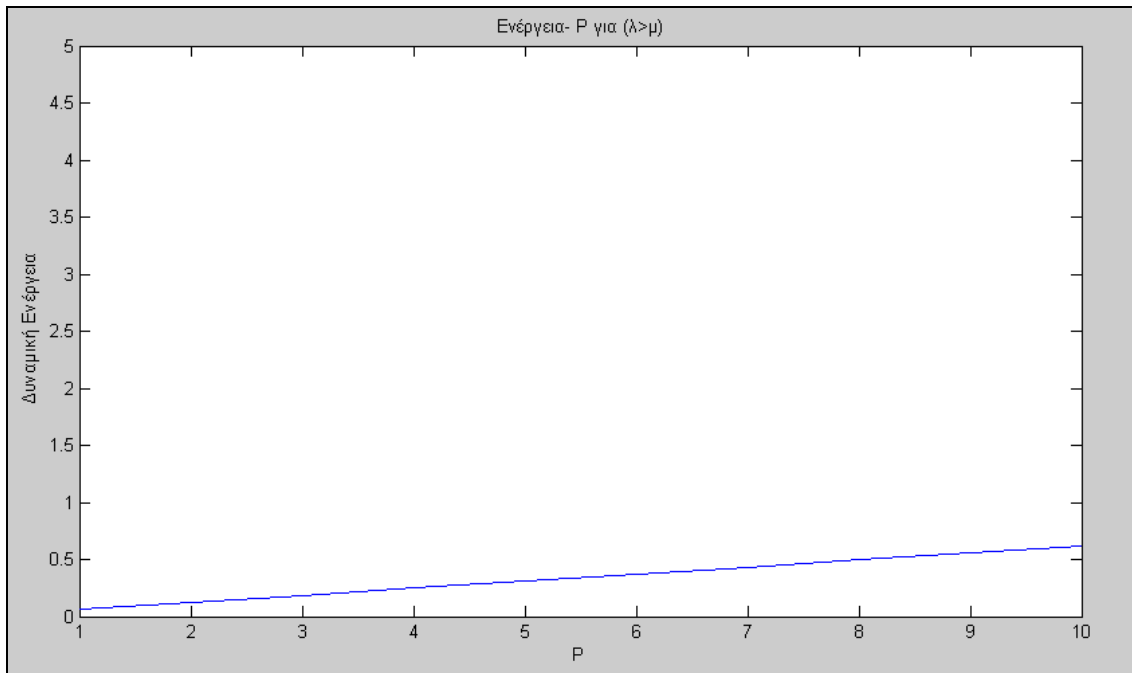


Εικόνα 7.11 Απεικόνιση της πιθανότητας επιτυχίας όταν το  $\lambda$  μεταβάλλεται.

Στον πίνακα 7.12 και στην εικόνα 7.12 απεικονίζεται η δυναμική ενέργεια σε σχέση με την μέση κατανάλωση ενέργειας όταν το *modem* είναι στην ενεργή κατάσταση. Από την εικόνα 7.12 φαίνεται η γραμμική αύξηση της δυναμικής ενέργειας. Όταν η κατανάλωση ισχύος μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

P	Δυναμική ενέργεια για ( $\lambda > \mu$ )
1	0,061941752
2	0,123883504
3	0,185825257
4	0,247767009
5	0,309708761
6	0,371650513
7	0,433592265
8	0,495534017
9	0,55747577
10	0,619417522

Πίνακας 7.12 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το P μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

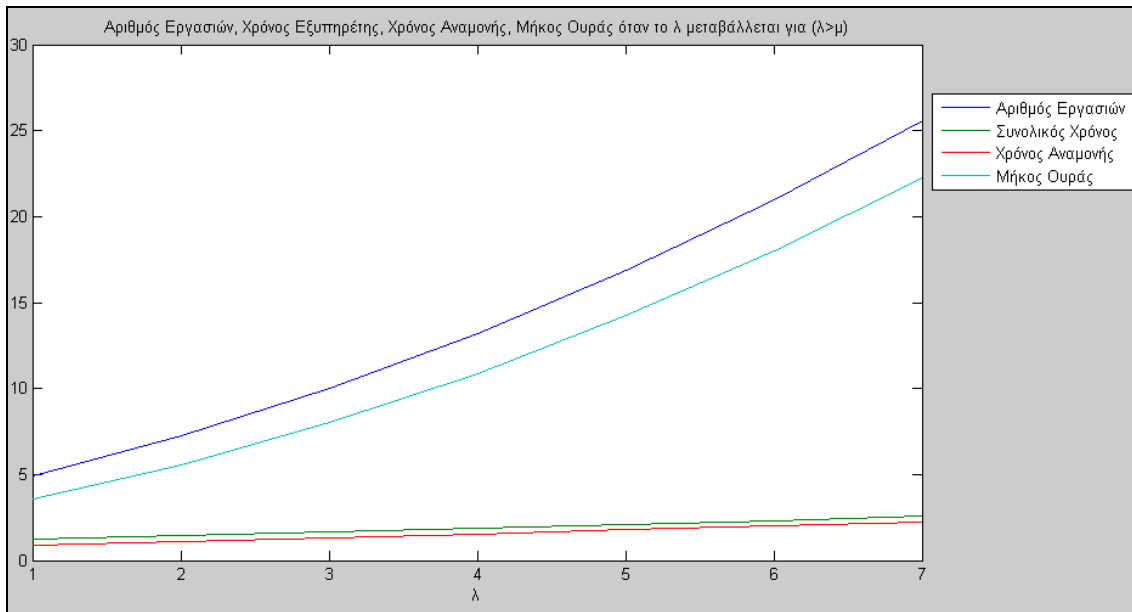


Εικόνα 7.12 Απεικόνιση της δυναμικής ενέργειας όταν το P μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

Στον πίνακα 7.13 και στην εικόνα 7.13 απεικονίζεται ο Αριθμός Εργασιών (L1), ο Συνολικός Χρόνος (T), ο Χρόνος Αναμονής (W) και το Μήκος της ουράς (Q) σε σχέση με το threshold A όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold A μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή.

$\lambda$	L1	T	W	Q
4	4,8888	1,2222	0,8888	3,5555
5	7,2222	1,4444	1,1111	5,5555
6	10	1,6666	1,3333	8
7	13,2222	1,8888	1,5555	10,8888
8	16,8888	2,1111	1,7777	14,2222
9	21	2,3333	2	18
10	25,5555	2,5555	2,2222	22,2222

Πίνακας 7.13 Αποτελέσματα του L1, του T και του W όταν το A μεταβάλλεται για  $\lambda = \mu$ .

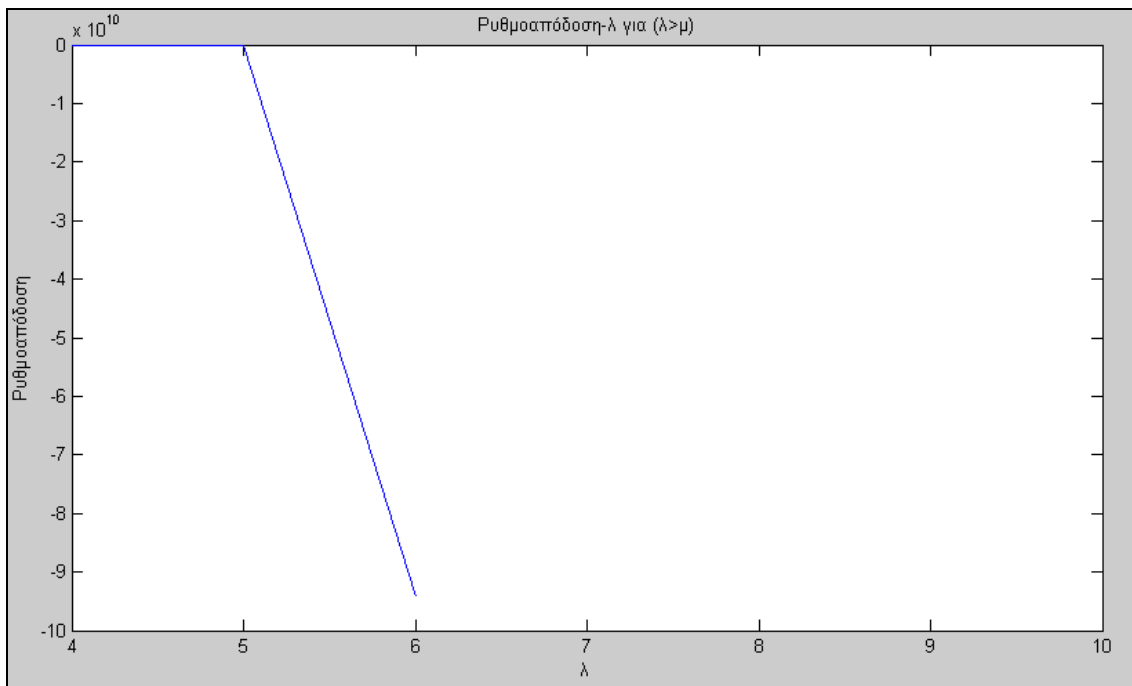


Εικόνα 7.13 Απεικόνιση του  $L_1$ , του  $T$  και του  $W$  όταν το  $A$  μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

Στον πίνακα 7.14 και στην εικόνα 7.14 απεικονίζεται η ρυθμοαπόδοση σε σχέση με το threshold  $A$  όταν το modem είναι στην ενεργή κατάσταση. Όταν το threshold  $A$  μεταβάλλεται και όταν το  $\lambda > \mu$  όπου η κατανάλωση ισχύος παραμένει σταθερή.

A	Ρυθμοαπόδοση
4	-12,32569168
5	-195,0833609
6	-6138
7	-513526,6041
8	-125091715,6
9	-94143178818

Πίνακας 7.14 Αποτελέσματα της δυναμικής ενέργειας όταν το  $A$  μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

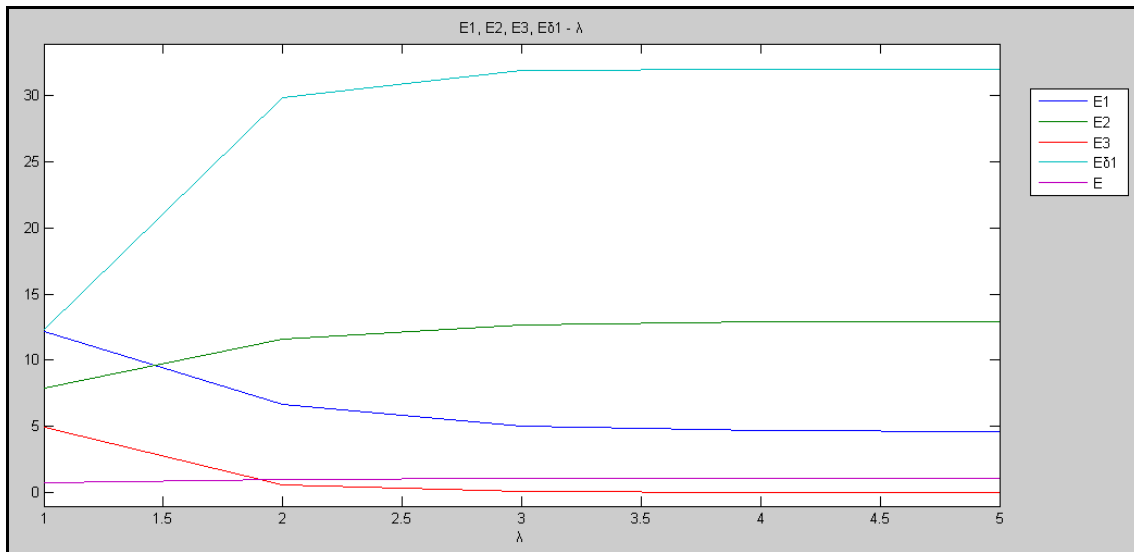


Εικόνα 7.14 Απεικόνιση της ρυθμοαπόδοσης όταν το  $A$  μεταβάλλεται για  $\lambda > \mu$ .

Στον πίνακα 7.15 και στην εικόνα 7.15 απεικονίζονται η ενέργεια του FEC του HARQ (E1) όταν  $P(1 \leq X \leq 3)$ , η ενέργεια (E2) όταν  $P(X > 3)$ , η ενέργεια (E3) όταν  $P(ACK > A)$  και η ενέργεια όταν  $P(ACK \leq A)$  και το σύνολο της δυναμικής ενέργειας (E) όταν μεταβάλλεται το  $\lambda$ . Παρατηρούμε ότι το E1 μειώνεται, το E2 αυξάνεται λίγο, το E3 μειώνεται και τα Eδ1, E αυξάνονται. Η αύξηση των E και E1 συμβαίνει διότι δεν έχουμε λάβει υπόψη της σύγκρουσης, του Rayleigh, του BER.

E1	E2	E3	Eδ1	E
12	7,8659	4,93E+00	12,2893	6,76E-19
6,6332	11,5779	0,5368	29,8532	9,86E-19
5,0168	12,6555	0,0224	31,9106	1,02E-18
4,6647	12,8902	5,75E-04	31,9977	1,02E-18
5	12,932	1,12E-05	32	1,01E-18

Πίνακας 7.15 Αποτελέσματα ενέργειας όταν το  $\lambda$  μεταβάλλεται.

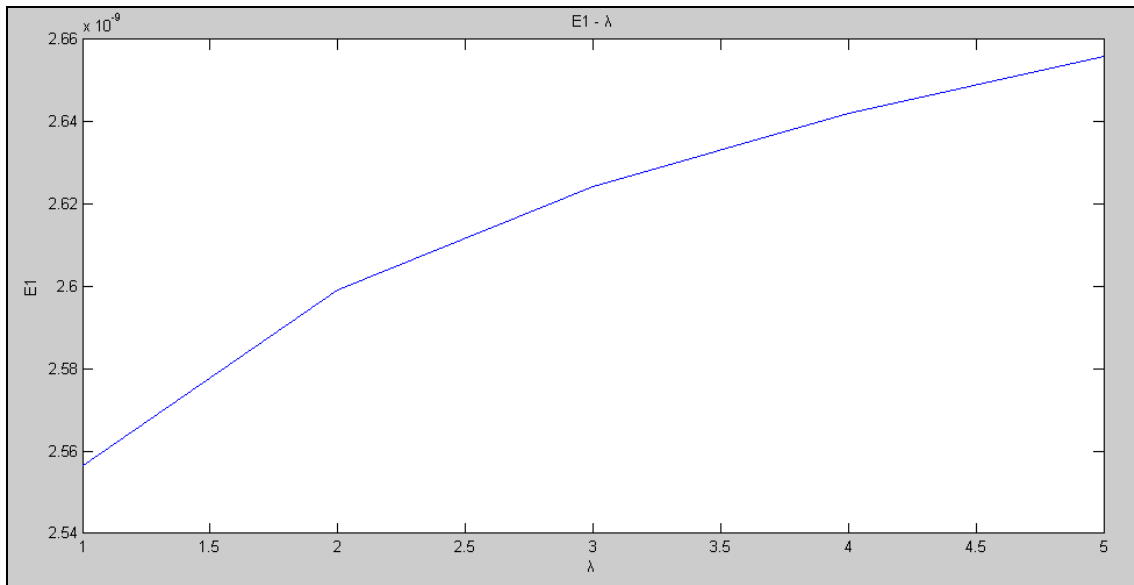


Εικόνα 7.15 Απεικόνιση ενέργειας όταν το λ μεταβάλλεται.

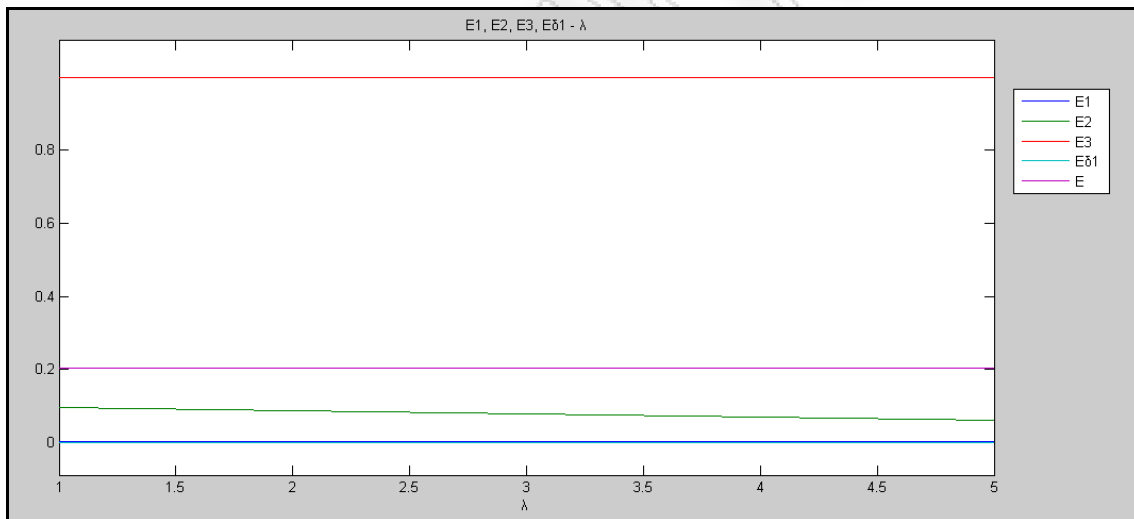
Στον πίνακα 7.16, στην εικόνα 7.16.1 απεικονίζεται η ενέργεια του FEC του HARQ (E1) όταν  $P(1 \leq X \leq 3)$  και στην εικόνα 7.16.2 απεικονίζονται η ενέργεια του FEC του HARQ (E1) όταν  $P(1 \leq X \leq 3)$ , η ενέργεια (E2) όταν  $P(X > 3)$ , η ενέργεια (E3) όταν  $P(ACK > A)$  και η ενέργεια όταν  $P(ACK \leq A)$  και το σύνολο της δυναμικής ενέργειας (E) όταν μεταβάλλεται το λ. Το E1 αυξάνεται, το E2 μειώνεται, το E3 αυξάνεται το Eδ1 μειώνεται και το E είναι σταθερό. Έχουμε λάβει υπόψη την παραμέτρο της σύγκρουσης, του Rayleigh, του BER και του RTT.

E1	E2	E3	Eδ1	E
2,56E-09	9,60E-08	7,99992	3,55E-11	2,05E-16
2,60E-09	8,70E-08	8	0	2,05E-16
2,62E-09	7,78E-08	8	0	2,05E-16
2,64E-09	6,90E-08	8	0	2,05E-16
2,66E-09	6,07E-08	8	0	2,05E-16

Πίνακας 7.16 Αποτελέσματα ενέργειας όταν το λ μεταβάλλεται



Εικόνα 7.16.1 Απεικόνιση της ενέργειας του FEC του HARQ (E1).



Εικόνα 7.15.2 Απεικόνιση της ενέργειας όταν το λ μεταβάλλεται.

Στην εικόνα 7.17 και στον πίνακα 7.17.2 απεικονίζονται η ενέργεια ανά bit πληροφορία (Eb) και η δυναμική ενέργεια (Eδ) όταν μεταβάλλεται ο σηματοθόρυβος (SIR). Στον πίνακα 7.17.1 απεικονίζονται τα δεδομένα.

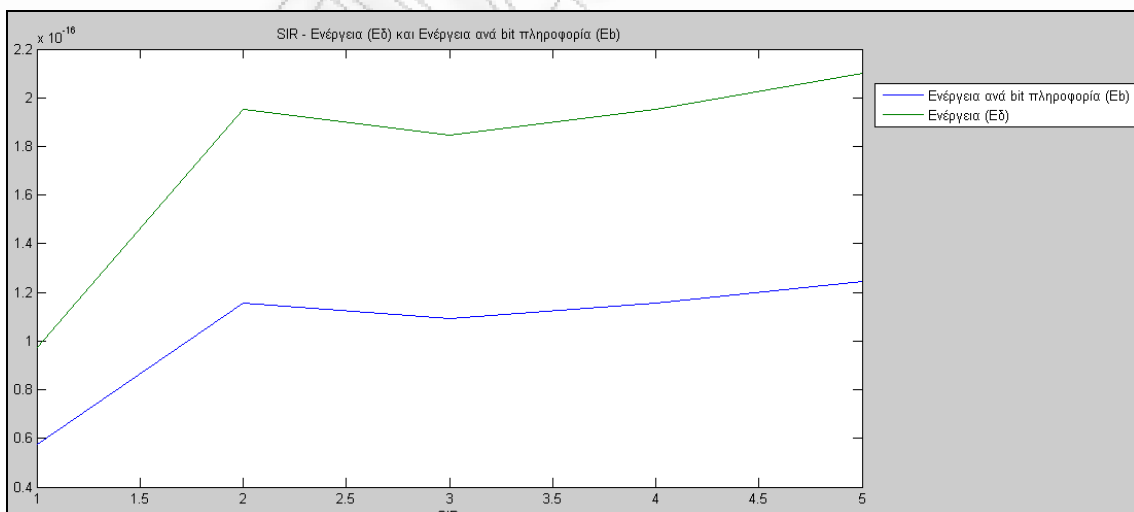
Εύρος ζώνης (B)	$3 \cdot 10^6$ MHz
Σταθερά του Boltzmann (k)	$1.380650 \cdot 10^{-23}$ J/K
Θερμοκρασία Kelvin (T)	290 K
Ρυθμός Μετάδοσης (R)	$R [Mbps] = B [MHz] \cdot \log\left(\frac{S}{N} + 1\right)$

Εξασθένηση σήματος (Rayleigh)	$f(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-z^2/2\sigma^2}$
Αριθμός των σφαλμάτων bit (BER)	$BER = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{Eb/N_0/\sqrt{2}}^{\infty} e^{-t^2} dt$
Σύγκρουση ( $P(p   R_1, R_2, \dots, R_B, M)$ )	0.62
RTT	8 msec
Threshold (A)	5
Eb	(SIR*N)/R
Eδ	G1*P*T*Eb

Πίνακας 7.17.1 Απεικόνιση της Ενέργειας και της Ενέργειας ανά bit πληροφορία σε σχέση με το SIR.

SIR	Ενέργεια bit ανά πληροφορία	Δυναμική Ενέργεια (Eδ)
1	5,78E-21	9,76E-21
2	1,16E-20	1,95E-20
3	1,09E-20	1,85E-20
4	1,16E-20	1,95E-20
5	1,24E-20	2,10E-20

Πίνακας 7.17.2 Απεικόνιση της Ενέργειας και της Ενέργειας ανά bit πληροφορία σε σχέση με το SIR.

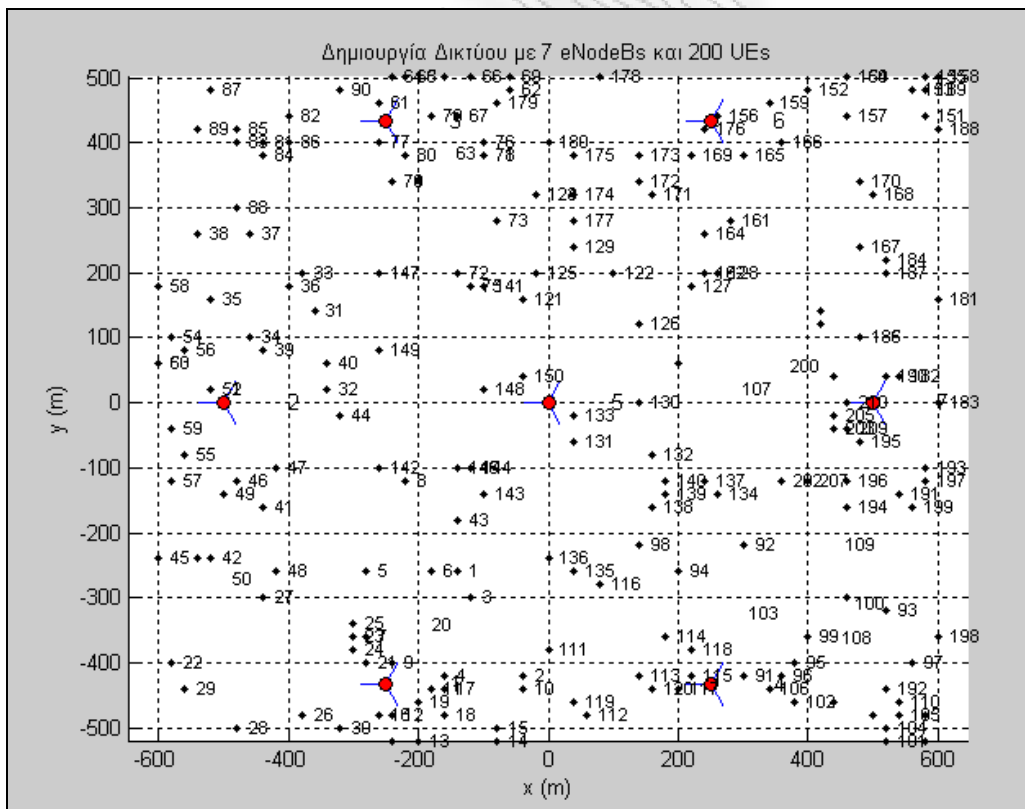


Εικόνα 7.17 Απεικόνιση της Ενέργειας και της Ενέργειας ανά bit πληροφορία σε σχέση με το SIR.

Τα δεδομένα του πίνακα 7.18 χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του δικτύου της εικόνας 7.18 με τη χρήση του προσομοιωτή που έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο της Βιέννης [90]. Στην εικόνα 7.18 απεικονίζονται 7 σταθμοί βάσεων και 200 χρήστες κατανεμημένοι γύρω από τα eNodeBs.

Κεραίες	7
Χρήστες	200
Συχνότητα	2,14 GHz
Bandwidth	3 MHz
Χρόνος Προσομοίωσης	2.5 min
No	kTB
K	$1.380650 \cdot 10^{-23}$
T	$290^{\circ}$
Threshold A	5
Ύψος Κεραίας	20 m
Μηχανική Γωνία	$0^{\circ}$
Ηλεκτρική Γωνία	$8^{\circ}$
Antenna Downtilt	$30^{\circ}$

Πίνακας 7.18 Παράμετροι δικτύου με 7 eNodeBs και 200 UEs.



Εικόνα 7.18 Απεικόνιση δικτύου με 7 eNodeBs και 200 UEs.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

## Κεφάλαιο 8 – Μελλοντικές Εξελίξεις-Συμπεράσματα

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει πλέον απαραίτητες παρέχοντας στους χρήστες τους την δυνατότητα πρόσβασης σε υπηρεσίες και δεδομένα ανεξάρτητα του χρόνου και του χώρου που βρίσκονται. Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν στην ανάπτυξη συσκευών μικρές σε μέγεθος και εξαιρετικά εξελιγμένες. Επομένως, η επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων όπως το IEEE 802.16m και το Third Generation Partnership Program (3GPP) Long Term Evolution (LTE) θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν ένα αποτελεσματικό μηχανισμό εξοικονόμησης ενέργειας για να πετύχουν την μεγαλύτερη διάρκεια της ζωής στις μπαταρίες ενώ ταυτόχρονα να παρέχουν βελτιωμένη εμπειρία χρήστη και ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Οι κινητές συσκευές που θα χρησιμοποιούνται στις νέες αυτές τεχνολογίες θα περιέχουν πέρα από τις γνωστές διεπαφές όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και το USB, και LTE modems. Στην διπλωματική αυτή εργασία μοντελοποιείτε και παρουσιάζεται μέσα από σενάρια προσομοίωσης η δημιουργία ενός μοντέλου, που μοντελοποιείται ως μια αλυσίδα του Markov, για την εξοικονόμηση ενέργειας στο LTE modem.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στην κατανάλωση της ενέργειας στο Modem, η οποία αποτελείται από τη στατική και τη δυναμική ενέργεια. Επίσης εξετάζεται το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των μεταδόσεων και των επαναμεταδόσεων μπορεί να υπάρχουν επιτυχείς (ACK) ή αποτυχείς μεταδόσεις (NACK). Σε αυτά βασίζεται και το προτεινόμενο μοντέλο, όπου είναι αναγκαίο και σημαντικό ότι κατά τη διάρκεια των επιτυχιών και διαδοχικών μεταδόσεων το ACK πρέπει να έχει ένα κάτω όριο δηλαδή ένα threshold.

Για να υπολογιστεί στο σύστημα η δυναμική ενέργεια με σκοπό την μείωση της, εφαρμόζεται η εναλλαγή της διαδικασίας ARQ και της HARQ.

Στην πραγματικότητα, το LTE modem εξυπηρετεί πολλές διαδικασίες, έτσι ο υπολογισμός της δυναμικής ενέργειας του προτεινόμενου μοντέλου γίνεται με βάση τις αλυσίδες του Markov.

Στο μέλλον, οι τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας αναμένεται να βελτιωθούν, να υποστηρίζουν προχωρημένα χαρακτηριστικά όπως την από μηχανή σε μηχανής επικοινωνία, client relay και ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών ράδιο διεπαφών.

## Βιβλιογραφία

- [1] X. Δουληγέρης, “Σύγχρονα Τηλεπικοινωνιακά και Δικτυακά Πρωτόκολλα”, Εκδόσεις Νηρηίδες, 2005.
- [2] J. T.Gorgone, “B-ISDN”, 1998.
- [3] "Recommendation I.113, Vocabulary of Terms for Broadband aspects of ISDN". ITU-T. June 1997 (originally 1988). Retrieved 19 July 2011.
- [4] "Recommendation I.150, B-ISDN Asynchronous Transfer Mode Functional Characteristics". ITU-T. February 1999. Retrieved 19 July 2011.
- [5] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
- [6] <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/SDH>.
- [7] [http://www.altera.com/technology/high\\_speed/protocols/gpon/pro-gpon.html](http://www.altera.com/technology/high_speed/protocols/gpon/pro-gpon.html).
- [8] A. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Παντος, “Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.
- [9] J. Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2003.
- [10] M. Nilsson, "Third Generation Radio Access Standards", Ericsson, 1999.
- [11] Nokia Telecommunications, "Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)", white paper, 1999.
- [12] A. Black, P. S. Dipiazza, B. A. Ferguson, D. R. Voltmer, F. C. Bery, "Introduction to Wireless Systems", Pearson Education, Inc, 2008.
- [13] J. Cai and D. Goodman, "General Packet Radio Service in GSM", IEEE Communications Magazine, 1997
- [14] B. Eylert, "The Mobile Multimedia Business: Requirements and Solutions", John Wiley & Sons, 2005.
- [15] Third Generation Partnership Project - 3GPP (<http://www.3gpp.org>).
- [16] H. Holma, and A. Toskala, "LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA based radio access", John Wiley & Sons: Chichester, 2009.
- [17] 3GPP TR 25.858, "Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access", Version 5.0.0, 2002.
- [18] 3GPP TS 25.308, "High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage 2". Version 9.0.0, 2009.
- [19] 3GPP TS36.300, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Overall Description".
- [20] Motorola White Paper : Long Term Evolution (LTE).
- [21] P. Lesquyer, T. Lucidarme, "Evolved Packet System (EPS), The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS", John Wiley & Sons, 2008.
- [22] S. Sesia, I. Toufik, M.Baker, "LTE The UMTS Long Term Evolution, FROM THEORY TO PRACTICE", John Wiley & Sons, 2009.
- [23] Third Generation Partnership Project - 3GPP (<http://www.3gpp.org>).
- [24] Moray Rumney, "LTE and the Evolution to 4G Wireless, Design and Measurement Challenges", Agilnt Technologies Publication, 2009.
- [25] Farooq Khan, "LTE for 4G Mobile Broadband", Cambridge University Press, 2009.
- [26] H. G. Myung, "Technical Overview of 3GPP Long Term Evolution (LTE)", Feb. 8, 2007.
- [27] D. S. Shah, "A Tutorial on LTE Evolved UTRAN (EUTRAN) and LTE Self Organizing Networks (SON), December, 2010".

- [28] A. Hamza, "Long Term Evolution (LTE) – A Tutorial", October 13, 2009.
- [29] Ericsson White Paper : LTE-an Introduction.
- [30] L. Song, J. Shen, "Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE", Taylor and Francis Group, 2011.
- [31] <http://shishireahmed.blogspot.com>.
- [32] <http://www.connig.com/WiMAX/fdm-ofdm-ofdma-sofdma-01.htm>.
- [33] K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, and C. E. Wheatley, "On the Capacity of a Cellular CDMA System," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 40 Issue: 2, May 1991.
- [34] I.C.C. de Bruin, G. Heijenk, M. El Zarki, and J. Lei Zan, "Fair Channel-Dependent Scheduling in CDMA Systems," 12th IST Summit on Mobile and Wireless Communications Summit 2003, Aveiro, Portugal, June 15–18, 2003, pp. 737–741.
- [35] E. Dalman, S. Parkvall, J. Skold, "4G LTE/LTE – Advanced for Mobile Broadband", 2011.
- [36] Jitesh Ratan, Ashwath Holla, Ranjit Sadakale, A. Jeyakumar, "Performance of LTE Downlink Scheduling algorithm with load", IEEE, 2011.
- [37] Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti, Soren Anderson, "Optimization Wireless Access", Wiley, 2008.
- [38] S. Hussain, "Dynamic Radio Resource Management in 3GPP LTE", 2009.
- [39] Z. Haitao and H. Viswanathan, "HARQ Aware Scheduler in Downlink Packet Data Systems," in IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Vol. 3, 2003.
- [40] K. C. Beh, A. Doufexi, and S. Armour, "Performance Evaluation of Hybrid ARQ Schemes of 3GPP LTE OFDMA System," in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on, 2007, pp. 1–5
- [41] J. Ohyan, S. Jong-Wuk, and C. Dong-Ho, "An Enhanced Packet Scheduling Algorithm Combined with HARQ for HSDPA System", Communications Letters, IEEE Volume:12, 2008, pp. 247-249.
- [42] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Lindstrom, and S. Parkvall, "LTE: The Evolution of Mobile Broadband," IEEE Communications Magazine, Vol. 47, 2009.
- [43] M. Andrews, K. Kumaran, K. Ramanan, A. Stoytar, P. Whiting, and R. Vijayakumar, "Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link", Communications Magazine, IEEE Volume:39, 2001, pp. 150-154.
- [44] H.A.M. Ramli, K. Sandrasegaran, R. Basykala, T.S. Afrin, "HARQ Aware Scheduling Algorithm for the Downlink LTE System", IEEE, 2011.
- [45] M. Nicolaou, A. Doufexi, S. Armour, Y. Sun "Scheduling Techniques for Improving Call Capacity for VoIP Traffic in MIMO-OFDMA Networks", IEEE VTC-Fall 2009, Sept. 2009.
- [46] C. Han, K. C. Beh, M. Nicolaou, S. Armour, A. Doufexi, "Power Efficient Dynamic Resource Scheduling Algorithm for LTE", IEEE, 2010.
- [47] IEEE P802.16M/d4, "IEEE 802.16m DRAFT Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks", 2010, Feb. 2010.
- [48] J. Korhonen, "Introduction to 3G Mobile Communications", Artech House, 2003.
- [49] Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava, "Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges", IEEE, 2011.
- [50] R. Y. Kim and S. Mohanty, "Advanced Power Management Techniques in Next-Generation Wireless Networks", Communications Magazine, IEEE, May 2010.
- [51] G. S. Kim, Y. H. Je and S. Kim, "An Adjustable Power Management for Optimal Power Saving in LTE Terminal Baseband Modem", IEEE, 2009.

- [52] EARTH project deliverable, D23 “Energy Efficiency Analysis of the Reference Systems, Area of Improvements and Target Breakdown”, 2010.
- [53] X. Wang, A. V. Vasilakos, M. Chen, Y. Liu, T. T. Kwon, “A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges”, Springer Science and Business Media LLC, 2011.
- [54] Dario Sabella, Marco Caetti, Roberto Fantini, “Energy Efficiency Evaluation of State of the Art Packet Scheduling algorithms for LTE”, 2011.
- [55] M. Madfors, K. Wallstedt, S. Magnusson, H. Olofsson, P. O. Backman, and S. Engstrom, “High Capacity with Limited Spectrum in Cellular Systems”, Communications Magazine, IEEE Volume:35, Issue: 8, 1997, pp. 38-45.
- [56] Ruixiao WU, Zhigang WEN, Chunxiao FAN, Jie LIU, Zhenjun MA, “Self-Optimization of Antenna Configuration in LTE –Advanced Networks for Energy Saving”, IEEE, 2010.
- [57] I. Siomina, P. Varbrand, and D. Yuan, “Automated Optimization of Service Coverage and Base Station Antenna Configuration in UMTS Networks”, Wireless Communications, IEEE Volume:13, Issue: 6, 2006, pp. 16-25.
- [58] T. Isotalo, J. Niemela and J. Lempinen, “Electrical *Antenna Downtilt* in UMTS Network”.
- [59] J. Niemela, T. Isotalo, and J. Lempinen, “Optimum Antenna Downtilt Angles for Macrocellular WCDMA Network, Wireless Communications and Networking, 2005.
- [60] T. Specification, “TS 136 212 - V8.7.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (3GPP TS 36.212 version 8.7.0 Release 8),” 2009.
- [61] T. Specification, “TS 136 211 - V9.0.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 9.0.0 Release 9),” 2010.
- [62] M. Meyer, H. Wiemann, M. Sagfors, J. Torsner, and J.-f. Cheng, “ARQ Concept for the UMTS Long-Term Evolution,” IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 1–5, Sep. 2006.
- [63] H.A.M. Ramli, K. Sandrasegaran, R. Basykala, T.S. Afrin, “HARQ Aware Scheduling Algorithm for the Downlink LTE System”, IEEE, 2011.
- [64] Jan Dohl, Gerhard Fettweis, “Energy Aware Evaluation of LTE Hybrid-ARQ and Modulation/Coding Schemes”, IEEE, 2011.
- [65] D. R. Cox, “The analysis of non-markovian stochastic processes by the inclusion of supplementary variables”, Proceedings Cambridge Philosophical Society, 1955.
- [66] R. German. Transient analysis of deterministic and stochastic petri nets by the method of supplementary variables. In MASCOTS '95: Proceedings of the 3rd International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, pages 394–398, Washington, DC, USA, 1995. IEEE Computer Society.
- [67] G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, K. S. Trivedi, “Queueing Networks and Markov Chains”, John Wiley and Sons, 1998.
- [68] W. Ching, M. K. Ng, “Markov Chains, Models, Algorithms and Applications”, Springer Science & Business, 2006.
- [69] “SC-FDMA Single Carrier FDMA in LTE”, 2009.
- [70] [http://sharetechnote.com/html/BasicProcedures\\_LTE.html](http://sharetechnote.com/html/BasicProcedures_LTE.html)
- [71] J. Zyren, “Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer”, 2007.
- [72] Q. Wang, “Synchronization Aspects in LTE”, 2008.
- [73] “Motorola: Long Term Evolution (LTE): Overview of the LTE Air-Interface Technical White Paper”.



- [74] R. Love, R. Kuchibhotla, A. Ghosh, R. Ratasuk, W. Xiao, B. Classon, Y. Blankenship, "Downlink Control Channel Design for 3GPP LTE", 2008.
- [75] K Parsa, "Survey of power control in LTE", 2008.
- [76] C. Turner, "New Cortex™-R Processors for LTE and 4G Mobile Baseband".
- [77] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", Prentice-Hall, 1996.
- [78] J-F. T. Cheng, H. Koorapaty, "Error Detection Reliability of LTE CRC Coding", 2008.
- [79] <http://blog.eukhost.com/webhosting/cyclic-redundancy-checkcrc/>
- [80] A. Mehmod and W. A. Cheema, "Channel Estimation for LTE Downlink", 2009.
- [81] D. Wu, I. Eilert, D.Liu, A. Nilsson, E. Tell, E. Alfredsson, "System Architecture for 3GPP LTE Modem using a Programmable Baseband Processor", 2009.
- [82] P. Hoel, S. Port, C. Stone, "Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων", Α. Γιαννόπουλος επιμέλεια για την Ελληνική έκδοση, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, 2005.
- [83] Θ. Σ. Παπαθεοδώρου, "Αλγόριθμοι, εισαγωγικά θέματα και παραδείγματα", Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2001.
- [84] R. Kwan and C. Leung, "On Collision Probabilities in Frequency-Domain Scheduling for LTE Cellular Networks", 2011.
- [85] J.-M. Kelif, E. Altman, "Downlink Fluid Model of CDMA Networks", 2005.
- [86] S. Goga, J. Polec, K. Kotuliakova, "On the Throughput Performance of Some Continuous ARQ Strategies with Repeated Transmissions", IEEE, 1986.
- [87] MATLAB tool
- [88] MATLAB manual
- [89] <http://www.mathworks.com/index.html>
- [90] <http://www.nt.tuwien.ac.at/>