

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένα Συστήματα Πληροφορικής»



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Τεχνολογίες LTE και Μέθοδοι Εξοικονόμησης Ενέργειας»**

*Όνομα Φοιτήτριας: Δουλή Χαραλαμπία*

*«Αρ. Μητρώου: ΜΠΣΠ13030»*

*Επιβλέπων Καθηγητής: Δουληγέρης Χρήστος*

Πειραιάς Μάιος 2016



## LTE Technology and Saving Methods



**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

<b>Δουληγέρης Χρήστος</b>	<b>Βέργαδος Δημήτρης</b>	<b>Κοτζανικολάου Παναγιώτης</b>
<b>Καθηγητής</b>	<b>Επίκουρος Καθηγητής</b>	<b>Επίκουρος Καθηγητής</b>





## Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία είναι βιβλιογραφική και αναφέρεται στις τεχνολογίες LTE. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση των συστημάτων LTE προκειμένου να γίνουν κατανοητά, δεδομένου ότι αποτελούν τα συστήματα που είναι διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται ευρέως την παρούσα περίοδο. Επίσης παρουσιάζονται έρευνες που έχουν δημοσιευτεί όσον αφορά μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα LTE.

Στόχος των τεχνολογιών LTE είναι να παραμείνουν ανταγωνιστικές τουλάχιστον για τα επόμενα δέκα χρόνια. Προκειμένου όμως να καταφέρουν να παραμείνουν ανταγωνιστικές, οι τεχνολογίες LTE έχουν θέσει κάποιες βασικές απαιτήσεις που αφορούν τις μειωμένες καθυστερήσεις εγκατάστασης της σύνδεσης και της μετάδοσης, αυξημένους ρυθμούς δεδομένων καθώς και απαιτήσεις όσον αφορά την διαλειτουργικότητα και την κινητικότητα των συστημάτων LTE. Οι απαιτήσεις όμως των Τεχνολογιών LTE έχουν και συγκεκριμένες επιπτώσεις όσον αφορά την απόδοση της ενέργειας των συστημάτων προκαλώντας μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα θέματα που προκύπτουν όσο αφορά τη κατανάλωση ενέργειας όπως: σύνθετες τεχνικές στο φυσικό στρώμα, όπως πολλαπλής εισόδου -πολλαπλής εξόδου (MIMO) και Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), κωδικοποίηση δικτύου, νέες αρχιτεκτονικές δικτύου, κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι με συγκεκριμένα αποτελέσματα όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας.



## Abstract

The thesis is a literature and refers to LTE technologies. The aim is to analyze the LTE systems. This system are popular and wide used currently. They also presented studies published regarding energy saving methods in LTE systems

The objective of LTE technology is to remain competitive at least for the next ten years. But in order to be able to remain competitive, LTE technology have set some basic requirements for reduced connection setup delays and transmission, increased data rates and requirements in terms of interoperability and mobility of LTE systems. But the LTE Technology requirements have specific effect on the performance of energy systems causing high energy consumption. Various methods have been proposed to address the issues raised regarding the energy consumption such as: advanced techniques in physical layer, such as multiple input multipoint output (MIMO) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), network coding, new network architectures, e.t.

This thesis describes three methods to concrete results in energy savings



## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	5
Abstract.....	6
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Περίληψη.....	14
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b>	
<b>1. Γενιές Κινητών τηλεφώνων. Πρότυπα και Διαφορές Γενιών .....</b>	<b>15</b>
1.1 Γενικά .....	15
1.2 Πρώτη Γενιά Κινητών (1G).....	15
1.3 Δεύτερη Γενιά Κινητών (2G) .....	16
1.4 Τρίτη Γενιά Κινητών (3G) .....	17
1.5 Τέταρτη Γενιά Κινητών (4G).....	19
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b>	
<b>2. Η Τεχνολογία LTE.....</b>	<b>22</b>
2.1 Γενικά.....	22
2.2 Εξοπλισμός Χρήστη.....	23
2.2.1 Αρχιτεκτονική του Εξοπλισμού Χρήστη (UE) .....	23
2.3 Αρχιτεκτονική Μοντέλου Αναφοράς (EPS).....	24
2.4 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) .....	25
2.4.1 Γενικά.....	25
2.4.2 Αρχιτεκτονική του E-UTRAN .....	26
2.4.3 Πρωτόκολλα Αρχιτεκτονικής E-UTRAN.....	27
2.5 Evolved Packet Core (EPC) .....	29
2.5.1 Γενικά .....	29
2.5.2 Αρχιτεκτονική του EPC (Evolved Packet Core).....	30
2.6 Διεπαφές του Δικτύου E-UTRAN .....	33
2.7 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	36
2.7.1 Μοντέλο Πρωτοκόλλου .....	36
2.7.2 Radio Interface Πρωτόκολλα .....	38
2.7.2.1 Packet Data Convergence Protocol Layer (PDCPL) .....	39



2.7.2.2 Radio Link Control (RLC) .....	40
2.7.2.3 Medium Access Control Layer (MAC) .....	41
2.7.3 Επίπεδο Ελέγχου και Χρήστη .....	43
2.7.3.1 Επίπεδο Χρήστη .....	43
2.7.3.2 Επίπεδο Ελέγχου .....	45
2.7.4 Πρωτόκολλα GPRS Tunneling (GTP).....	45
2.7.5 Πρωτόκολλα Σηματοδοσίας (Signalling).....	47
2.7.6 Παράδειγμα Ροών Σηματοδοσίας .....	49
2.7.6.1 Σηματοδοσία Access Stratum .....	49
2.7.6.2 Σηματοδοσία Non-Access Stratum .....	50
2.7.7 Στοίβα Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα .....	52
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></b>	
<b>3. Κανάλια Λογικά, Μεταφοράς και Φυσικά .....</b>	<b>54</b>
3.1 Κανάλια Λογικά .....	54
3.2 Κανάλια Μεταφοράς .....	56
3.3 Κανάλια Φυσικά .....	57
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup></b>	
<b>4. Κατανάλωση Ενέργειας.....</b>	<b>59</b>
4.1 Εισαγωγή .....	59
4.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας.....	60
4.3 Μέθοδοι Εξοικονόμησης Ενέργειας .....	61
4.3.1 Ασυνεχείς Υποδοχείς (DRX) .....	61
4.3.1.1 LTE και το σενάριο DRX.....	61
4.3.1.2 Αναλυτικό μοντέλο για LTE εξοικονόμησης ενέργειας .....	64
4.3.1.2.1 Μοντέλο Bursty Packet Traffic.....	64
4.3.1.2.2 Μετάβαση από την Κατάσταση 1 στην Κατάσταση 1 και από την Κατάσταση 1 στην Κατάσταση 2 .....	65
4.3.1.2.3 Ρυθμιζόμενος DRX Χρονοδιακόπτης για Κατάσταση Light Sleep .....	65
4.3.1.2.4 Μετάβαση από την Κατάσταση 2 στην Κατάσταση 1 και από την Κατάσταση 2 στην Κατάσταση 3 .....	67
4.3.1.2.5 Μετάβαση από την Κατάσταση 3 στην Κατάσταση 167	
4.3.1.2.6 Μεταβατική Πιθανότητα Matrix .....	67





4.3.1.3 Ρυθμιζόμενοι DRX Κύκλοι σε LTE.....	69
4.3.1.4 Καταστάσεις Ύπνου $H_2$ και $H_3$ .....	70
4.3.1.5 Παράοντας Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving Factor- (PS) .....	71
4.3.1.6 Αριθμητικά αποτελέσματα .....	72
4.3.1.7 Συμπεράσματα .....	78
4.3.2 Green Distance-Aware Base Station Sleeping Αλγόριθμος .....	79
4.3.2.1 Εισαγωγή .....	79
4.3.2.2 Το Μοντέλο του Συστήματος .....	79
4.3.2.3 Ο προτεινόμενος Switch on/off Αλγόριθμος .....	83
4.3.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	85
4.3.2.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης .....	85
4.3.2.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....	87
4.3.2.5 Αποτελέσματα .....	90
4.3.3 Εξοικονόμηση ενέργειας σε μικρά κύτταρα.....	91
4.3.3.1 Εισαγωγή .....	91
4.3.3.2 Hardware σχεδιασμός για μικρά κύτταρα.....	92
4.3.3.3 Διαδικασίες λειτουργίας sleep για μικρά κύτταρα .....	93
4.3.3.4 Ελεγχόμενη Λειτουργία Sleep.....	94
4.3.3.4.1 Μικρά Κύτταρα Ελεγχόμενα από Λειτουργία Sleep. 94	
4.3.3.4.2 Δίκτυο Κορμού Ελεγχόμενο από Λειτουργία Sleep.. 95	
4.3.3.4.3 UE Ελεγχόμενο από Λειτουργία Sleep .....	96
4.3.3.5 Αριθμητικά αποτελέσματα .....	97
4.3.3.6 Συμπεράσματα .....	100
<b>Κεφάλαιο 5°</b>	
<b>5. Γενικά Συμπεράσματα .....</b>	<b>101</b>
<b>Κεφάλαιο 6°</b>	
<b>6. Μελλοντικά .....</b>	<b>103</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>96</b>



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Εξέλιξη από τις τεχνολογίες 2G στις τεχνολογίες 3G .....	17
Σχήμα 2. Υπηρεσίες που παρέχει η τεχνολογία 4G .....	20
Σχήμα 3. Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του LTE/SAE .....	23
Σχήμα 4. Εσωτερική αρχιτεκτονική του UE .....	24
Σχήμα 5. LTE μοντέλο αναφοράς .....	25
Σχήμα 6. Αρχιτεκτονική E-UTRAN .....	27
Σχήμα 7. Στρώματα πρωτοκόλλου LTE .....	29
Σχήμα 8. Κύρια στοιχεία του evolved packet core .....	31
Σχήμα 9. Διεπαφή S1-U .....	32
Σχήμα 10. Διεπαφή S3 .....	32
Σχήμα 11. Διεπαφή S4 .....	33
Σχήμα 12. Διεπαφή S5 .....	33
Σχήμα 13. Διεπαφή S6a .....	34
Σχήμα 14. Διεπαφή S11 .....	34
Σχήμα 15. Διεπαφή Gx .....	35
Σχήμα 10. User plane και end-to-end protocol stack .....	36
Σχήμα 11. Control plane end-to-end protocol stack .....	37
Σχήμα 12. Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου Πρωτοκόλλων του LTE .....	39
Σχήμα 13. Σχέση μεταξύ του access και του non-access stratum .....	39
Σχήμα 14. Αρχιτεκτονική του radio interface πρωτοκόλλου-Επίπεδο ελέγχου και Χρήστη .....	40
Σχήμα 15. Πολυπλεξία Κάτω ζεύξης Λογικών Καναλιών .....	43
Σχήμα 16. Πολυπλεξία Άνω ζεύξης Λογικών Καναλιών .....	44
Σχήμα 17. User plane πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται από το LTE .....	45
Σχήμα 18. GTP stack .....	46
Σχήμα 19. GTP tunneling .....	47
Σχήμα 20. Signalling πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο LTE .....	48
Σχήμα 21. Διαδικασία ικανότητας του UE για μεταφορά .....	49
Σχήμα 22 Στοιβά Πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την αποστολή RRC μηνυμάτων σηματοδότησης μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης .....	49



Σχήμα 23. GUTI reallocation διαδικασία (α) Μηνύματα Non-access stratum (β) Μηνύματα μεταφοράς χρησιμοποιώντας το access stratum.....	50
Σχήμα 24. Η Στοιβά πρωτοκόλλων συνηθίζουν να ανταλλάσσουν non-access stratum signaling μηνύματα μεταξύ του κινητού και του MME.....	51
Σχήμα 25. Αρχιτεκτονική της Στοιβάς Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα .....	53
Σχήμα 26. LTE DRX χρονοδιάγραμμα για λειτουργίες δέκτη UE.....	62
Σχήμα 27. Μία semi-Markov διαδικασία για LTE DRX ανάλυση.....	64
Σχήμα 28: LTE DRX Inactivity Timer στο $T_I$ για Ενέργεια	
LTE DRX Inactivity Timer στο $T_I$ για Καθυστέρηση .....	72
Σχήμα 29: LTE DRX Short Cycle στο $T_N$ για Ενέργεια	
LTE DRX Short Cycle στο $T_N$ για Καθυστέρηση .....	73
Σχήμα 30. LTE DRX Short Cycles στο $T_{DS}$ για Ενέργεια	
LTE DRX Short Cycle στο $T_{DS}$ για Καθυστέρηση .....	74
Σχήμα 31. LTE DRX Long Cycle στο $T_{DL}$ για Ενέργεια	
LTE DRX Short Cycle στο $T_{DL}$ for Καθυστέρηση .....	75
Σχήμα 32. Τοπολογία Δικτύου .....	77
Σχήμα 33. Ρυθμός παραγωγής κυκλοφορίας σε σχέση χρόνου .....	78
Σχήμα 34. Switch on/off scheme .....	82
Σχήμα 35. Παράδειγμα δικτύου για τον προτεινόμενο αλγόριθμο .....	83
Σχήμα 36. Μέση εφικτή κατανάλωση ενέργειας όταν οι μισοί eNBs είναι σβηστεί σε σχέση με τον χρόνο.....	85
Σχήμα 37. Μέγιστη % εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το χρόνο .....	85
Σχήμα 38. Ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το χρόνο .....	86
Σχήμα 39. Μοντέλο hardware για μικρά κύτταρα BS .....	88
Σχήμα 40. Ενέργεια που καταναλώνεται από τους ράδιο BSs ετησίως σε σχέση με την κατάσταση sleep λειτουργίας εγκατάστασης ενεργοποιημένου picocell.....	95



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση των γενιών ασύρματων επικοινωνιών .....	21
Πίνακας 2. Λογικά κανάλια.....	55
Πίνακας 3 Κανάλια Μεταφοράς .....	56
Πίνακας 4. Φυσικά Κανάλια .....	58
Πίνακας 5. Παράμετροι Προσομοίωσης βασιζόμενοι στο LTE-Advanced .....	87
Πίνακας 6. Προφίλ Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Hardware Μικρού Κελιού .....	93





## Περίληψη

Η τεχνολογία LTE είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία αυτή την περίοδο.

Η διπλωματική εργασία αρχικά κάνει μια επισκόπηση στις προηγούμενες τεχνολογίες 1G, 2G, 3G, 4G.

Στο δεύτερο μέρος αναλύεται η τεχνολογία LTE. Περιγράφεται η αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη, γίνεται αναφορά στις δυο συνιστώσες στις οποίες διαιρείται.

Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του EPS καθώς και οι πολλαπλές λειτουργίες που μπορούν να επιτευχθούν. Αναλύονται οι δυο συνιστώσες της αρχιτεκτονικής του EPS, το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (access network) και το δίκτυο κορμού (core network).

Το δίκτυο πρόσβασης είναι το Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) όπου γίνεται αναφορά στη αρχιτεκτονική του καθώς και στον τρόπο λειτουργίας του. Γίνεται αναφορά στα πρωτόκολλα της αρχιτεκτονικής του E-UTRAN και τα τρία στρώματα στα οποία χωρίζεται η ραδιο διεπαφή.

Στην συνέχεια αναλύεται ο κορμός του δικτύου, γνωστός ως Evolved Packet Core (EPC) καθώς και τα λειτουργικά του στοιχεία.

Παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και η δομή τους. Ποιο συγκεκριμένα γίνεται μια εκτενής ανάλυση των Radio Interface Πρωτοκόλλων, των Πρωτοκόλλων Επιπέδου Χρήστη (UP), το GPRS Tunneling Πρωτόκολλο (GTP), τα Signalling Πρωτόκολλα.

Στην συνέχεια δίνονται παραδείγματα Ροών Σηματοδοσίας, όπως η Σηματοδοσία του *Access Stratum* και του *Non-Access Stratum Signalling*.

Επιπλέον αξιολογούνται τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον του αέρα, από την πλευρά της κινητής τηλεφωνίας.

Στο τρίτο μέρος γίνεται αναφορά στα Λογικά, Φυσικά Κανάλια και τα Κανάλια Μεταφοράς.

Στο τέταρτο μέρος αναλύονται οι λόγοι κατανάλωσης ενέργειας και οι τρόποι με τους οποίους εξασφαλίζουμε εξοικονόμηση ενέργειας. Αναλύονται τρεις μέθοδοι: η πρώτη μέθοδος είναι η DRX, η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται στον αλγόριθμο "Green" Distance-Aware Base Station Sleeping. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση προτείνεται με μια έξυπνη στρατηγική, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας σε ένα δεδομένο δίκτυο, χωρίς να διακυβεύεται η προσφερόμενη ποιότητα QoS. Εισάγεται ένα distance-aware αλγόριθμο που επιτυγχάνει μία σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Η Τρίτη μέθοδος πραγματεύεται τεχνικές κατάσταση ύπνου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της.



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 1. Γενιές Κινητών τηλεφώνων. Πρότυπα και Διαφορές Γενιών

### 1.1 Γενικά

Διαφορετικές γενιές κινητών τηλεφώνων είναι εύκολα αναγνωρίσιμες από την τεχνολογία που χρησιμοποιούν. Ομοίως, όλα τα πρότυπα των κινητών τηλεφώνων μπορούν να κατανεμηθούν σε μια τεχνολογική γενιά. Τα πρώτα δημόσια συστήματα κινητών επικοινωνιών εμφανίστηκαν στις ΗΠΑ στα τέλη της δεκαετίας του '40 και στη Σκανδιναβία στις αρχές της δεκαετίας του '70. Το πρώτο σύστημα επικαλούνταν χειροκίνητη μεταγωγή κλήσεων και χρησιμοποιούσαν μεγάλους και βαρείς ραδιοπομπούς σε οχήματα και θεωρούνταν προκάτοχος στις σύγχρονες τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας και όχι ένα μέρος τους. Ακολούθησαν οι αναλογικές τεχνολογίες που χαρακτηρίστηκαν από την αυτόματη κλήση προς και από εξωτερικά δίκτυα.

### 1.2 Πρώτη Γενιά Κινητών (1G)

Το Πρώτο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών θεσπίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και έκτοτε υπέστη σημαντικές αλλαγές και τεράστια ανάπτυξη. Χρησιμοποιούνταν τεχνολογία FM (Frequency Modulation- διαμόρφωση συχνότητας), FDD (Frequency Division Duplex -συχνοδιαιρετική αμψίδρομη επικοινωνία) και FDMA (Frequency Division Multiple Access -πολυπλεξία στη συχνότητα). Το σύστημα πρώτης γενιάς (1G) χρησιμοποιούσε τεχνικές αναλογικής επικοινωνίας για υπηρεσίες ομιλίας, η οποία ήταν παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιούνταν από έναν παραδοσιακό αναλογικό ραδιόφωνο. Τα μεμονωμένα κύτταρα ήταν τεράστια και τα συστήματα δεν χρησιμοποιούσαν την διαθέσιμη φασματική απόδοση αποτελεσματικά. Οι κινητές συσκευές ήταν αρκετά μεγάλες και ακριβές και υπήρχαν στο εμπόριο σχεδόν αποκλειστικά για επαγγελματίες χρήστες. Ταυτόχρονα η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών ήταν υποτυπώδης και προβληματική.

Η λειτουργία των πρώτων κυψελωτών συστημάτων ξεκίνησε στο Τόκυο από την Nippon Telephone and Telegraph (NTT). Στην Ευρώπη τα κυψελωτά συστήματα λειτούργησαν το 1981 με τα αναλογικά συστήματα Nordic Mobile Telephones (NMT) και Total Access Communication Systems (TACS) και ήταν σχεδόν πανομοιότυπα με το σύστημα Advanced Mobile Phone System (AMPS) το οποίο αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, το 1982. Τα συστήματα υποστήριζαν μεταπομπή (handover) και είχαν τη δυνατότητα περιαγωγής (roaming), αλλά δεν πρόσφεραν διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών.



### 1.3 Δεύτερη Γενιά Κινητών (2G)

Οι Κινητές Επικοινωνίες απογειώθηκαν με την εισαγωγή των συστημάτων δεύτερης γενιάς (2G) στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Τα συστήματα αυτά ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιούσαν την ψηφιακή τεχνολογία, η οποία επέτρεπε μια πιο αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος και την εισαγωγή μικρότερων και φθηνότερων συσκευών. Είχαν αρχικά σχεδιαστεί μόνο για φωνή, αλλά αργότερα υποστήριξαν την ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω της υπηρεσίας σύντομων μηνυμάτων (SMS- Short Messaging Service). Το πιο δημοφιλές σύστημα 2G ήταν το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM-Global System for Mobile Communications), το οποίο είχε σχεδιαστεί ως πανευρωπαϊκή τεχνολογία, αλλά αργότερα έγινε δημοφιλής σε ολόκληρο τον κόσμο. Επίσης, αξιοσημείωτη ήταν η τεχνολογία IS-95 (Interim Standard), γνωστή ως cdmaOne (Code Division Multiple Access One), η οποία σχεδιάστηκε από την Qualcomm, και η οποία έγινε το κυρίαρχο σύστημα 2G στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς, τα συστήματα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, όπως την τεχνολογία Time Division Multiple Access (TDMA) και την τεχνολογία Code Division Multiple Access (CDMA).

Η επιτυχία των συστημάτων επικοινωνίας 2G ήρθε κατά την ίδια χρονική στιγμή με την πρώιμη ανάπτυξη του Διαδικτύου. Ήταν φυσικό για τους διαχειριστές του δικτύου να συνδέσουν αυτά τις δυο τεχνολογίες μεταξύ τους, επιτρέποντας στους χρήστες να κατεβάζουν δεδομένα σε κινητές συσκευές. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των Packet Core δικτύων μεταγωγής τομέα και με την τροποποίηση της διεπαφής αέρα, μπορούσαν να χειριστούν τα δεδομένα, καθώς και τη φωνή. Η GPRS (General Packet Radio Service) ενσωμάτωσε αυτές τις τεχνικές στο GSM.

Στην Ευρώπη, οι διοικήσεις τηλεπικοινωνιών στην CEPT1 (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) ξεκίνησαν το έργο GSM για την ανάπτυξη ενός πανευρωπαϊκού συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Οι GSM δραστηριότητες του δικτύου το 1989, συνεχίστηκαν εντός του νεοσύστατου Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI- European Telecommunication Standards Institute). Μετά την αξιολόγηση των προτάσεων TDMA, CDMA και FDMA, το τελικό πρότυπο GSM χτίστηκε πάνω στο TDMA. Η ανάπτυξη ενός ψηφιακού κυψελοειδούς πρότυπου ταυτόχρονα στις ΗΠΑ ήταν το US-TDMA. Μια κάπως μεταγενέστερη ανάπτυξη ενός προτύπου CDMA είναι το IS-95 όπου ολοκληρώθηκε από το TIA το 1993.

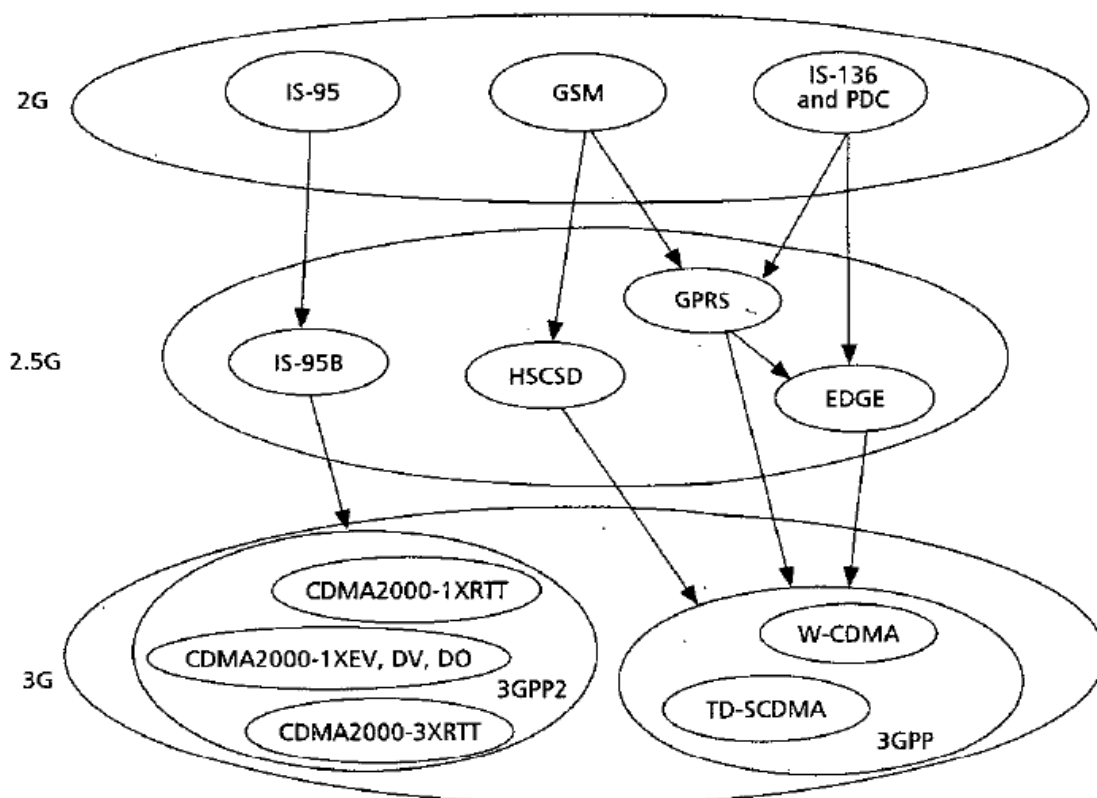
Η κινητή τεχνολογία με τη χρήση του προτύπου GPRS χαρακτηρίστηκε ως 2.5G. Τα συστήματα 2.5G ενίσχυαν την ικανότητα των δεδομένων GSM. Το GPRS προσθέτει τη δυνατότητα μεταγωγής πακέτου στα υπάρχοντα δίκτυα GSM και TDMA.

Η τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος έχει μια μακρά και επιτυχημένη ιστορία, αλλά είναι ανεπαρκής για συναλλαγές σύντομων δεδομένων. Η τεχνολογία μεταγωγής πακέτων έχει αυξηθεί σε σημασία με την ανάπτυξη του Διαδικτύου και του Πρωτοκόλλου IP (Internet Protocol).





Παρά το ότι το GPRS είναι μια επέκταση του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, απαιτεί εντελώς νέες συνδέσεις πακέτων δεδομένων με βάση το IP, εξυπηρετητές, και πύλες στο δίκτυο κορμού. Έτσι το GPRS προσθέτει πολλά νέα στοιχεία, εκτός από την αλλαγή του υπάρχοντος GSM ή TDMA δικτύου.



Σχήμα 1. Εξέλιξη από τις τεχνολογίες 2G στις τεχνολογίες 3G, (πηγή: **Wireless Communications: Past Events and a Future Perspective**, Theodore Rappaport, A. Annamalai, R. M. Buerera, ND William H. Tranter)

### 1.4 Τρίτη Γενιά Κινητών (3G)

Ο βασικός στόχος της μετάβασης προς τα συστήματα 3ης Γενιάς (3G) ήταν η ανάπτυξη ενός διεθνούς προτύπου που να συνδυάζει και να αντικαθιστά βαθμιαία τα κυψελωτά συστήματα 2ης Γενιάς (2G), τις υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών και τις κινητές υπηρεσίες δεδομένων. Ταυτόχρονη απαίτηση των συστημάτων τρίτης γενιάς ήταν η βελτίωση της ποιότητας της ομιλίας, αυξάνοντας την χωρητικότητα των δικτύων καθώς και τους ρυθμούς μετάδοσης στις κινητές υπηρεσίες δεδομένων. Δηλαδή είχε σκοπό να υποστηρίξει απεριόριστη κινητικότητα χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα της υπηρεσίας και να παρέχει κινητές υπηρεσίες «οπουδήποτε» και «κάθε στιγμή». Αυτό σημαίνει ότι ένας χρήστης δικτύων κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς μπορεί να μετακινείται οπουδήποτε και να εξυπηρετείται ακόμα και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κάλυψη



από συστήματα τρίτης γενιάς αλλά υπάρχουν άλλου είδους ασύρματα δίκτυα. Για την ακρίβεια, ο χρήστης θα έπρεπε να εξυπηρετείται από οικιακά ασύρματα συστήματα, από άλλα κυψελωτά κινητά δίκτυα καθώς και από δορυφορικά δίκτυα.

Η τεχνολογία μετάδοσης των συστημάτων 3G που επικράτησε είναι η Wideband code division multiple access (WCDMA).

Το κυρίαρχο σύστημα στον κόσμο των 3G είναι το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunication System-UMTS). Το UMTS αναπτύχθηκε από το GSM αλλάζοντας την τεχνολογία που χρησιμοποιούταν για τη διεπαφή αέρα, διατηρώντας παράλληλα το δίκτυο κορμού (core network) σχεδόν αμετάβλητο. Το σύστημα αργότερα βελτιώθηκε για εφαρμογές δεδομένων, με την εισαγωγή των τεχνολογιών 3.5G high-speed downlink packet access (HSDPA) και high-speed uplink packet access (HSUPA), οι οποίες είναι γνωστές ως high-speed packet access (HSPA).

Η WCDMA είναι η έκδοση που είχε αρχικά καθοριστεί. Το Time division synchronous code division multiple access (TD-SCDMA) είναι ένα παράγωγο του WCDMA το οποίο αναπτύχθηκε στην Κίνα.

Υπάρχουν δύο κύριες τεχνικές διαφορές μεταξύ αυτών των εφαρμογών. Πρώτον, η WCDMA διαχωρίζει συνήθως μεταδόσεις των σταθμών βάσης και κινητών τηλεφώνων μέσω της διαίρεσης συχνότητας διπλής όψης, ενώ η TD-SCDMA χρησιμοποιεί τον χρόνο αμφίδρομης διαίρεσης. Δεύτερον, η WCDMA χρησιμοποιεί ένα ευρύ εύρος ζώνης 5 MHz, ενώ η TD-SCDMA χρησιμοποιεί μια μικρότερη τιμή από 1.6MHz.

Η αρχική τεχνολογία 3G ήταν γνωστή ως τεχνολογία CDMA2000 1x ραδιομετάδοσης (1xRTT). Η CDMA2000 αναπτύχθηκε από το IS-95 και χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Βόρεια Αμερική. Στη συνέχεια ενισχύθηκε σε ένα σύστημα 3.5G με δύο εναλλακτικές ονομασίες, CDMA2000 high-rate packet data (EHRPD) ή evolution data optimized (EV-DO), η οποία χρησιμοποιεί παρόμοιες τεχνικές για πρόσβαση πακέτων υψηλής ταχύτητας. Οι προδιαγραφές για το IS-95 και CDMA2000 παράγονται από την Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2).

Υπάρχουν τρεις κύριες τεχνικές διαφορές μεταξύ των διεπαφών αέρα των CDMA2000 και UMTS. Πρώτον, η CDMA2000 χρησιμοποιεί ένα εύρος ζώνης των 1,25 MHz. Δεύτερον, η CDMA2000 είναι συμβατή με το IS-95, με την έννοια ότι τα κινητά τηλέφωνα IS-95 μπορούν να επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης CDMA2000 και αντίστροφα, ενώ το UMTS δεν είναι συμβατό με το GSM. Τρίτον, η CDMA2000 διαχωρίζει φωνή και βελτιστοποιημένα δεδομένα σε διαφορετικές φέρουσες συχνότητες, ενώ το UMTS τους επιτρέπει να μοιράζονται την ίδια συχνότητα. Τα δύο πρώτα θέματα εμπόδισαν τη διεξόδυση του WCDMA στην αγορά της Βόρειας Αμερικής.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της τεχνολογίας από την 2G στην 3G.



## 1.5 Τέταρτη Γενιά Κινητών (4G)

Οι ασύρματες τεχνολογίες τέταρτης γενιάς (4G) δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να χρησιμοποιούν υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών διαφόρων ασύρματων δικτύων. Είναι μια ολόκληρη αρχιτεκτονική και όχι μια συγκεκριμένη τεχνολογία και σαν επιδίωξη έχει την παροχή ολοκληρωμένων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών υψηλής ποιότητας. Η 4G ενσωματώνει τα δίκτυα 2G και 3G.

Στόχος των δικτύων 4G είναι η συνεχής μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο με ταυτόχρονες υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι υπηρεσίες που παρέχει η τεχνολογία 4G.

Τα συστήματα 4G αυξάνουν την ικανότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών ενσωματώνοντας όλες τις ασύρματες τεχνολογίες που υπάρχουν (π.χ. το GSM, το GPRS, το IMT-2000, το Wi-Fi, το Bluetooth) σε μία «all-IP» πλατφόρμα. Η μετάβαση στην «all-IP» γίνεται προκειμένου να υπάρχει μία κοινή πλατφόρμα για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα με αποτέλεσμα ο χρήστης να έχει την ελευθερία και την ευελιξία να επιλέξει οποιαδήποτε υπηρεσία επιθυμεί με λογική ποιότητα υπηρεσίας και σε προσιτή τιμή, οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Οι υπηρεσίες 4G ξεκίνησαν τις λειτουργίες τους το 2010.

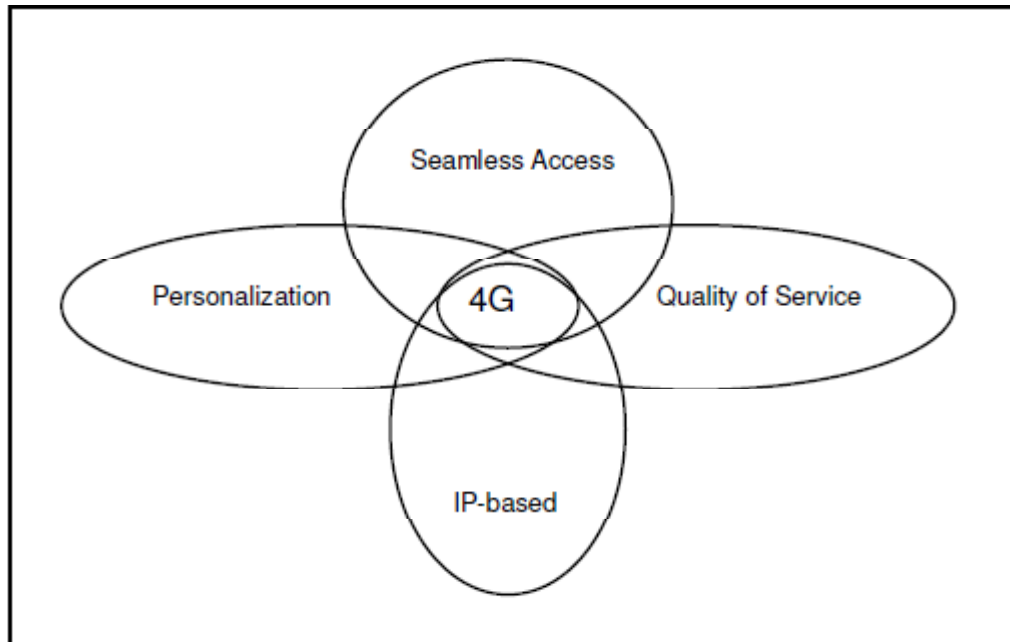
Η πρώτη επιτυχημένη δοκιμή πεδίου για 4G διεξήχθη στο Τόκιο, στην Ιαπωνία το 2005, όπου ήταν επιτυχής όσον αφορά την επίτευξη μετάδοσης πακέτων σε πραγματικό χρόνο στην κάτω ζεύξη σε μια κινούμενη ταχύτητα περίπου 20 χλμ / ώρα. Για να χρησιμοποιηθούν οι υπηρεσίες 4G, πολύτροπα τερματικά των χρηστών θα πρέπει να είναι σε θέση να επιλέξουν το κατάλληλο ασύρματο σύστημα. Στα σημερινά συστήματα GSM, οι σταθμοί βάσης σε τακτά χρονικά διαστήματα μεταδίδουν τα μηνύματα για συνδρομή στην υπηρεσία σηματοδότησης σε κινητούς σταθμούς. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία γίνεται περίπλοκη σε ετερογενή συστήματα 4G λόγω των διαφορών στις ασύρματες τεχνολογίες και στα πρωτόκολλα πρόσβασης.

Το κινητό επιτρέπει στους κινητούς πελάτες να περιφέρονται σε όλα γεωγραφικά όρια των ασύρματων δικτύων. Υπάρχουν δύο κύρια θέματα στον τερματικό κινητικότητα: η διαχείριση της θέσης και της μεταβίβασης. Με τη διαχείριση των τοποθεσιών, το σύστημα ανιχνεύει και εντοπίζει ένα κινητό τερματικό για πιθανή σύνδεση. Η τοποθεσία διαχείρισης περιλαμβάνει το χειρισμό όλων των πληροφοριών σχετικά με τα τερματικά περιαγωγής, όπως πρωτότυπο και πληροφορίες ελέγχου ταυτότητας κλπ.

Από την άλλη πλευρά, η διαχείριση μεταβιβάσεως διατηρεί συνεχή επικοινωνία όταν το τερματικό περιπλανιέται. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των επερχόμενων τεχνικών ράδιο πρόσβασης και της περαιτέρω εξέλιξης του υφιστάμενου συστήματος, η τρίτη γενιά (3GPP) είχε θέσει τα θεμέλια για το Long Term Evolution (LTE) προηγμένο πρότυπο του 3GPP για 4G. Οι τιμές-στόχοι της απόδοσης ραδιοφάσματος κορυφής για τα LTE Advanced συστήματα τέθηκαν στα 30bps / Hz και 15 Bps / Hz σε κάτω και άνω ζεύξης μετάδοσης αντίστοιχα.



Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τεχνολογιών 1G, 2G, 3G και 4G.



Σχήμα 2. Υπηρεσίες που παρέχει η τεχνολογία 4G



Τεχνολογία	1G	2G	3G	4G
<b>Χαρακτηριστικά</b>				
<b>Χρόνος Ανάπτυξης</b>	1970 – 1980	1990 – 2004	2004-2010	τώρα
<b>Εύρος Ζώνης Δεδομένων</b>	2kbps	64kbps	2Mbps	1 Gbps
<b>Τεχνολογία</b>	Αναλογική Κυτταρική	Ψηφιακή Κυτταρική	CDMA 2000 (1xRTT, EVDO) UMTS, EDGE	Wi-Max LTE Wi-Fi
<b>Υπηρεσία</b>	Κινητή Τηλεφωνία (Φωνή)	Ψηφιακή Φωνή, SMS, Υψηλότερα χωρητικότητας πακετοποιημένα δεδομένα	Ενσωματωμένος ήχος υψηλής ποιότητας, βίντεο και δεδομένα	Δυναμική Πρόσβαση στις πληροφορίες, Wearable συσκευές
<b>Πολυπλεξία</b>	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA
<b>Switching</b>	Κύκλωμα	Κύκλωμα, Πακέτο	Πακέτο	Όλα τα πακέτα
<b>Core Network</b>	PSTN	PSTN	Packet N/W	Internet

Πίνακας 1. Σύγκριση των γενιών ασύρματων επικοινωνιών



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### 2 Η Τεχνολογία LTE

#### 2.1 Γενικά

Η τεχνολογία LTE (Long-Term Evolution) σχεδιάστηκε από την συνεργασία των προτύπων των εθνικών και περιφερειακών οργανισμών τυποποίησης τηλεπικοινωνιών, γνωστή ως τρίτη γενιά Partnership Project (3GPP).

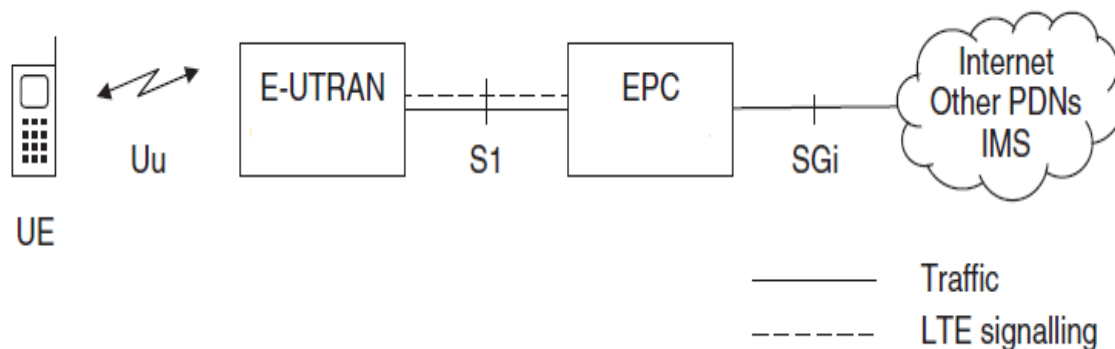
Βασικές απαιτήσεις της τεχνολογίας LTE είναι η υποστήριξη υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου, μειωμένες καθυστερήσεις όσον αφορά το χρόνο εγκατάστασης σύνδεσης, μειωμένη καθυστέρηση μετάδοσης, αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ακόμα και στα όρια της κυψέλης ώστε να εξασφαλίζεται ομοιομορφία στην παροχή υπηρεσιών, μειωμένο κόστος ανά bit, μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση του φάσματος στις νέες και στις υπάρχουσες συχνότητες λειτουργίας και απλοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου. Όσον αφορά την διαλειτουργικότητα, δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα και με συστήματα κινητών επικοινωνιών, υποστήριξη δυνατότητας μεταπομπής (handover) από και προς τα συστήματα αυτά, λογική κατανάλωση ενέργειας στις κινητές τερματικές συσκευές, σημαντική μείωση της διαδρομής καθυστέρησης από το χρήστη έως το σταθμό βάσης (στα 5ms-10ms).

Όσον αφορά την κινητικότητα, δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χλμ/ώρα) καθώς και υποστήριξη χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.

Η τεχνολογία LTE χρησιμοποιεί all-IP αρχιτεκτονική με καθορισμένες διασυνεργασίες με συστήματα μεταγωγής κυκλώματος. Επιπλέον, τα ανεπτυγμένα 3GPP συστήματα εισήγαγαν μία υβριδική αρχιτεκτονική κινητών δικτύων που υποστηρίζει τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης και αρκετούς μηχανισμούς κινητικότητας.

Το 2004, το 3GPP ξεκίνησε μια μελέτη σχετικά με τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του UMTS. Ο στόχος ήταν να διατηρηθούν τα συστήματα κινητής επικοινωνίας 3GPP ανταγωνιστικά σε ένα χρονοδιαγράμματα τουλάχιστον 10 ετών. Το Σχήμα 3 δείχνει την αρχιτεκτονική της τεχνολογίας LTE.

Το καθένα από τα UE, E-UTRAN και EPC έχει την δική του εσωτερική αρχιτεκτονική.



Σχήμα 3. Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του LTE/SAE, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

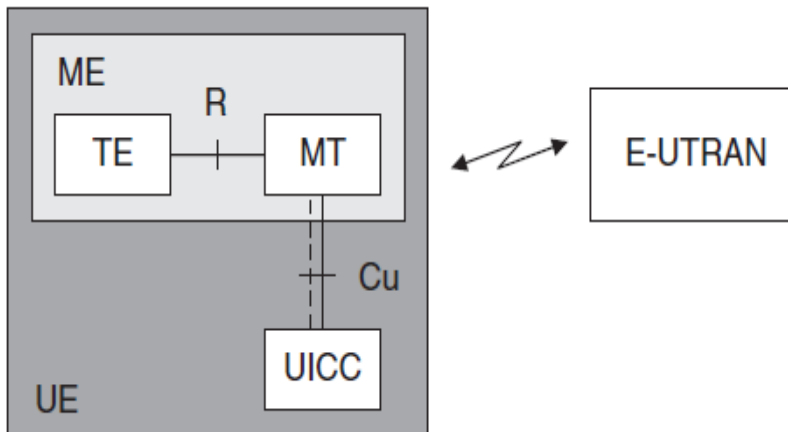
## 2.2 Εξοπλισμός Χρήστη

### 2.2.1 Αρχιτεκτονική του Εξοπλισμού Χρήστη (UE)

Το Σχήμα 4 δείχνει την εσωτερική αρχιτεκτονική του εξοπλισμού χρήστη. Η αρχιτεκτονική του είναι παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται από το UMTS και το GSM. Η πραγματική συσκευή επικοινωνίας είναι γνωστή ως κινητός εξοπλισμός (mobile equipment -ME). Ο κινητός εξοπλισμός διαιρείται σε δύο συνιστώσες, δηλαδή το τερματισμό κινητού (mobile termination -MT), το οποίο χειρίζεται όλες τις λειτουργίες επικοινωνίας, και τον τερματικό εξοπλισμό (terminal equipment -TE), το οποίο τερματίζει τις ροές δεδομένων. Το MT μπορεί να είναι μία plug-in κάρτα LTE για ένα φορητό υπολογιστή, για παράδειγμα, θεωρούμε ως τερματικό εξοπλισμό το ίδιο το laptop.

Η universal integrated circuit card (UICC) είναι μια έξυπνη κάρτα, κοινώς γνωστή ως κάρτα subscriber identity module (SIM). Τρέχει μια εφαρμογή γνωστή ως universal subscriber identity module (USIM), η οποία αποθηκεύει τα δεδομένα του συγκεκριμένου χρήστη, όπως ο αριθμός τηλεφώνου και η ταυτότητα του οικιακού δικτύου του χρήστη. Μερικά από τα δεδομένα σχετικά με την USIM μπορούν να κατεβούν από τους διακομιστές διαχείρισης συσκευών που διαχειρίζεται ο φορέας εκμετάλλευσης του δικτύου. Η USIM διεξάγει επίσης διάφορους υπολογισμούς που αφορούν την ασφάλεια της επικοινωνίας.

Ένα κινητό λαμβάνει μια διεύθυνση IP για κάθε πακέτο δεδομένων δικτύου που επικοινωνεί με αυτό, για παράδειγμα, ένα για το διαδίκτυο και ένα για κάθε ιδιωτικό εταιρικό δίκτυο. Εναλλακτικά, το κινητό μπορεί να λάβει μια διεύθυνση IPv4, καθώς και μια διεύθυνση IPv6, αν το κινητό και το δίκτυο υποστηρίζουν τις δύο εκδόσεις του πρωτοκόλλου.



Σχήμα 4. Εσωτερική αρχιτεκτονική του UE, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

### 2.3 Αρχιτεκτονική Μοντέλου Αναφοράς (EPS)

Το σχήμα 5 δείχνει το μοντέλο αναφοράς δικτύου LTE, το οποίο είναι μια λογική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Το μοντέλο αναφοράς δικτύου προσδιορίζει τις λειτουργικές οντότητες της αρχιτεκτονικής και τα σημεία αναφοράς μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων με τις οποίες επιτυγχάνεται η διαλειτουργικότητα.

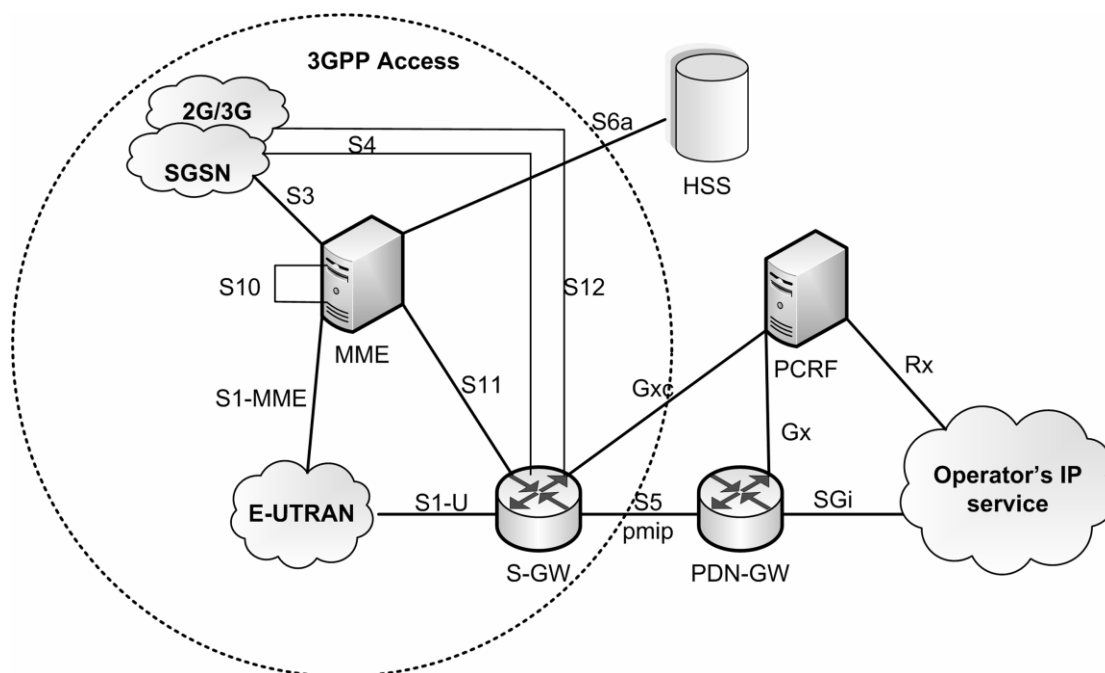
Η συνολική αρχιτεκτονική έχει δύο ξεχωριστές συνιστώσες: το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (access network) και το δίκτυο κορμού (core network).

Το δίκτυο πρόσβασης είναι το Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN).

Ο κορμός του δικτύου ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC).

Τα E-UTRAN και EPC μαζί αποτελούν το Evolved Packet System (EPS).





Σχήμα 5. LTE μοντέλο αναφοράς, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

Τόσο το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης όσο και το δίκτυο κορμού μπορούν να επιτύχουν πολλαπλές λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένου:

- Λειτουργίες Ελέγχου Πρόσβασης Δικτύου (Network Access Control Functions)
- Δρομολόγηση πακέτων και λειτουργίες μεταφοράς (Packet Routing and Transfer Functions)
- Λειτουργίες Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Functions)
- Λειτουργίες ασφαλείας (Security Functions)
- Λειτουργίες Διαχείρισης Ράδιο Πόρων (Radio Resource Management Functions)
- Λειτουργίες Διαχείρισης Δικτύου (Network Management Functions)

## 2.4 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)

### 2.4.1 Γενικά

Το E-UTRAN είναι η διεπαφή αέρα για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Είναι ένα πρότυπο δικτύου ασύρματης πρόσβασης που αντικαθιστά τις τεχνολογίες UMTS, HSDPA και HSUPA που ορίζονται στη 3GPP έκδοση 5 και πέρα. Το E-UTRAN είναι ένα νέο σύστημα διεπαφής αέρα για μεταφορά πακέτων δεδομένων. Είναι υπεύθυνο για όλες τις λειτουργίες σχετικές με το ασύρματο κομμάτι του δικτύου, όπως διαχείριση των ασύρματων πόρων και η συμπύεση επικεφαλίδων, ώστε να



εξασφαλιστεί η αποδοτική χρήση της ασύρματης διεπαφής, η ασφάλεια και η συνδεσιμότητα με το EPC.

Χρησιμοποιεί ραδιό πρόσβαση OFDMA για την κατερχόμενη ζεύξη και SC-FDMA για την ανερχόμενη ζεύξη.

Το E-UTRAN στην αρχιτεκτονική LTE αποτελείται από ένα μόνο κόμβο, δηλαδή, το eNodeB που διασυνδέεται με το επίπεδο χρήστη (UE). Ο στόχος αυτής της απλούστευσης είναι να μειώσει την καθυστέρηση όλων των εργασιών ράδιο διεπαφής. Οι eNodeBs συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2, και στην συνέχεια συνδέονται με το δίκτυο κορμού μέσω της διεπαφής S1. Οι διεπαφές X2 και S1 παρουσιάζονται στο σχήμα 6.

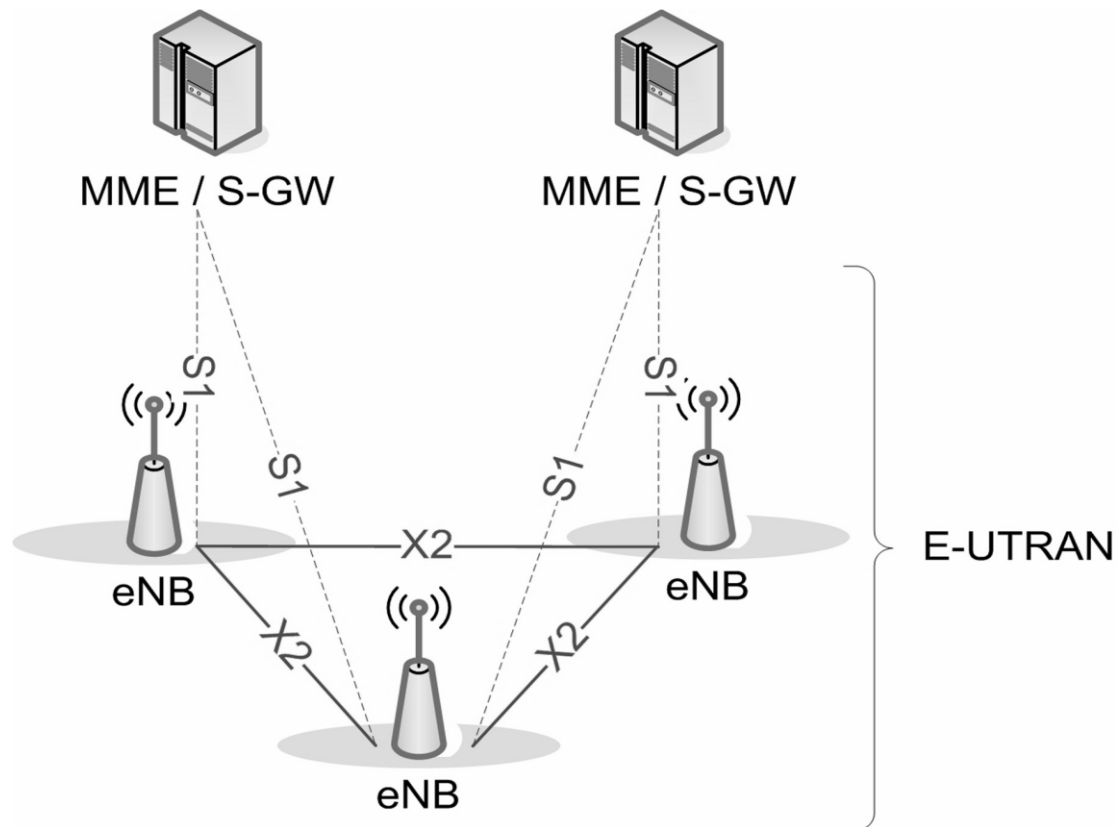
#### 2.4.2 Αρχιτεκτονική του E-UTRAN

Κάθε eNB (Evolved Node B) είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει τα κινητά σε μια ή περισσότερες κυψέλες. Ένα κινητό επικοινωνεί με ένα μόνο σταθμό βάσης και μία κυψέλη κάθε στιγμή. Ο σταθμός βάσης που επικοινωνεί με ένα κινητό μια δεδομένη στιγμή ονομάζεται serving eNB.

Ο eNB έχει δύο κύριες λειτουργίες. Πρώτον, ο eNB στέλνει ράδιο μεταδόσεις σε όλα τα κινητά στην κάτω ζεύξη και δέχεται μεταδόσεις από αυτούς στην άνω ζεύξη, με τη χρήση αναλογικών και ψηφιακών λειτουργιών επεξεργασίας σήματος της ραδιοεπαφής LTE. Δεύτερον, ο eNB ελέγχει τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου όλων των κινητών τηλεφώνων του, με την αποστολή μηνυμάτων, όπως εντολές μεταβίβασης που αφορούν τις ραδιο μεταδόσεις σηματοδότησης.

Κάθε σταθμός βάσης συνδέεται με το EPC μέσω της διεπαφής S1. Μπορεί επίσης να συνδέεται με τους κοντινούς σταθμούς βάσης από τη διεπαφή X2, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαβίβαση σηματοδότησης και πακέτων κατά τη μεταπομπή.

Στο σχήμα 6 αναπαριστάται η αρχιτεκτονική E-UTRAN.



Σχήμα 6. Αρχιτεκτονική E-UTRAN, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

### 2.4.3 Πρωτόκολλα Αρχιτεκτονικής E-UTRAN

Ένα γενικό πρωτόκολλο αρχιτεκτονικής του E-UTRAN (Σχήμα 7) χωρίζει τη ραδιο διεπαφή σε τρία στρώματα: στο φυσικό στρώμα ή στρώμα 1 (Layer 1), στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (Layer 2), και στο στρώμα δικτύου ή (Layer 3).

Σκοπός της στοίβας πρωτοκόλλων είναι να ρυθμίσει τις υπηρεσίες ώστε να οργανώσουν τις πληροφορίες που μεταδίδουν μέσω λογικών καναλιών και να αντιστοιχήσει αυτά τα λογικά κανάλια σε κανάλια μεταφοράς ώστε να μπορεί να ελέγχει πώς και με ποια χαρακτηριστικά η πληροφορία μέσα σε κάθε λογικό κανάλι μεταδίδεται μέσω της ασύρματης διεπαφής. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε κανάλι μεταφοράς υπάρχει μία ή περισσότερες μορφές μεταφοράς συνδεδεμένη, η κάθε μία από τις οποίες ορίζεται από την κωδικοποίηση και αντιστοίχιση πάνω στο φυσικό κανάλι. Κάθε στρώμα χαρακτηρίζεται από τις υπηρεσίες που παρέχει στα ανώτερα στρώματα ή τις οντότητες και τις λειτουργίες που υποστηρίζουν ως εξής:

- Φυσικό στρώμα: Μεταφέρει όλες τις πληροφορίες από τα κανάλια μεταφοράς MAC (Medium Access Control) μέσω της εναέριας διεπαφής. Φροντίζει για την προσαρμογή ζεύξης, τον έλεγχο της ισχύος, την αναζήτηση κυψελών (για την αρχικό συγχρονισμό και την μεταπομπή), και άλλες μετρήσεις (εντός του συστήματος LTE και μεταξύ των συστημάτων) για το στρώμα RRC (Radio Resource Control).

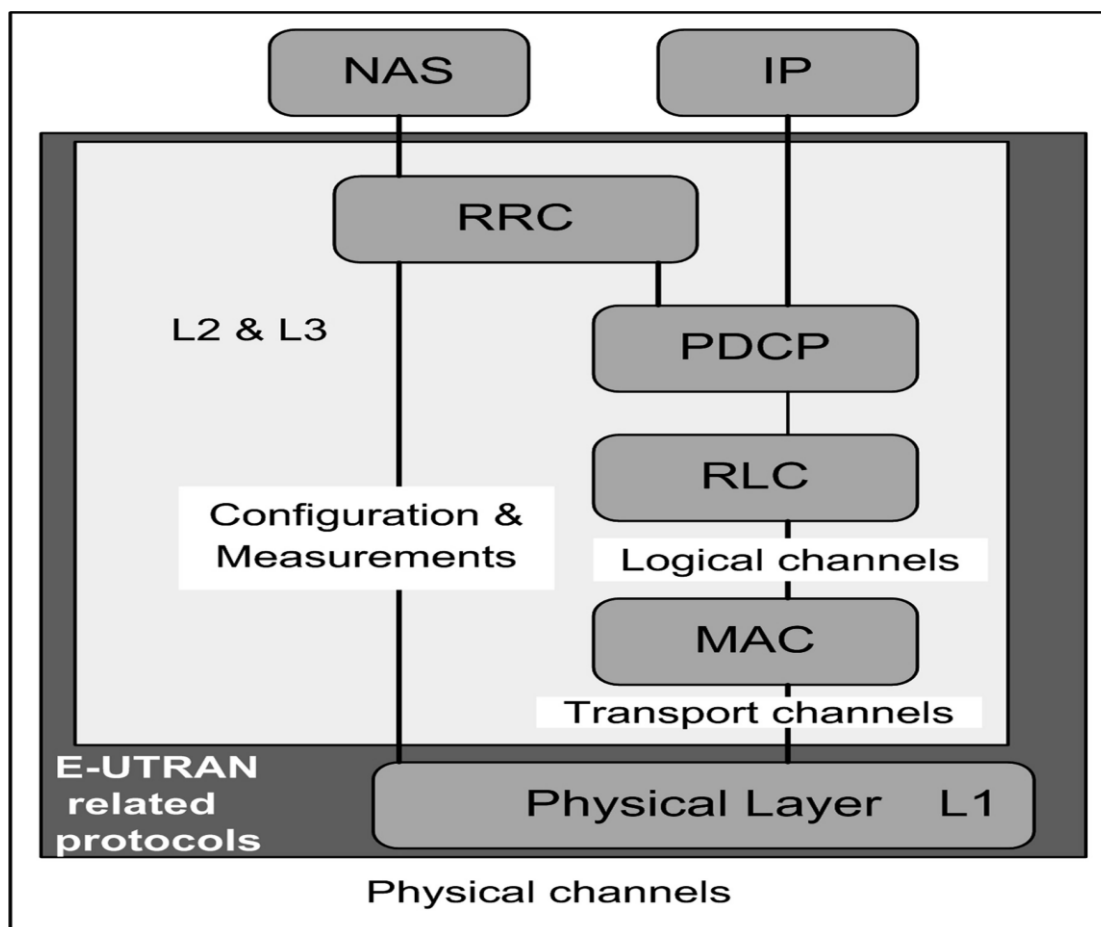


- Κανάλι μεταφοράς MAC (Medium Access Control): Το υπόστρωμα MAC προσφέρει ένα σύνολο λογικών καναλιών στο υπόστρωμα RLC (Radio Link Control) που πολυπλέκει μέσα στα φυσικού επιπέδου κανάλια μεταφοράς. Επίσης, διαχειρίζεται τη διόρθωση σφαλμάτων HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), χειρίζεται την ιεράρχηση των λογικών καναλιών για τον ίδιο UE και τον δυναμικό προγραμματισμό μεταξύ UEs, κ.λπ.
- RLC (Radio Link Control): Μεταφέρει τα PDUs (Protocol Data Unit) του PDCP (Packet Data Convergence Protocol). Μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με την αξιοπιστία που παρέχεται. Ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργεί μπορεί να προσφέρει ARQ (Automatic Repeat Request) διόρθωση των σφαλμάτων, κατάτμηση / συνένωση των PDUs, αναδιάταξη για παράδοση σε σειρά, διπλή ανίχνευση, κ.λπ.
- PDCP (Packet Data Convergence Protocol): Για το στρώμα RRC (Radio Resource Control) παρέχει μεταφορά των δεδομένων του με την κρυπτογράφηση και την ακεραιότητα της προστασίας και για το στρώμα IP, μεταφορά των πακέτων IP, με συμπίεση κεφαλίδας ROHC (Robust Header Compression), κρυπτογράφηση, και εξαρτώμενη από το RLC λειτουργία σε σειρά παράδοσης, διπλή ανίχνευση και αναμετάδοση των δικών του SDUs (Service Data Units) κατά τη διάρκεια της παράδοσης.
- RRC (Radio Resource Control): Μεταξύ άλλων φροντίζει για τις μεταδίδομενες πληροφορίες συστήματος που σχετίζονται με το στρώμα πρόσβασης και μεταφοράς των Non-Access Stratum (NAS) μηνυμάτων, σελιδοποίηση κ.λπ.

Από την άλλη πλευρά, τα διασυνδεδεμένα στρώματα στη στοίβα πρωτοκόλλου E-UTRAN είναι τα ακόλουθα:

- NAS (Non-access stratum): Πρωτόκολλο μεταξύ του UE και του MME (Mobility Management Entity) στην πλευρά του δικτύου (έξω από το E-UTRAN). Μεταξύ άλλων πραγματοποιεί τον έλεγχο του UE και ελέγχου της ασφάλειας και δημιουργεί ένα μέρος των μηνυμάτων σελιδοποίησης.
- Το στρώμα IP (Internet Protocol).

Το σχήμα 7 παρουσιάζει τα τρία στρώματα του πρωτοκόλλου LTE.



Σχήμα 7. Στρώματα πρωτοκόλλου LTE, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

## 2.5 Evolved Packet Core (EPC)

### 2.5.1 Γενικά

Το EPC είναι ένα νέο, υψηλής απόδοσης, υψηλής χωρητικότητας all-IP δίκτυο κορμού για το LTE. Το EPC βελτιώνει την απόδοση του δικτύου με το διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων. Παρέχει υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου (Packet Switched). Υπηρεσίες όπως η φωνή όπου είναι παραδοσιακά κυκλώματα μεταγωγής (Circuit Switched (CS)), θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με τη χρήση δικτύου IP Multimedia Subsystem (IMS). Πολυπλοκότητα δικτύου είναι μειωμένα, καθώς υπάρχουν λιγότερα hops, τόσο στο επίπεδο σηματοδότησης όσο και στο επίπεδο δεδομένων. Το EPC έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει την πρόσβαση non-3GPP για κινητά IP. Για να βελτιωθεί η εύρωστη ασφάλεια του συστήματος, η ακεραιότητα της προστασίας, και η κρυπτογράφηση έχει προστεθεί στο Non-Access Stratum (NAS) επίπεδο, το οποίο είναι ένα επιπλέον στρώμα αφαίρεσης για να προστατεύσει σημαντικές πληροφορίες, όπως το κλειδί και την ασφάλεια της συνεργασίας μεταξύ 3GPP και non-3GPP δικτύου. Εκτός από τις οντότητες του δικτύου εξυπηρετεί και τα δεδομένα κίνησης. Το EPC περιλαμβάνει επίσης



οντότητες ελέγχου δικτύου για τη διατήρηση των πληροφοριών εγγραφής χρήστη που αντιπροσωπεύεται από το Home Subscriber Server (HSS), τον προσδιορισμό της ταυτότητας και των προνομίων του χρήστη και παρακολούθηση των δραστηριοτήτων του, δηλαδή, Εξουσιοδότηση, Πιστοποίηση και Λογιστική του server, και την επιβολή της χρέωσης και τις πολιτικές QoS μέσω μιας πολιτικής Policy and Charging Rules Function (PCRF).

## 2.5.2 Αρχιτεκτονική του EPC (Evolved Packet Core)

Το κύριο συστατικό της αρχιτεκτονικής SAE είναι το Evolved Packet Core (EPC) το οποίο είναι υπεύθυνο για τον συνολικό έλεγχο του UE και για την εγκατάσταση των bearers και αποτελείται από τα ακόλουθα λειτουργικά στοιχεία:

- Home Subscription Server (HSS) είναι μια κεντρική βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές διαχειριστές δικτύου. Καταγράφει επίσης την θέση του χρήστη στο επίπεδο του επισκεπτόμενου κόμβου. Αυτό είναι ένα από τα λίγα στοιχεία του LTE που έχει μεταφερθεί από το UMTS και το GSM.
- Packet data network gateway (P-GW) είναι το σημείο επαφής του EPC με τον έξω κόσμο. Μέσω της διεπαφής SGi, κάθε PDN (Packet Data Network) πύλη ανταλλάσσει δεδομένα με μία ή περισσότερες εξωτερικές συσκευές ή δίκτυα πακέτων δεδομένων, όπως οι διακομιστές του διαχειριστή δικτύου, του διαδικτύου ή του υποσυστήματος πολυμέσων IP. Κάθε δίκτυο πακέτων δεδομένων προσδιορίζεται από ένα όνομα σημείου πρόσβασης (APN- Access Point Name). Ο διαχειριστής του δικτύου τυπικά χρησιμοποιεί μια σειρά διαφορετικών APN, για παράδειγμα, ένα για το Διαδίκτυο και ένα για το υποσύστημα πολυμέσων IP.

Κάθε κινητό έχει εκχωρηθεί σε μια προεπιλεγμένη πύλη PDN όταν ενεργοποιείται για πρώτη φορά ώστε να δίνει συνεχή συνδεσιμότητα με ένα δίκτυο δεδομένων προεπιλεγμένων πακέτων όπως το διαδίκτυο.

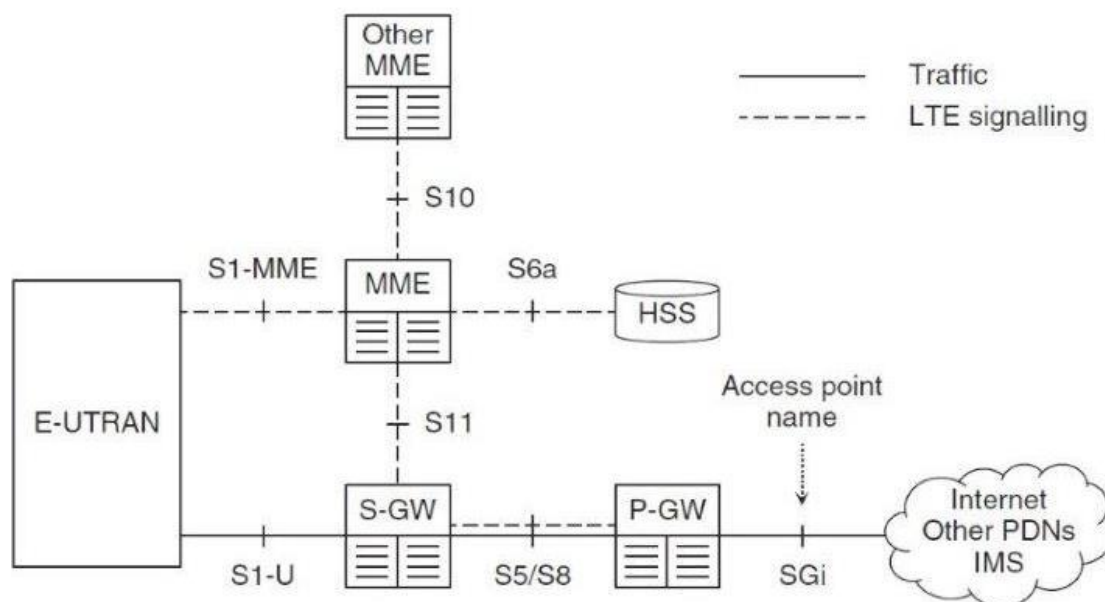
- Serving gateway (S-GW) ενεργεί ως δρομολογητής υψηλού επιπέδου, και τα δεδομένα διαβιβάζονται μεταξύ του σταθμού βάσης και της πύλης PDN. Ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει μια σειρά από serving gateways. Κάθε κινητό έχει ανατεθεί σε μια serving gateway. Η serving gateway μπορεί να αλλάξει αν το κινητό κινείται αρκετά μακριά.
- Mobility management entity (MME): ελέγχει τη λειτουργία υψηλού επιπέδου του κινητού, στέλνοντας μηνύματα σηματοδότησης για θέματα όπως η ασφάλεια και η διαχείριση των ροών δεδομένων που έχουν σχέση με τις ραδιοεπικοινωνίες. Όπως και με την serving gateway, ένα τυπικό δίκτυο μπορεί να περιέχει ελάχιστα MMEs. Κάθε κινητό έχει ανατεθεί σε ένα ενιαίο MME, το οποίο είναι γνωστό ως serving MME, αλλά αυτό μπορεί να αλλάξει αν το κινητό κινείται αρκετά μακριά. Ο MME ελέγχει επίσης τα άλλα στοιχεία του δικτύου, μέσω των μηνυμάτων σηματοδότησης που είναι εσωτερικά στο EPC.



Συγκρίνοντας με το UMTS και GSM φαίνεται ότι η πύλη PDN έχει τον ίδιο ρόλο με τον κόμβο υποστήριξης πύλης GPRS (GGSN), ενώ η εν ενεργεία πύλη και το MME (Mobility management entity) χειρίζεται την δρομολόγηση των δεδομένων και τις λειτουργίες σηματοδότησεως του κόμβου εξυπηρέτησης GPRS (SGSN). Ο διαχωρισμός της SGSN (Serving GPRS Support Node) σε δύο, καθιστά ευκολότερη την αναβάθμιση του δικτύου σε απόκριση του αυξημένου φορτίου: ο χειριστής μπορεί να προσθέσει περισσότερες πύλες εξυπηρέτησης καθώς η κυκλοφορία αυξάνεται, ενώ προσθέτει περισσότερα MMEs για να χειριστεί την αύξηση του αριθμού των κινητών τηλεφώνων. Για την υποστήριξη αυτού του διαχωρισμού, η διασύνδεση S1 έχει δύο εξαρτήματα: η διασύνδεση S1-U μεταφέρει την κυκλοφορία για την πύλη εξυπηρέτησης, η διασύνδεση S1-MME μεταφέρει τα μηνύματα σηματοδοσίας για την MME.

Το EPC έχει κάποια άλλα στοιχεία τα οποία δεν φαίνεται στο Σχήμα 8, όπως το cell broadcast centre (CBC), το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από το UMTS για την υλοποιημένη υπηρεσία εκπομπής κυψέλης (cell broadcast service (CBS)). Καθώς και το equipment identity register (EIR) το οποίο κληρονομήθηκε από το UMTS, και απαριθμεί τις λεπτομέρειες των χαμένων ή κλεμμένων κινητών τηλεφώνων.

Το σχήμα 8 δείχνει τα κύρια στοιχεία του evolved packet core.



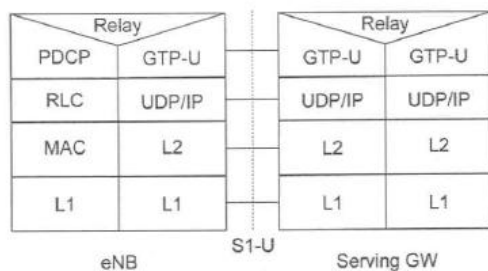
Σχήμα 8. Κύρια στοιχεία του evolved packet core, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).



## 2.6 Διεπαφές του Δικτύου E-UTRAN

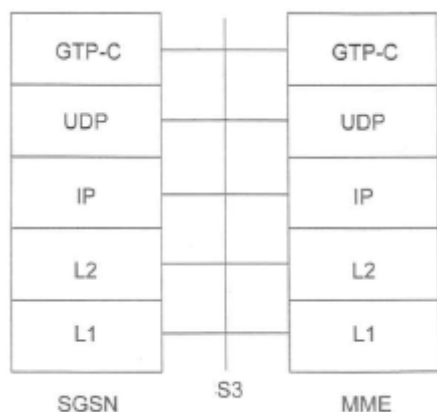
Οι παρακάτω διεπαφές έχουν καθοριστεί για το EPC:

-S1-U, τελικό σημείο E-UTRAN και S-GW (Serving gateway): Αυτή η διεπαφή ενεργοποιεί την πύλη S-GW από το anchor στην inter eNB μεταπομπή (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. Διεπαφή S1-U.

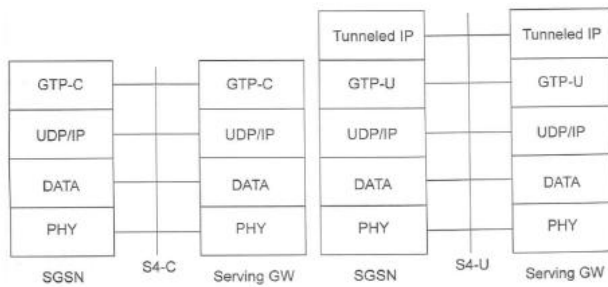
-S3, τελικό σημείο MME (Mobility management entity) και SGSN (Serving GPRS Support Node): Επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της inter-3GPP πρόσβασης δικτύων στην αναμονή ή / την ενεργή κατάσταση (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Διεπαφή S3

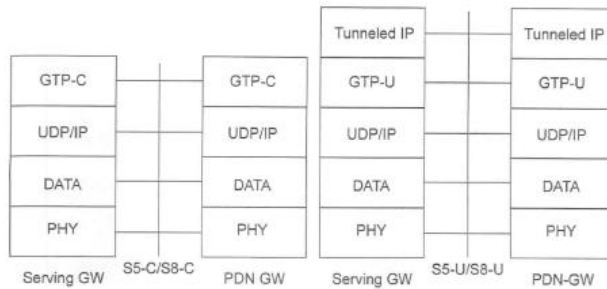
-S4, τελικό σημείο S-GW (Serving gateway) και SGSN (Serving GPRS Support Node): Παρέχει τον έλεγχο και την υποστήριξη στο επίπεδο χρήστη όσον αφορά την κινητικότητα μεταξύ του πυρήνα GPRS και της πύλης εξυπηρέτησης S-GW (Σχήμα 11).





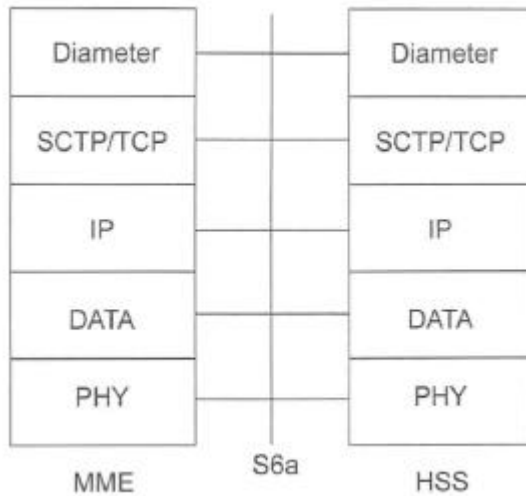
Σχήμα 11. Διεπαφή S4

-S5, τελικό σημείο S-GW (Serving gateway) και PDN-GW: Χρησιμοποιείται για την S-GW μετεγκατάσταση λόγω της UE κινητικότητας και ελέγχει αν το S-GW πρέπει να συνδεθεί με ένα non-collocated PDN-GW για την απαιτούμενη συνδεσιμότητα PDN (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Διεπαφή S5

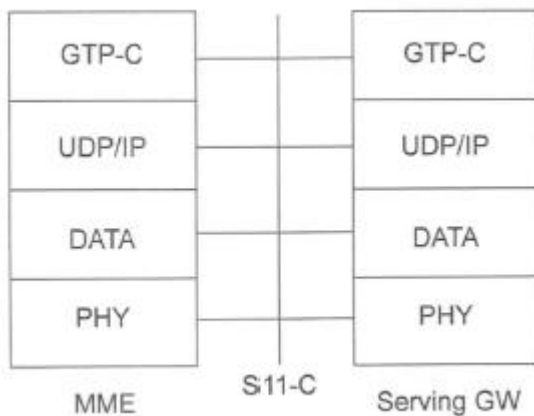
-S6a, τελικό σημείο MME (Mobility management entity) και HSS (Home subscriber server): Καθιστά δυνατή τη μεταφορά των δεδομένων εγγραφής και πιστοποίησης για την πιστοποίηση και την έγκριση της πρόσβασης των χρηστών μεταξύ των MME και HSS (Σχήμα 13).



Σχήμα 13. Διεπαφή S6a

-S10, τελικό σημείο MME και MME: Για MME μετεγκατάσταση και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των MME.

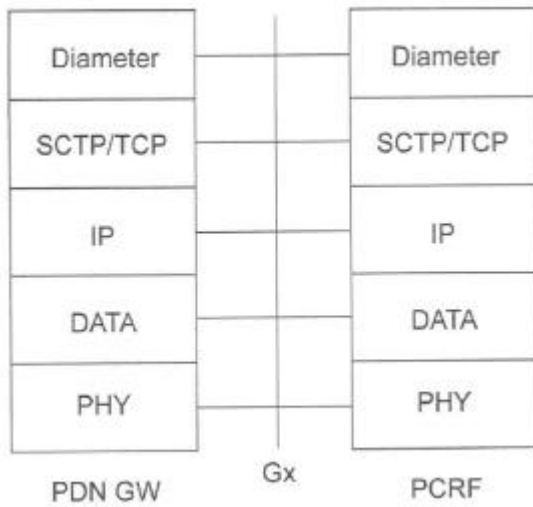
-S11, τελικό σημείο MME and S-GW: Αναγκαίο για την διαχείριση του EPS φορέα (Σχήμα 14).



Σχήμα 14. Διεπαφή S11

-S12, τελικό σημείο UTRAN και S-GW: Για user plane tunneling, όταν ένα άμεσο tunnel είναι εγκατεστημένο

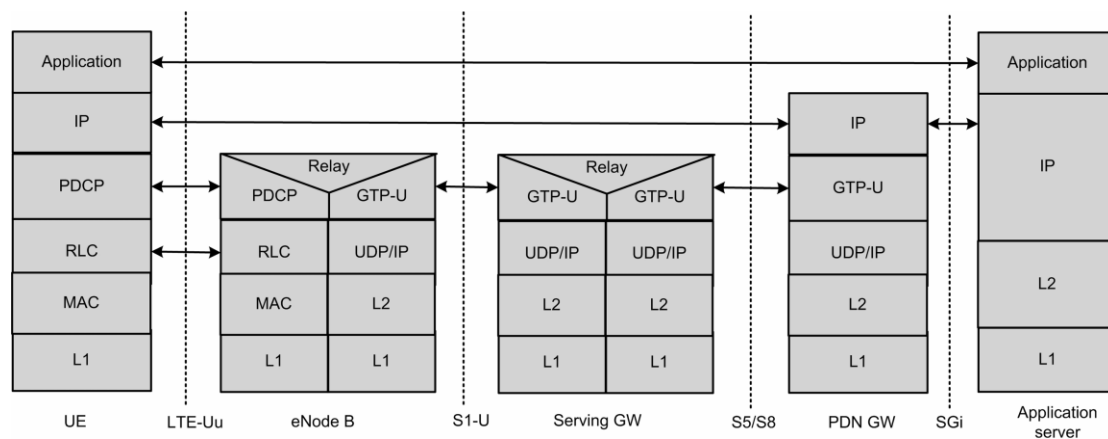
-Gx, τελικό σημείο PCRF (Policy and charging rule function) και PDN-GW: Παρέχει μεταφορά της πολιτικής QoS (Quality of service) και κανόνες χρέωσης στη Policy and Charging Enforcement Function (PCEF) μέσα στην PDN Πύλη (Σχήμα 15).



Σχήμα 15. Διεπαφή Gx

-SGi, τελικό σημείο PDN-GW και PDN: Το PDN μπορεί να είναι ένας χειριστής – εξωτερικού δημόσιου ή ιδιωτικού δικτύου δεδομένων πακέτου ή ένα δίκτυο πακέτων δεδομένων ενδο-φορέα, π.χ., για την παροχή των υπηρεσιών IMS.

-Rx, τελικό σημείο PCRF και PDN: Το σημείο αναφοράς Rx βρίσκεται μεταξύ του AF και του PCRF.



Σχήμα 16. User plane και end-to-end protocol stack, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

Η διασύνδεση S1 μπορεί να λειτουργήσει πάνω σε διάφορες τεχνολογίες Layer 1 / Layer 2, π.χ., καλώδια οπτικών ινών, οι leased γραμμές (χαλκός), ή μικροκυματικές ζεύξεις.

Το σχήμα 16 δείχνει ένα παράδειγμα TCP / IP-based εφαρμογών, όπως ο web browsing. Οι αντίστοιχες οντότητες λειτουργούν στον UE και στον εξυπηρετητή



server που φιλοξενεί τη web εφαρμογή. Για λόγους απλότητας, οι peer protocol οντότητες του διακομιστή έλκονται στη Serving Gateway (S-GW), ωστόσο, τοποθετούνται κάπου στο Internet.

Όλες οι πληροφορίες που αποστέλλονται και λαμβάνονται από τον UE, όπως η κωδικοποιημένη φωνή σε μια φωνητική κλήση ή τα πακέτα σε μια σύνδεση στο Internet, μεταφέρονται μέσω του επιπέδου χρήστη. Η κίνηση του επιπέδου ελέγχου επεξεργάζεται σε διάφορα ιεραρχικά επίπεδα, από τον eNodeB έως το κεντρικό δίκτυο (EPC). Επίσης, ο έλεγχος της κυκλοφορίας συνδέεται στενά με το επίπεδο χρήστη. Ανεξάρτητα από τους λόγους πίσω από την τρέχουσα ιεραρχική αρχιτεκτονική, για τη ραχοκοκαλιά της μετάδοσης, θα σημαίνει ότι όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο της ιεραρχίας του δικτύου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της συσσωρευμένης κυκλοφορίας που θα προκύψει.

## 2.7 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

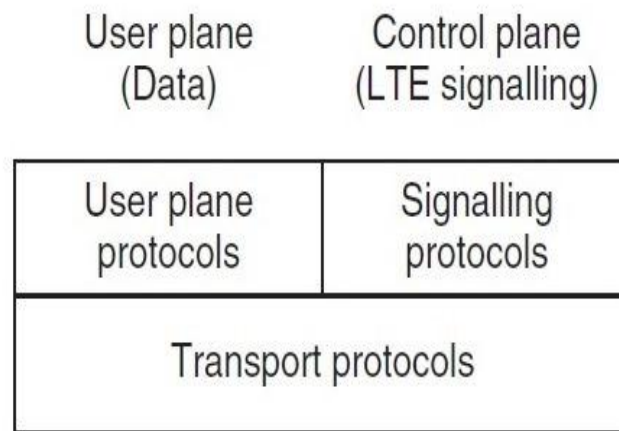
### 2.7.1 Μοντέλο Πρωτοκόλλου

Κάθε μία από τις διασυνδέσεις συνδέεται με μια στοίβα πρωτοκόλλων, της οποίας τα στοιχεία του δικτύου χρησιμοποιούν για να ανταλλάσσουν δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης. Το σχήμα 17 δείχνει τη δομή υψηλού επιπέδου των στοιβών πρωτοκόλλων.

Η στοίβα πρωτοκόλλων έχει δύο επίπεδα. Τα Πρωτόκολλα στο επίπεδο ελέγχου χειρίζονται δεδομένα τα οποία ενδιαφέρουν τους χρήστες, ενώ τα πρωτόκολλα στο control plane χειρίζονται μηνύματα σηματοδότησης οποία ενδιαφέρουν μόνο τα στοιχεία του δικτύου. Η στοίβα πρωτοκόλλου έχει επίσης δύο κύρια στρώματα: Το ανώτερο στρώμα το οποίο χειρίζεται πληροφορίες με έναν τρόπο που είναι ειδικό για LTE, και το κατώτερο στρώμα που μεταφέρει πληροφορίες από το ένα σημείο στο άλλο. Δεν υπάρχουν παγκόσμια ονόματα για αυτά τα στρώματα, αλλά στο E-UTRAN είναι γνωστά ως radio network layer και transport network layer αντίστοιχα.

Υπάρχουν τρία είδη πρωτοκόλλων:

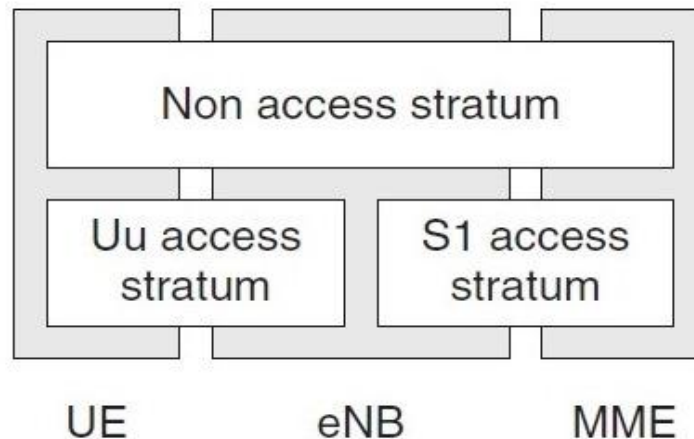
- Τα Πρωτόκολλα Σηματοδότησης τα οποία ορίζουν μια γλώσσα με την οποία δύο συσκευές μπορούν να ανταλλάσσουν μηνύματα σηματοδότησης μεταξύ τους.
- Τα Πρωτόκολλα Επιπέδου ελέγχου τα οποία χειρίζονται τα δεδομένα στο επίπεδο του χρήστη, ώστε να βοηθήσει τη δρομολόγηση των δεδομένων εντός του δικτύου.
- Τα Πρωτόκολλα μεταφοράς μεταφέρουν δεδομένα και μηνύματα σηματοδότησης από το ένα σημείο στο άλλο.



Σχήμα 17. Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου Πρωτοκόλλων του LTE, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

Στη ραδιοεπαφή υπάρχει ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 18. Το MME ελέγχει τη συμπεριφορά υψηλού επιπέδου του κινητού αποστέλλοντας μηνύματα σηματοδότησης. Ωστόσο, δεν υπάρχει άμεση διαδρομή μεταξύ του MME και του κινητού, μέσω των οποίων μπορούν να μεταφέρονται τα μηνύματα.

Η διεπαφή αέρα υποδιαιρείται σε δύο επίπεδα, που είναι γνωστά ως access stratum (AS) και non-access stratum (NAS). Τα μηνύματα σηματοδότησης υψηλού επιπέδου βρίσκονται στο στρώμα non-access και μεταφέρονται χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα πρόσβασης των S1 και Uu διεπαφών.

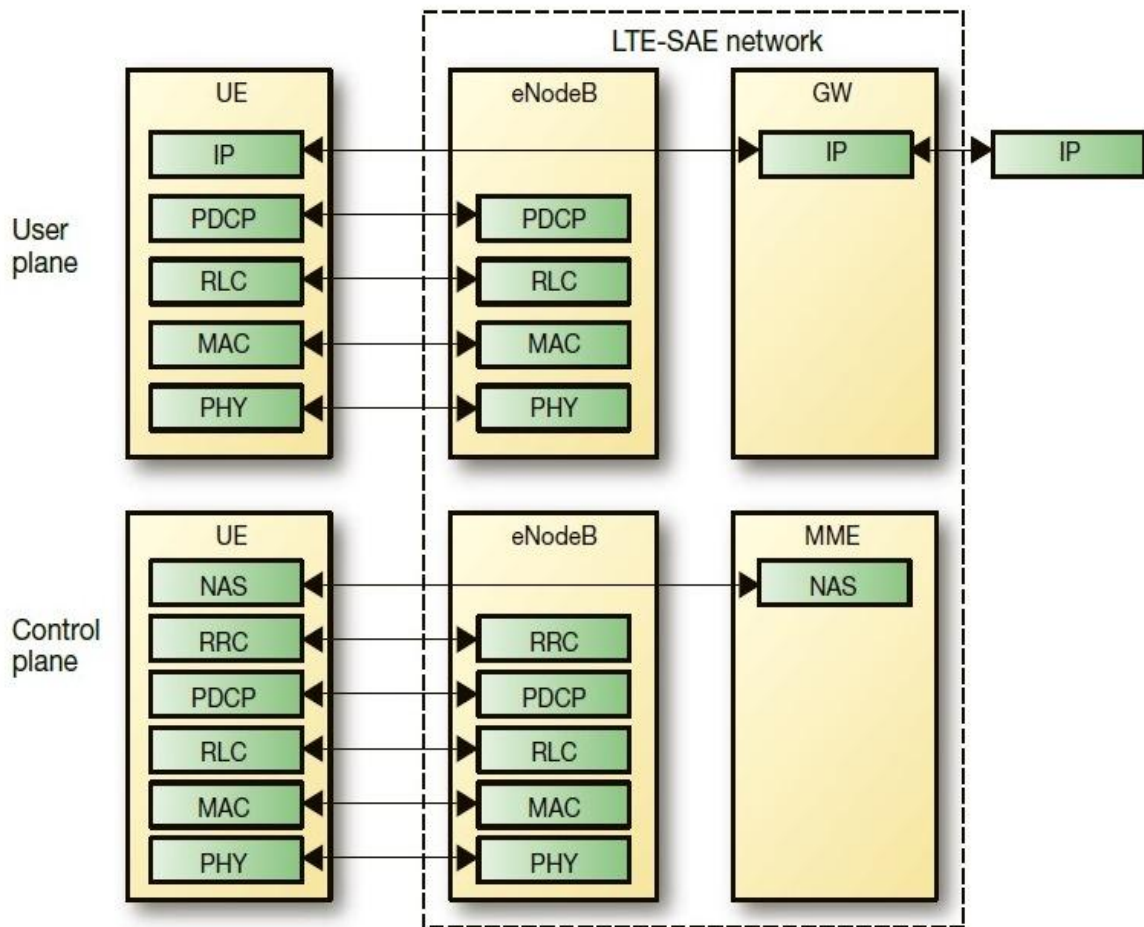


Σχήμα 18. Σχέση μεταξύ του access και του non-access stratum, (πηγή: . **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

### 2.7.2 Radio Interface Πρωτόκολλα

Η αρχιτεκτονική των radio πρωτοκόλλων για το LTE μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες ομάδες ανάλογα με τον τελικό σκοπό της υπηρεσίας: η αρχιτεκτονική του επιπέδου χρήστη (user plane) και η αρχιτεκτονική του επιπέδου ελέγχου (control plane). Το πρώτο φέρει δεδομένα του χρήστη μέσω του στρώματος πρόσβασης και το δεύτερο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των συνδέσεων μεταξύ του UE, του δικτύου και των ασύρματων φορέων (radio bearers). Παρά το γεγονός ότι ο διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου χρήστη είναι ίσως ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα του σχεδιασμού LTE, η πλήρης ανεξαρτησία των στρωμάτων δεν είναι εφικτή, διότι, χωρίς την αλληλεπίδραση μεταξύ τους, οι διαχειριστές δεν είναι σε θέση να ελέγξουν το QoS (Quality of Service), και την πηγή /προορισμό της κυκλοφορίας των μέσων, και δεν υπάρχει και η δυνατότητα ελέγχου για το πότε το μέσο ξεκινάει και σταματάει.

Στο σχήμα 19 φαίνεται η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων του radio interface.



Σχήμα 19. Αρχιτεκτονική του ραδιο interface πρωτοκόλλου-Επίπεδο ελέγχου και Χρήστη, (πηγή: **LTE-SAE architecture and performance**, Per Beming, Lars Frid, Göran Hall, Peter Malm, Thomas Noren, Magnus Olsson and Göran Rune).

### 2.7.2.1 Packet Data Convergence Protocol Layer (PDCPL)

Το PDCP επίπεδο είναι υπεύθυνο για τις παρακάτω λειτουργίες:

1- Συμπίεση και αποσυμπίεση κεφαλίδας για όλα τα πακέτα δεδομένων στο επίπεδο χρήστη. Αυτό βασίζεται στο Robust Header Compression (RoHC) πρωτόκολλο το οποίο αποθηκεύει τα στατικά μέρη της κεφαλίδας ενημερώνοντάς τα μόνο όταν αυτά αλλάξουν. Τα δυναμικά μέρη συμπιέζονται μεταδίδοντας τη διαφορά από την αναφορά. Το RoHC είναι σημαντικό ειδικά για υπηρεσίες φωνής όπου η κεφαλίδα IP/UDP/RTP περιλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό πραγματικού μεγέθους του πακέτου. Για παράδειγμα, η IPV4 κεφαλίδα είναι 40 bytes τα οποία μπορούν να συμπεστούν σε 4-6 bytes με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη εξοικονόμηση θεωρώντας ότι το ωφέλιμο φορτίο VoIP μεταφορών είναι μόνο 32 bytes.



2- Διαχείριση μεταπομπής. εντολές και ακολουθίες PDUs κατά την διάρκεια μίας μεταπομπής από μια περιοχή κάλυψης κυψέλης σε μια άλλη. Ορίζονται δύο τύποι μεταπομπής:

- συνεχής και αδιάκοπη μεταπομπή (Seamless handover) και
- χωρίς απώλειες μεταπομπή (Lossless handover).

a. Seamless μεταπομπή: Ισχύει για τα δεδομένα επιπέδου ελέγχου και για τα δεδομένα RLC Unacknowledged Mode (UM) user plane – δεδομένα ανεκτικά σε απώλεια αλλά όχι ανεκτικά στην καθυστέρηση όπως VoIP. Ο τύπος αυτός παράδοσης είναι σχετικά απλός και σχεδιάστηκε για την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης καθώς κανένα πλαίσιο ασφαλείας δεν πρέπει να ανταλλάσσεται μεταξύ της πηγής και του eNodeB κατά τη διάρκεια μιας παράδοσης. Τα PDCP SDUs στο eNodeB που δεν έχουν μεταδοθεί προωθούνται μέσω της διασύνδεσης X2 για μετάδοση από τον κόμβο eNodeB. Τα PDCP SDUs στο UE που δεν έχουν διαβιβασθεί ρυθμίζονται και μεταδίδονται αφού η μεταπομπή ολοκληρωθεί.

b. Lossless μεταπομπή: Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανοχή στην καθυστέρηση δεδομένων αλλά οι απώλειες δεν είναι ανεκτές. Η παράδοση αυτή ισχύει για RLC Acknowledge Mode (AM) bearers. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας αριθμός ακολουθίας χρησιμοποιείται για να παρέχει χωρίς απώλειες μεταπομπή αναμεταδίδοντας PDCP PDUs που δεν έχουν αναγνωριστεί πριν από την παράδοση.

3-Εκτελεί τις υπηρεσίες κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης για τα δεδομένα επιπέδου χρήστη και ελέγχου καθώς και υπηρεσίες για την προστασία της ακεραιότητας και της επαλήθευσης των στοιχείων επιπέδου ελέγχου. Η κρυπτογράφηση προστατεύει από υποκλοπές και η προστασία της ακεραιότητας επιτρέπει την ανίχνευση της εισαγωγής ή την αντικατάσταση των πακέτων από έναν τρίτο. Συστήματα LTE μπορεί να χρησιμοποιήσουν κρυπτογράφηση AES-128. Το LTE περιλαμβάνει αμοιβαίο έλεγχο της ταυτότητας του UE και του δικτύου. Αυτό ολοκληρώνεται μέσω ενός κοινού κοινόχρηστου κλειδιού στο Authentication Center (AuC) του HSS (Home Subscriber Server) και στο USIM (Universal Subscriber Identify Module).

### 2.7.2.2 Radio Link Control (RLC)

Στη διαδρομή μετάδοσης, το RLC παίζει επαναδιαμορφώνει τα PDUs του PDCP (τμηματοποίηση / και συνένωση) για να ταιριάζει στο μέγεθος που απαιτείται από το στρώμα MAC (μπλοκ μεταφοράς - TB). Στη διαδρομή λήψης, τα RLC PDUs ανοικοδομούν το PDCP. Τα μεγέθη των TB εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του εύρους ζώνης, την απόσταση, τις απαιτήσεις ισχύος, το σχήμα διαμόρφωσης και τον τύπο της εφαρμογής. Η τμηματοποίηση και η συνένωση μπορούν να είναι παρούσες την ίδια στιγμή σε ένα RLC PDU.

Το RLC αναδιοργανώνει επίσης πακέτα που έχουν παραληφθεί από την ακολουθία κατά τη λειτουργία HARQ. Το RLC επικοινωνεί με το PDCP μέσω ενός Σημείου Πρόσβασης Εξυπηρέτησης (SAP) και με τη MAC μέσω λογικών καναλιών.





Υπάρχουν τρεις τρόποι για τη μετάδοση δεδομένων από το RLC: η Διαφανής λειτουργία (Transparent Mode -TM), η μη αναγνωρισμένη λειτουργία (Unacknowledged Mode -UM), και η αναγνωρισμένη λειτουργία (Acknowledged Mode -AM).

-Transparent Mode: Αυτή είναι μια λειτουργία προσπέλασης που αντιστοιχίζει τα RLC SDUs σε RLC PDUs και αντίστροφα, χωρίς καμία αλλαγή να έχει γίνει στα πακέτα. Χρησιμοποιείται μόνο για σηματοδότησης όπως για πληροφορίες συστήματος μετάδοσης και paging μηνύματα.

-Unacknowledged Mode: Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για την καθυστέρηση κυκλοφορίας, όπως το VoIP. Επίσης χρησιμοποιείται η λειτουργία Point to multipoint κυκλοφορία, όπως η Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS). Σε αυτή τη λειτουργία, το στρώμα εκτελεί διαχωρισμό σε τμήματα και συνένωση των RLC SDUs, αναδιάταξη και ανίχνευση RLC PDUs, και επανασυναρμολόγηση των RLC SDUs.

-Acknowledge Mode: Η λειτουργία χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει ανοχή στην καθυστέρηση (όχι σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως περιήγηση (web browsing)). Επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά δεδομένων, όπου το RLC μπορεί να μεταδώσει και να λάβει δεδομένα. Διαθέτει αυτόματη αίτηση επαναλήψεως (ARQ) για τη διόρθωση εσφαλμένων πακέτων μέσω της αναμετάδοσης των δεδομένων. Ορισμένα δεδομένα επιπέδου ελέγχου (π.χ., μηνύματα RRC) επίσης χρησιμοποιούν αυτή τη λειτουργία. Εκτός από τις λειτουργίες της κατάστασης UM, η λειτουργία RLC AM εκτελεί αναμετάδοση των PDUs επιπέδου δεδομένων RLC.

### 2.7.2.3 Medium Access Control Layer (MAC)

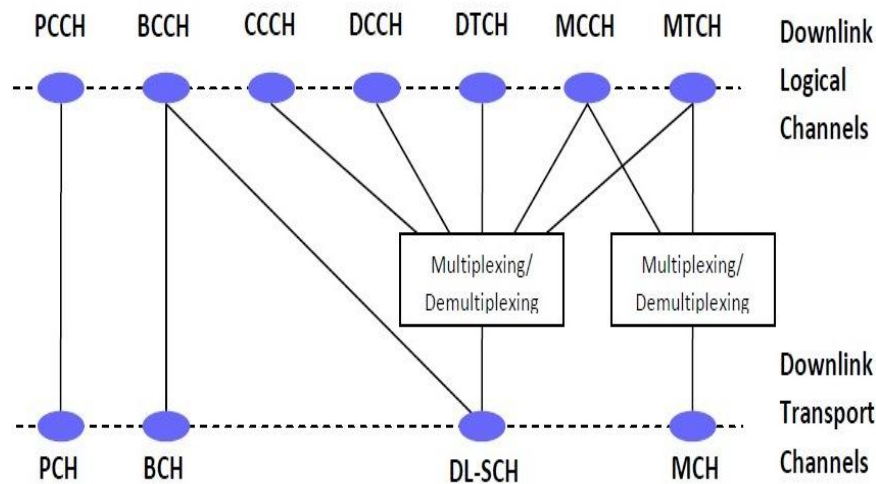
Το στρώμα MAC εκτελεί μια σειρά από σημαντικές λειτουργίες όπως: κατανέμει το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ένα αριθμό ενεργών UEs. Μία MAC λειτουργία είναι ο έλεγχος διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης που χρησιμοποιείται από το UE που δεν έχει διατεθεί με ράδιο πόρους άνω ζεύξης για να έχει πρόσβαση και να συγχρονίζεται με το δίκτυο. Το MAC εκτελεί επίσης ευθυγράμμιση χρονισμού άνω ζεύξης η οποία εξασφαλίζει ότι οι μεταδόσεις UEs δεν επικαλύπτονται όταν λαμβάνονται στο σταθμό βάσης. Ασυνεχείς υποδοχείς (DRX- Discontinuous Reception) υλοποιούνται στο στρώμα MAC για εξοικονόμηση ενέργειας της μπαταρίας.

Το MAC επίσης υλοποιεί HARQ λειτουργία για να αναμεταδώσει και να συνδυάσει τα δεδομένα blocks που έλαβε (μπλοκ μεταφοράς) και δημιουργεί ACK (Positive Acknowledgement) ή NACK (Negative Acknowledgement) σηματοδοσία στην περίπτωση αποτυχίας του CRC. Το HARQ επιχειρεί να διορθώσει δεδομένα συνδυάζοντας πολλαπλές μεταδόσεις δεδομένων, ακόμη και αν κάθε μονή μετάδοση έχει λάθη. Σε περίπτωση που αυτό δεν επιτύχει στην ανάκτηση των σωστών δεδομένων, η λειτουργία ARQ κάνει αίτηση στο RLC για να ξεκινήσει την αναμετάδοση και την εκ νέου κατάτμηση για οποιαδήποτε από τα επηρεαζόμενα PDUs. Το LTE χρησιμοποιεί σύγχρονο HARQ στην άνω ζεύξη, όπου συμβαίνουν

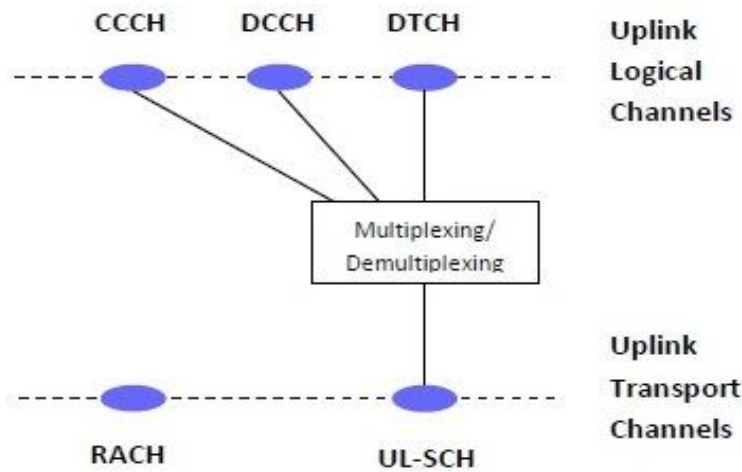


αναμεταδόσεις σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα σε σχέση με την αρχική μετάδοση και ασύγχρονη HARQ στην κατερχόμενη ζεύξη, όπου αναμεταδόσεις μπορεί να συμβούν ανά πάσα στιγμή σε σχέση με την αρχική μετάδοση απαιτώντας έτσι επιπρόσθετες πληροφορίες να αναφέρει η HARQ διαδικασία, που θα επιτρέψει στον δέκτη να συνδέσει μία αναμετάδοση με την αντίστοιχη μετάδοση. Ενώ ο πραγματικός επανασυνδυασμός των δεδομένων γίνεται από το PHY, η MAC πραγματοποιεί τη διαχείριση και τη σηματοδότηση.

Το στρώμα MAC αντιστοιχίζει τα RLC δεδομένα που λαμβάνονται μέσω των λογικών καναλιών στα κανάλια μεταφοράς όπου συνδέει το MAC με το Φυσικό Επίπεδο (PHY), όπως φαίνεται στο σχήμα 20 και στο σχήμα 21. Η αντίστροφη λειτουργία γίνεται από την πλευρά της λήψης.



Σχήμα 20. Πολυπλεξία Κάτω ζεύξης Λογικών Καναλιών, (πηγή: **LTE in a Nutshell: Protocol Architecture**).

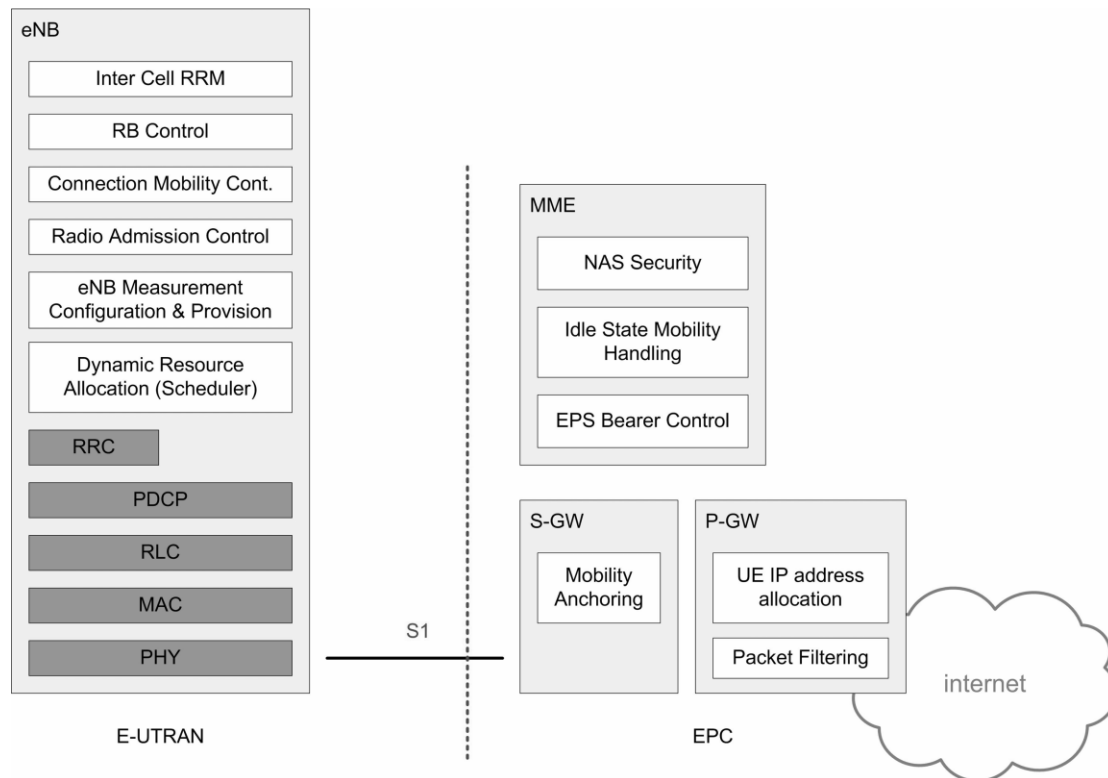


Σχήμα 21. Πολυπλεξία Άνω ζεύξης Λογικών Καναλιών, (πηγή: **LTE in a Nutshell: Protocol Architecture**).

## 2.7.3 Control and User Planes (Επίπεδο Ελέγχου και Χρήστη)

### 2.7.3.1 Επίπεδο Χρήστη (User Plane)

Το σχήμα 22 δείχνει τη στοίβα πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη, συμπεριλαμβανομένου του E-UTRAN και τη διασύνδεση S1 ενός συμβατικού συστήματος. Τα πρωτόκολλα αυτά μεταφέρουν δεδομένα από την μία πλευρά του δικτύου στο άλλο. Η ράδιο πρόσβαση χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα MAC, RLC, και PDCP. Το μέρος του επιπέδου χρήστη της διεπαφής S1 βασίζεται στο GPRS Tunneling Protocol (GTP), το οποίο χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό tunneling διασφαλίζοντας ότι τα πακέτα IP που προορίζονται για ένα δεδομένο UE παραδίδονται στον κόμβο eNodeB. Το GTP εγκλείει το αρχικό πακέτο IP σε ένα outer πακέτο IP που απευθύνεται στο σωστό eNodeB.



Σχήμα 22. Λειτουργική Διαίρεση μεταξύ του E-UTRAN και του EPC, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

Βάσει του παραπάνω σχήματος έχουμε για το EPC:

- eNodeB: Διαχειρίζεται τους ραδιο πόρους, πραγματοποιεί IP συμπύεση κεφαλίδας και κρυπτογράφηση του χρήστη. Επιλέγει ένα MME σε UE όταν δεν μπορεί να καθοριστεί δρομολόγηση σε MME. Δρομολογεί τα δεδομένα επιπέδου χρήστη που εξυπηρετούν είσοδο πύλης. Προγραμματίζει και μεταδίδει μηνύματα τηλεειδοποίησης. Προγραμματίζει και διαβιβάζει πληροφορίες που μεταδίδονται. Προγραμματίζει και μεταδίδει μηνύματα PWS.

-MME: Φροντίζει για την ασφάλεια σηματοδότησης NAS. Ελέγχει την ασφάλεια AS. Παρακολουθεί την περιοχή διαχείρισης λίστας (στην ενεργή κατάσταση και στην idle κατάσταση). Επιλέγει την PDN-GW και την serving GW. Επιλέγει SGSN για μεταπομπές σε δίκτυα πρόσβασης 2G ή 3G 3GPP. Πραγματοποιεί περιαγωγή και Πιστοποίηση. Παρέχει υποστήριξη για μετάδοση μηνύματος PWS (Public Warning System).

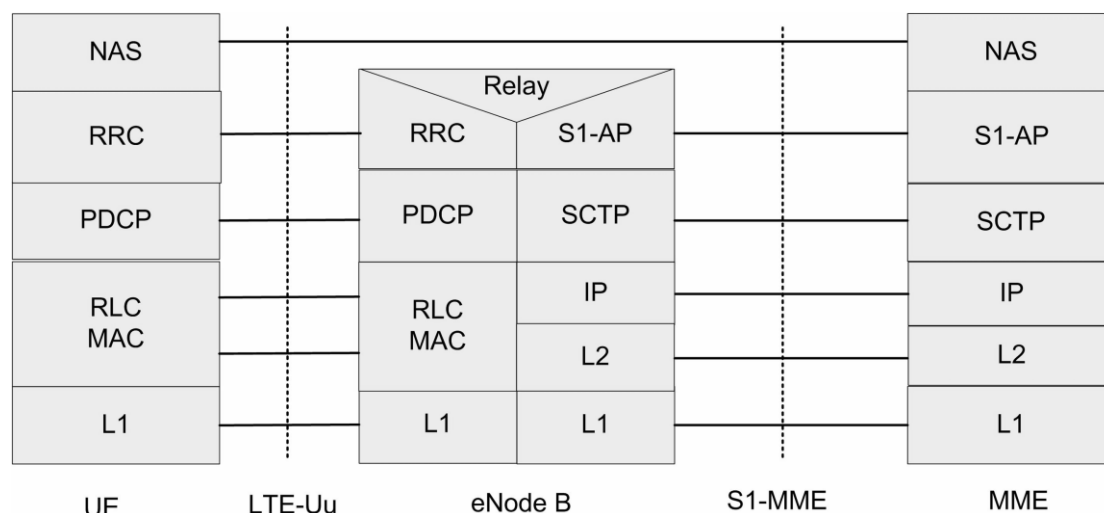
-S-GW: Είναι το τοπικό σημείο anchor κινητικότητας για παράδοση Inter-eNodeB. Παρακολουθεί τα πακέτα δρομολόγησης και τα προωθεί.

-PDN-GW: Παρακολουθεί τα πακέτα. Κατανέμει διευθύνσεις τις IP.



### 2.7.3.2 Επίπεδο Ελέγχου (Control Plane)

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου επιπέδου ελέγχου είναι ο έλεγχος των κομιστών ραδιο πρόσβασης και της σύνδεσης μεταξύ του UE και του δικτύου, δηλαδή, η σηματοδότηση μεταξύ E-UTRAN και EPC (Σχήμα 23). Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από τα πρωτόκολλα για τον έλεγχο και την υποστήριξη των λειτουργιών επιπέδου χρήστη:



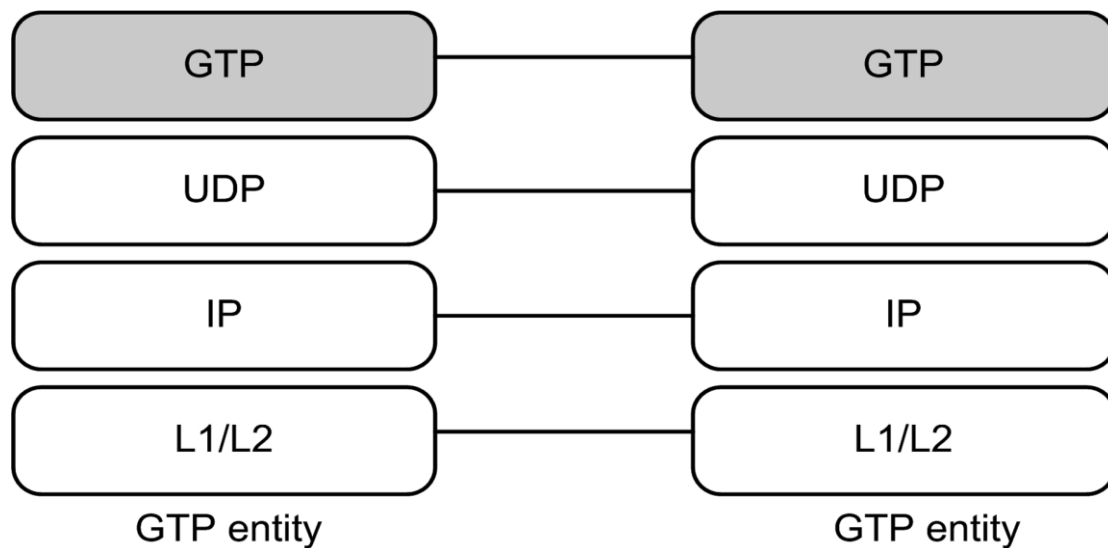
Σχήμα 23. Control plane end-to-end protocol stack, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

- ελέγχει τις E-UTRAN συνδέσεις πρόσβασης δικτύου, όπως η σύνδεση και αποσύνδεση από το E-UTRAN.
- ελέγχει τα χαρακτηριστικά μίας καθιερωμένης σύνδεσης πρόσβασης δικτύου, όπως η ενεργοποίηση μιας διεύθυνσης IP.
- ελέγχει τη διαδρομή δρομολόγησης μιας καθιερωμένης σύνδεσης δικτύου, προκειμένου να υποστηρίξει την κινητικότητα των χρηστών.
- ελέγχει την εκχώρηση των πόρων του δικτύου ώστε να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών.

### 2.7.4 Πρωτόκολλα GPRS Tunneling (GTP)

Το GPRS Tunneling Protocol (GTP) είναι μια συλλογή πρωτοκόλλων κεντρικής σημασίας για τη διαχείριση της κινητικότητας IP εντός του 3GPP δικτύου δεδομένων πυρήνων (GPRS/UMTS/EIE) που αποτελείται από GTP-C, GTP-U, και GTP\_variants. Η στοίβα πρωτοκόλλων GTP απεικονίζεται στο σχήμα 24.

Το GTP-C είναι το τμήμα ελέγχου του GTP και χρησιμοποιείται σε επίπεδο μηχανισμού ελέγχου σε GPRS, UMTS, και σε δίκτυα LTE / SAE / EPC.

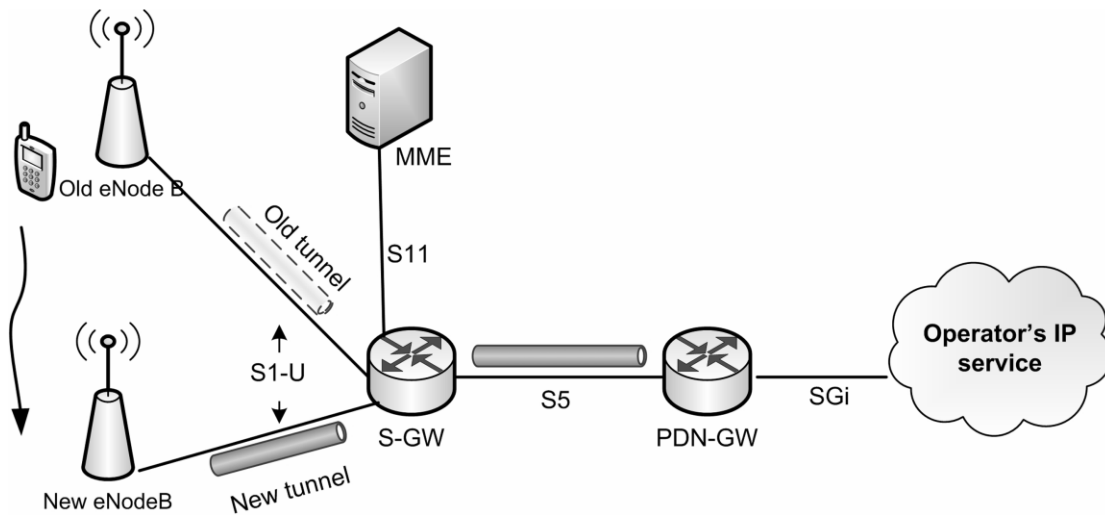


Σχήμα 24. GTP stack, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

Αφού το μονοπάτι κατερχόμενης ζεύξης S-GW ενεργοποιήσει τα πακέτα κατερχόμενης ζεύξης προς την νέα απευθείας διαδρομή, μπορεί να φθάσει στον επιθυμητό eNodeB. Ο eNodeB θα πρέπει πρώτα να παραδώσει όλα τα διαβιβασμένα πακέτα στον UE πριν από την παράδοση οποιουδήποτε άλλου νέου πακέτου.

Για να βοηθήσει τη λειτουργία αναδιάταξης στο eNodeB, το S-GW αποστέλλει ένα ή περισσότερα “end marker” πακέτα στο παλιό μονοπάτι αμέσως μετά το άνοιγμα του δρόμου για κάθε UE. Το “end marker” πακέτο δεν πρέπει να περιέχει δεδομένα χρήστη. Το “end marker” δηλώνεται στην κεφαλίδα GTP. Μετά την ολοκλήρωση της αποστολής των πακέτων “end marker” ο GW δεν αποστέλλει κανένα περαιτέρω πακέτο δεδομένων χρήστη μέσω του παλιού μονοπατιού. Μετά την παραλαβή των “end marker” πακέτων, η πηγή eNodeB, εφόσον είναι ενεργοποιημένη διαβιβάζει το πακέτο προς τον στόχο eNodeB.

Την ύπαρξη ενός “end marker” ο επιθυμητός eNodeB θα απορρίψει και προβαίνει σε οποιαδήποτε απαραίτητη διαδικασία για να διατηρηθεί η σειρά παράδοσης των διαβιβασμένων δεδομένων των χρηστών μέσω της διεπαφής X2 και των προωθημένων δεδομένων που λαμβάνονται από το S-GW στο S1 ως αποτέλεσμα του διακόπτη διαδρομής. Στη ανίχνευση του “end marker,” ο eNodeB στόχος μπορεί επίσης να ξεκινήσει την έκδοση απελευθέρωσης των δεδομένων διαβίβασης της πηγής (σχήμα 25).



Σχήμα 25. GTP tunneling, (πηγή: **Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya).

### 2.7.5 Πρωτόκολλα Σηματοδοσίας (Signalling)

Το LTE χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό πρωτοκόλλων σηματοδοσίας, τα οποία παρουσιάζονται στο σχήμα 26. Από την διεπαφή αέρα, ο σταθμός βάσης ελέγχει τις ραδιοεπικοινωνίες ενός κινητού μέσω των μηνυμάτων που έχουν γραφτεί χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο radio resource control (RRC).

Στο δίκτυο ραδιο πρόσβασης, ένα MME ελέγχει τους σταθμούς βάσης στο χώρο του χρησιμοποιώντας το S1 -Application protocol (S1-AP), ενώ οι δύο σταθμοί βάσης μπορούν να επικοινωνούν χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο εφαρμογής X2 (X2-AP)

Την ίδια στιγμή, ελέγχεται η συμπεριφορά υψηλού επιπέδου του κινητού χρησιμοποιώντας δύο πρωτόκολλα non-access stratum που βρίσκονται στη διεπαφή του αέρα. Τα πρωτόκολλα αυτά είναι: το EPS διαχείρισης συνεδρίας (ESM- EPS Session Management), το οποίο ελέγχει τις ροές δεδομένων μέσω του οποίου ένα κινητό επικοινωνεί με τον έξω κόσμο, και το EPS διαχείρισης κινητικότητας (EMM- EPS Mobility Management), το οποίο χειρίζεται εσωτερικά λογιστικά στο πλαίσιο του EPC. Το δίκτυο μεταφέρει EMM και ESM μηνύματα από την ενσωμάτωσή τους σε μηνύματα χαμηλότερου επιπέδου RRC και S1-AP και στη συνέχεια με τη χρήση των μηχανισμών μεταφοράς σε Uu και S1 διεπαφών.

Μέσα από το EPC, η HSS και MME επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο με βάση το Diameter. Το βασικό πρωτόκολλο Diameter είναι ένα πρότυπο IETF πρωτόκολλο για αυθεντικοποίηση, εξουσιοδότηση και μέτρηση (Λογιστικής), το οποίο βασίστηκε σε παλαιότερο πρωτόκολλο γνωστό ως Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS).

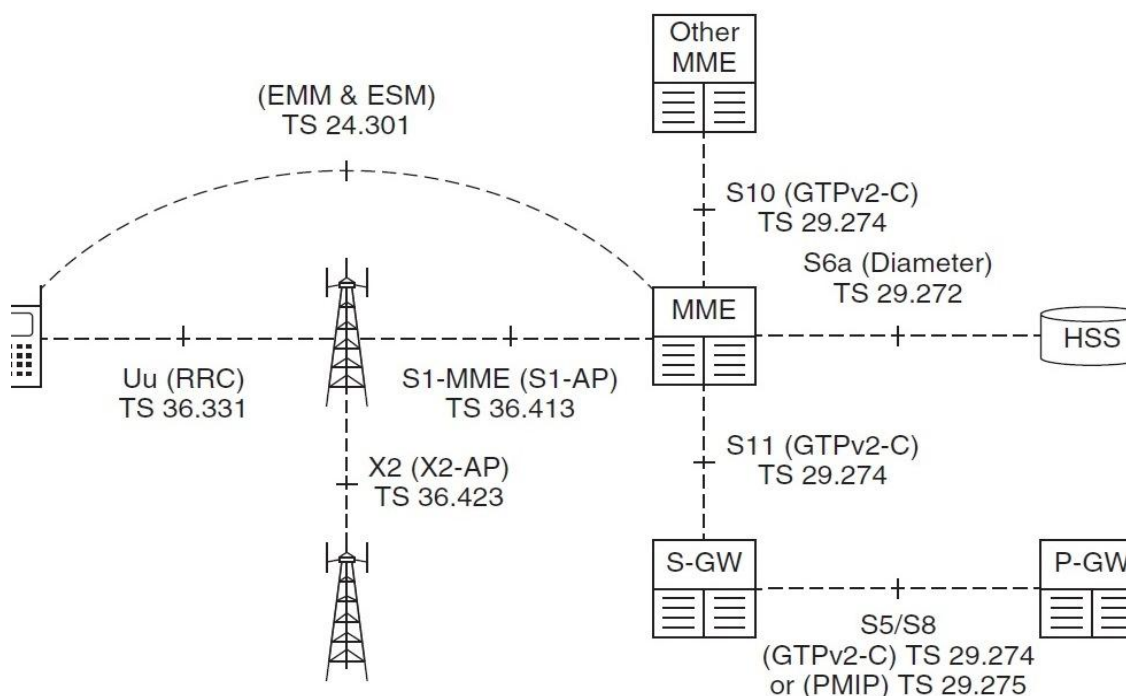
Οι περισσότερες από τις άλλες διασυνδέσεις EPC χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο GPRS tunnelling protocol control part (GTP-C). Το LTE χρησιμοποιεί την έκδοση 2 του πρωτοκόλλου, το οποίο δηλώνεται ως GTPv2-C. Αν το επίπεδο χρήστη S5 / S8 χρησιμοποιεί GRE, τότε το επίπεδο ελέγχου του χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο



σηματοδοσίας γνωστό ως proxy mobile IP version (PMIPv6). Το PMIPv6 είναι ένα πρότυπο IETF πρωτόκολλο για τη διαχείριση της προώθησης πακέτων, για την υποστήριξη των κινητών συσκευών, όπως οι φορητοί υπολογιστές.

Το ερώτημα που τίθεται είναι ποιο πρωτόκολλο να επιλέξουν για τη διασύνδεση S5/S8. Οι χρήστες προτιμούν τα GTP-U και GTP-C, για λόγους συνέπειας με τα προηγούμενα συστήματά και με τις άλλες διασυνδέσεις σηματοδοσίας στον evolved packet core. Το TS 23.401 περιγράφει την αρχιτεκτονική του συστήματος και τη λειτουργία υψηλού επιπέδου LTE, με την παραδοχή ότι η διασύνδεση S5 / S8 χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα αυτά. Χρήστες δικτύων non-3GPP μπορεί να προτιμούν τα GRE και PMIP, που είναι πρωτόκολλα του IETF (Internet Engineering Task Force), και τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για τη δια λειτουργικότητα μεταξύ τεχνολογιών LTE και μη-3GPP. TS 23.402 είναι μια προδιαγραφή για TS 23.401, το οποίο περιγράφει τις διαφορές στην αρχιτεκτονική και τη λειτουργία ενός δικτύου που χρησιμοποιεί τα πρωτόκολλα αυτά.

Κάθε μήνυμα είναι ένα ρεύμα από μονάδες και μηδενικά και όχι χαρακτήρες, έτσι ώστε τα μηνύματα να είναι σύντομα, αλλά δύσκολο να διαβαστούν. Κάθε μήνυμα μεταφέρει διάφορες παραμέτρους. Τα πρωτόκολλα 3GPP περιγράφουν αυτά ως στοιχεία πληροφοριών, αλλά η Diameter αναφέρεται σε αυτούς ως attribute value pairs (AVPs) επειδή συνδυάζουν τα δύο στοιχεία, δηλαδή ποια παράμετρος καθορίζεται και ποια η αξία του.



Σχήμα 26. Signalling πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο LTE, (πηγή: . **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

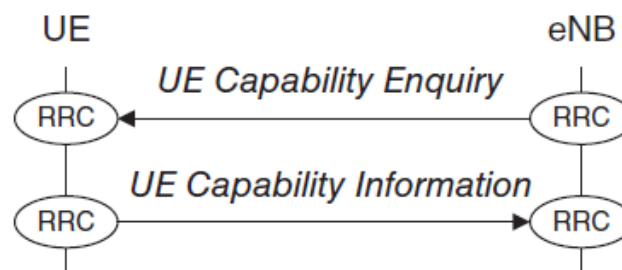




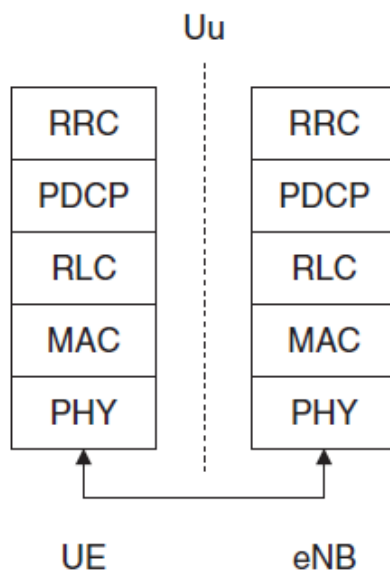
## 2.7.6 Παράδειγμα Ροών Σηματοδοσίας

### 2.7.6.1 Σηματοδοσία Access Stratum

Παρακάτω παρουσιάζουμε παραδείγματα για το πώς μπορεί να συνδυαστούν τα διάφορα στοιχεία του δικτύου με τις στοίβες του πρωτοκόλλου. Είναι χρήσιμο να δείξουμε μερικά παραδείγματα για το πώς οι διάφορες συνιστώσες ταιριάζουν μεταξύ τους. Ας εξετάσουμε πρώτα την ανταλλαγή RRC μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης. Στο σχήμα 27 φαίνεται η ακολουθία μηνυμάτων για μια διαδικασία RRC γνωστή ως UE Capability Transfer.



Σχήμα 27. Διαδικασία ικανότητας του UE για μεταφορά, (πηγή: **An Introduction to LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).



Σχήμα 28. Στοίβα Πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την αποστολή RRC μηνυμάτων σηματοδοσίας μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης, (πηγή: **An**



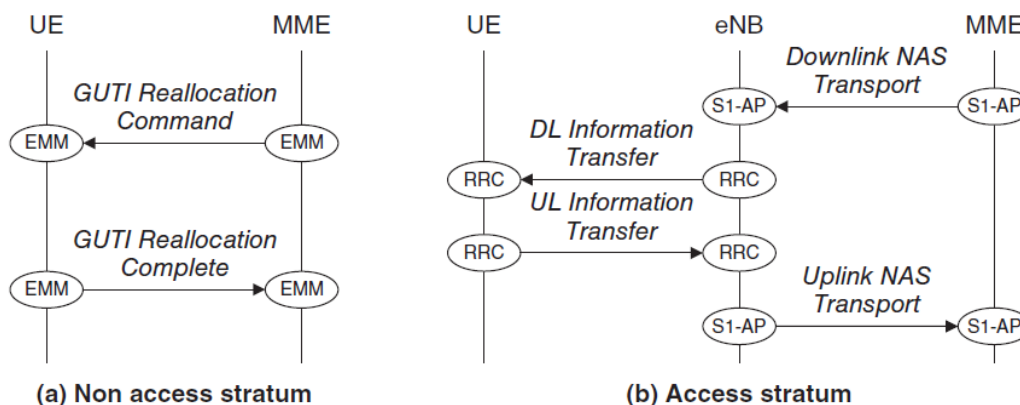
## Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications, Christopher Cox).

Ο serving eNB επιθυμεί να ανακαλύψει τις δυνατότητες ασύρματης πρόσβασης του κινητού, όπως τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να χειριστεί και την προδιαγραφή της έκδοσης με την οποία συμφωνεί. Για να γίνει αυτό, το πρωτόκολλο RRC περιλαμβάνει ένα μήνυμα το οποίο ονομάζεται UE Capability Enquiry και το στέλνει στο κινητό. Το κινητό απαντά με ένα μήνυμα RRC το οποίο καλείται UE Capability Information, στο οποίο απαριθμεί τις ικανότητες που απαιτούνται.

Οι αντίστοιχες στοίβες πρωτοκόλλου φαίνονται στο σχήμα 28. Ο σταθμός βάσης συνθέτει το μήνυμα ικανότητας του με τη χρήση του πρωτοκόλλου RRC, επεξεργάζεται χρησιμοποιώντας τα PDCP, RLC και MAC και το μεταδίδει χρησιμοποιώντας το air interface physical layer. Το κινητό λαμβάνει τη μετάδοση του σταθμού βάσης και επεξεργάζεται τις πληροφορίες με διαβίβαση αυτού μέσω της ίδιας ακολουθίας των πρωτοκόλλων αντίστροφα. Στη συνέχεια διαβάζει το συνημμένο μήνυμα και συνθέτει την απάντησή του, η οποία μεταδίδεται και λαμβάνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

### 2.7.6.2. Σηματοδοσία Non-Access Stratum

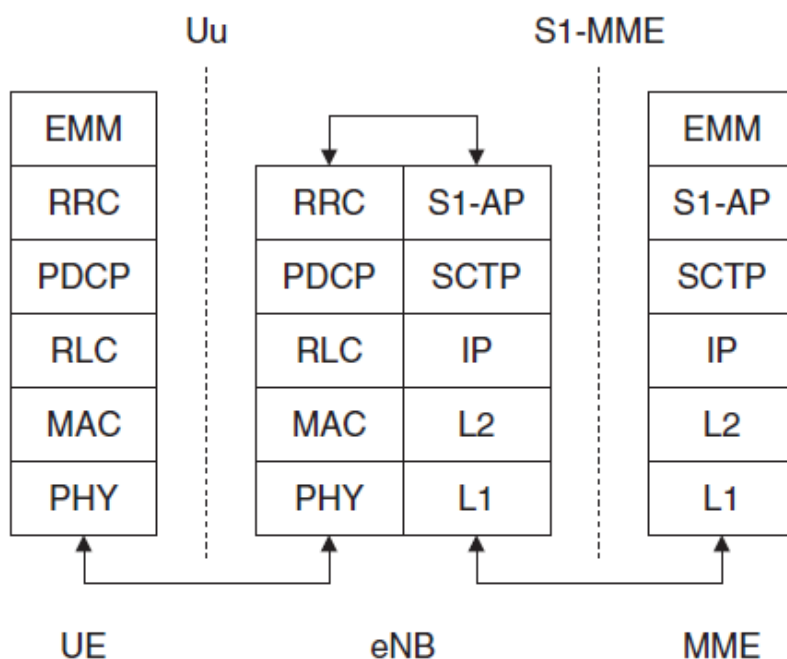
Το επόμενο παράδειγμα σηματοδότηση είναι λίγο πιο πολύπλοκο. Η εικόνα 29 (α) δείχνει την ακολουθία μηνυμάτων για μια διαδικασία EMM (EPS Mobility Management) γνωστή ως GUTI ανακατανομή. Χρησιμοποιώντας μια εντολή ανακατανομής EMM GUTI (Global Unique Temporary Identify), το MME μπορεί να δώσει στο κινητό μία νέα παγκόσμια μοναδική προσωρινή ταυτότητα. Σε απάντηση, το κινητό στέλνει στον MME μια απόδειξη χρησιμοποιώντας ένα EMM GUTI Reallocation Complete.



Σχήμα 29. Διαδικασία ανακατανομή GUTI (α) Μηνύματα Non-access stratum (β) Μηνύματα μεταφοράς χρησιμοποιώντας το access stratum, (πηγή: **An Introduction**



to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications, Christopher Cox).



Σχήμα 30. Η Στοιβά πρωτοκόλλων συνηθίζουν να ανταλλάσσουν non-access stratum signaling μηνύματα μεταξύ του κινητού και του MME, (πηγή: . **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

Το LTE μεταφέρει αυτά τα μηνύματα ενσωματώνοντας τα σε S1-AP και RRC μηνύματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29 (b). Τα συνηθισμένα S1-AP μηνύματα είναι γνωστά ως Uplink NAS Transport και Downlink NAS Transport, ενώ τα συνηθισμένα μηνύματα RRC είναι γνωστά ως UL Information Transfer και DL Information Transfer. Η μοναδική τους λειτουργία είναι να μεταφέρουν EMM και ESM μηνύματα όπως αυτά που εμφανίζονται εδώ. Ωστόσο, το δίκτυο μπορεί επίσης να μεταφέρει μηνύματα στρώματος μη πρόσβασης με την ενσωμάτωσή τους σε άλλα S1-AP και RRC μηνύματα, τα οποία μπορούν να έχουν πρόσθετες λειτουργίες access stratum των δικών τους.

Το σχήμα 30 δείχνει τις στοιβές πρωτοκόλλου για αυτή την ακολουθία μηνυμάτων. Η MME γράφει την GUTI Reallocation Command χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο EMM, το ενσωματώνει στο μήνυμα S1-AP Downlink NAS Transport και το στέλνει στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς μεταφοράς της διεπαφής S1. Ο σταθμός βάσης ξεδιπλώνει το μήνυμα EMM, το ενσωματώνει σε έναν RRC DL Information Transfer και το στέλνει στο κινητό χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα



διεπαφής αέρα. Το κινητό διαβάζει το μήνυμα, ενημερώνει το GUTI του και στέλνει μια επιβεβαίωση χρησιμοποιώντας τις ίδιες στοίβες πρωτοκόλλου και αντίστροφα.

## 2.8 Στοίβα Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα

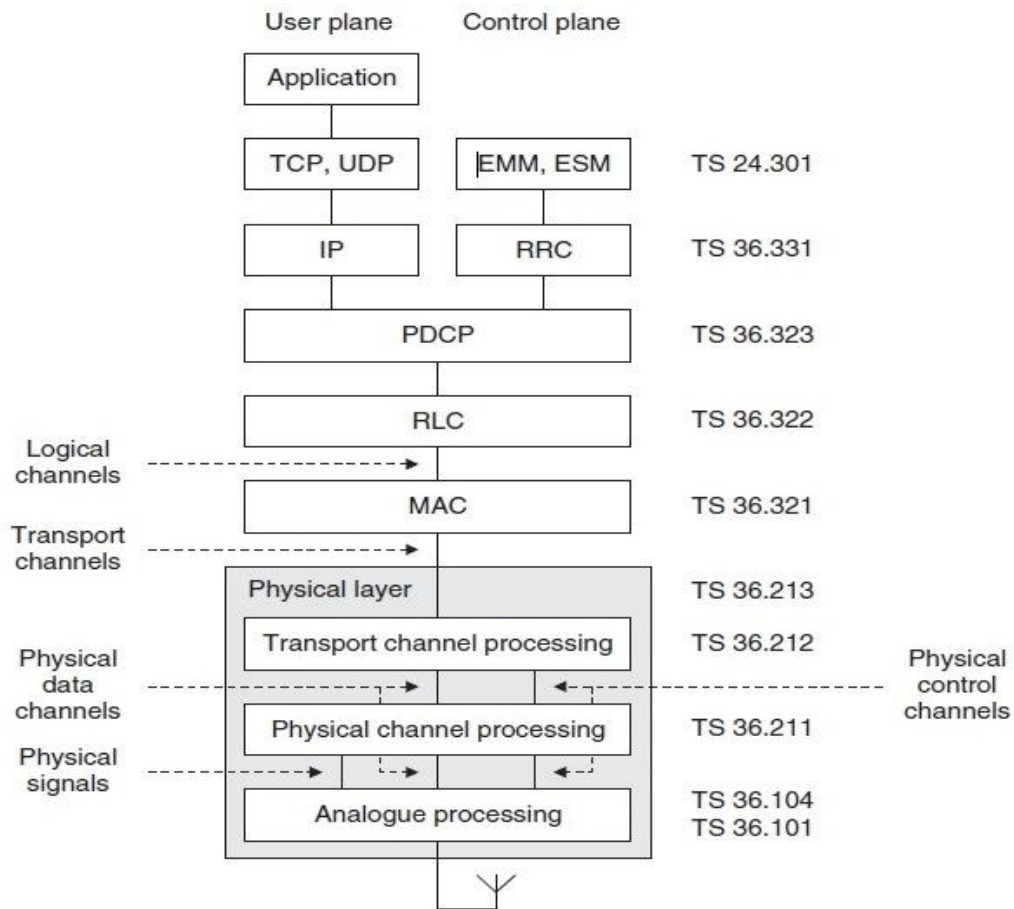
Στο σχήμα 31 αξιολογούνται τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον του αέρα, από την πλευρά της κινητής τηλεφωνίας. Το σχήμα δείχνει την ροή των πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων επιπέδων της στοίβας πρωτοκόλλου.

Στο επίπεδο του χρήστη, η εφαρμογή δημιουργεί πακέτα δεδομένων που υποβάλλονται σε επεξεργασία από πρωτόκολλα όπως τα TCP, UDP και IP, ενώ το πρωτόκολλο radio resource control (RRC) γράφει μηνύματα σηματοδοσίας που ανταλλάσσονται μεταξύ της βάσης σταθμού και του κινητού. Και στις δύο περιπτώσεις, οι πληροφορίες επεξεργάζονται από τα πρωτόκολλα Packet Data Convergence Protocol (PDCP), το Radio Link Control (RLC) και το Medium Access Control (MAC), πριν περάσει στο φυσικό στρώμα για μετάδοση.

Το φυσικό στρώμα αποτελείται από τρία μέρη. Τον επεξεργαστή του καναλιού μεταφοράς που εφαρμόζει τις διαδικασίες διαχείρισης σφαλμάτων, ενώ ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού εφαρμόζει τις τεχνικές OFDMA, SC-FDMA και πολλαπλή μετάδοση κεραίας. Τέλος, ο αναλογικός επεξεργαστής μετατρέπει τις πληροφορίες σε αναλογική μορφή, τις φιλτράρει και τις αναμειγνύει σε ραδιοσυχνότητες για τη μετάδοση. Μια ξεχωριστή προδιαγραφή περιγράφει τις διαδικασίες που πλαισιώνουν τα επιμέρους τμήματα του φυσικού στρώματος.

Η ροή των πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων είναι γνωστές ως κανάλια και σήματα. Δεδομένα και μηνύματα σηματοδοσίας μεταφέρονται σε λογικά κανάλια μεταξύ των πρωτοκόλλων RLC και MAC. Το LTE χρησιμοποιεί διάφορους τύπους καναλιών.

Στον πομπό, ο επεξεργαστής καναλιού μεταφοράς δημιουργεί επίσης πληροφορίες ελέγχου που υποστηρίζουν τη λειτουργία χαμηλού επιπέδου του φυσικού στρώματος και στέλνει αυτή την πληροφορία στον επεξεργαστή φυσικού καναλιού. Ομοίως, ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού δημιουργεί φυσικά σήματα, τα οποία υποστηρίζουν τις χαμηλότερες σε επίπεδα πτυχές του συστήματος. Αυτά ταξιδεύουν, αλλά και πάλι είναι αόρατα για τα υψηλότερα στρώματα



Σχήμα 31. Αρχιτεκτονική της Στοιβάς Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3. Λογικά, Μεταφοράς και Φυσικά Κανάλια

#### 3.1 Κανάλια Λογικά

Ο πίνακας 2 παραθέτει τα λογικά κανάλια που χρησιμοποιούνται από το LTE. Διακρίνονται από τις πληροφορίες που μεταφέρουν και μπορεί να ταξινομηθούν με δύο τρόπους. Πρώτον, τα λογικά κανάλια κυκλοφορίας μεταφέρουν τα δεδομένα στο επίπεδο του χρήστη, ενώ τα λογικά κανάλια ελέγχου μεταφέρουν μηνύματα σηματοδότησης στο επίπεδο του ελέγχου. Δεύτερον, συγκεκριμένα λογικά κανάλια διατίθενται σε ένα συγκεκριμένο κινητό, ενώ κοινά λογικά κανάλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν από περισσότερο του ενός κινητού.

Τα πιο σημαντικά λογικά κανάλια είναι τα DTCH (dedicated traffic channel), τα οποία μεταφέρουν δεδομένα προς ή από ένα μόνο κινητό, και το αποκλειστικό κανάλι ελέγχου DCCH (Dedicated Control Channel), το οποίο φέρει τη μεγάλη πλειοψηφία των μηνυμάτων σηματοδότησης. Για να είμαστε ακριβείς, το συγκεκριμένο κανάλι ελέγχου μεταφέρει όλα τα mobile-specific signalling μηνύματα σηματοδότησης του κινητού στους ραδιο φορείς σηματοδότησης 1 και 2, για κινητά τα οποία βρίσκονται στην κατάσταση RRC\_CONNECTED.

Το BCCH (broadcast control channel) μεταφέρει RRC μηνύματα πληροφοριών συστήματος, τα οποία ο σταθμός βάσης μεταδίδει σε ολόκληρο το κύτταρο προκειμένου να ενημερωθεί το κινητό για τις ρυθμίσεις του κατάρρου. Αυτά τα μηνύματα χωρίζονται σε δύο άνισες ομάδες, οι οποίες αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο από χαμηλότερα στρώματα. Το κύριο μπλοκ πληροφοριών (master information block- MIB), φέρνει μερικές σημαντικές παραμέτρους, όπως το εύρος ζώνης κατερχόμενης ζεύξης, ενώ αρκετά system information blocks (SIBs) φέρουν το υπόλοιπο.

Το κανάλι ελέγχου τηλεειδοποίησης PCCH (paging control channel) φέρει πακετοποιημένα μηνύματα, που ο σταθμός βάσης μεταδίδει εάν επιθυμεί να επικοινωνήσει με κινητά τηλέφωνα που βρίσκονται σε κατάσταση RRC\_IDLE. Το κοινό κανάλι ελέγχου CCCH (Common Control Channel) μεταφέρει μηνύματα στο ραδιο φορέα σηματοδότησης 0, για κινητά τηλέφωνα που κινούνται από το RRC\_IDLE στο RRC\_CONNECTED.

Ο πίνακας 2 παραθέτει τα κανάλια, τα οποία εισήχθησαν σε κάθε έκδοση του LTE. Το κανάλι πολλαπλής κίνησης (MTCH) και πολλαπλού καναλιού ελέγχου (MCCH) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο LTE Release 9, για να χειριστούν μια υπηρεσία, γνωστή ως MBMS.



Τύπος Καναλιού	Περιγραφή	
<b>Έλεγχος Λογικών Καναλιών</b>		
BCCH	Broadcast Control Channel	Κανάλι Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται σε μετάδοση πληροφοριών συστήματος
PCCH	Paging Control Channel	Κανάλι Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για την κοινοποίηση UE μιας εισερχόμενης κλήσης στη διαμόρφωση του συστήματος
CCCH	Common Control Channel	Κανάλι Άνω και Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για να παραδώσει πληροφορίες ελέγχου κατά τη πραγματοποίηση σύνδεσης όταν δεν έχει επιβεβαιωθεί σχέση μεταξύ του UE και eNode B
MCCH	Multicast Control Channel	Κανάλι Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει υπηρεσίες πληροφοριών ελέγχου
DCCH	Dedicated Control Channel	Κανάλι Άνω και Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου σε ένα συγκεκριμένο UE.
<b>Κίνηση Λογικών Καναλιών</b>		
DTCH	Dedicated Traffic Channels	Κανάλι Άνω και Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει συγκεκριμένα δεδομένα χρηστών
MTCH	Multicast Traffic Channel	Κανάλι Κάτω Ζεύξης χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρηστών για MBMS υπηρεσίες

Πίνακας 2. Λογικά κανάλια, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).



### 3.2 Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς που παρατίθενται στον Πίνακα 3 Διακρίνονται από τον τρόπο με τον οποίο τα χειρίζεται ο επεξεργαστής καναλιού μεταφοράς.

Τύπος Καναλιού	Περιγραφή	
<b>Κανάλια Μεταφοράς: Κανάλια Μεταφοράς Κάτω Ζεύξης</b>		
BCH	Broadcast Channel	Χρησιμοποιείται για μέρος των πληροφοριών του συστήματος για να έχει πρόσβαση στο DL-SCH
DL-SCH	Downlink Shared Channel	Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρηστών κάτω ζεύξης ή μηνύματα ελέγχου και πληροφορίες συστήματος που δεν μεταφέρονται μέσω του BCH
PCH	Paging Channel	Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πακετοποιημένες πληροφορίες
MCH	Multicast Channel	Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρηστών ή μηνύματα ελέγχου τα οποία απαιτούν MBSFN συνδυασμούς
<b>Κανάλια Μεταφοράς: Κανάλια Μεταφοράς Άνω Ζεύξης</b>		
UL-SCH	Uplink Shared Channel	Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρηστών ή μηνύματα ελέγχου
RACH	Random Access Channel	Χρησιμοποιείται για να έχει πρόσβαση στο δίκτυο όταν ο UE δεν έχει ακριβή χρόνο συγχρονισμού άνω ζεύξης

Πίνακας 3. Κανάλια Μεταφοράς, (πηγή: **An Introduction to LTE. LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications**, Christopher Cox).

Τα πιο σημαντικά κανάλια μεταφοράς είναι το UL-SCH (uplink shared channel) και το DL-SCH (downlink shared channel), τα οποία φέρουν την πλειοψηφία των δεδομένων και των μηνυμάτων signaling της διεπαφής αέρα. Το paging κανάλι πακετοποίησης PCH (Paging Channel) φέρει πακετοποιημένα μηνύματα που προέρχονται από το paging κανάλι ελέγχου. Το κανάλι εκπομπής BCH (Broadcast Channel) φέρει το κύριο μπλοκ πληροφοριών του καναλιού ελέγχου εκπομπής του: τα υπόλοιπα μηνύματα πληροφοριών συστήματος γίνεται από το κοινό κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, σαν να ήταν κανονικά δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης. Το multicast κανάλι MCH (Multicast Channel) είναι πλήρως καθορισμένο στην 8η





έκδοση, για τη μεταφορά δεδομένων από το πολυμεσικό σύστημα/ πολλαπλής υπηρεσίας.

Ο σταθμός βάσης συνήθως προγραμματίζει τις μεταδόσεις που κάνει ένα κινητό, χορηγώντας πόρους για μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης σε συγκεκριμένους χρόνους και σε συγκεκριμένα υπο-φορείς (sub-carriers). Το κανάλι τυχαίας πρόσβασης RACH (Random Access Channel) είναι ένα ειδικό κανάλι μέσω του οποίου το κινητό μπορεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο, χωρίς προηγούμενο προγραμματισμό. Τυχαία πρόσβαση μετάδοσης αποτελείται από το πρωτόκολλο MAC του κινητού και ταξιδεύει αλλά είναι εντελώς αόρατο για υψηλότερα στρώματα.

Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των καναλιών μεταφοράς βρίσκονται στις προσεγγίσεις στην διαχείριση λάθους. Ειδικότερα, τα διαμοιραζόμενα κανάλια ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης είναι τα μόνα κανάλια μεταφοράς που χρησιμοποιούν τις τεχνικές της αίτησης αυτόματης επανάληψης και υβριδικό ARQ, και είναι τα μόνα κανάλια που μπορούν να προσαρμόσουν τον ρυθμό κωδικοποίησής τους στις αλλαγές στο λαμβανόμενο σήμα ανάλογα με την παρεμβολή του θορύβου (SINR- Signal to interference plus noise ratio). Τα άλλα κανάλια μεταφοράς χρησιμοποιούν διόρθωση σφάλματος και έχουν ένα σταθερό ρυθμό κωδικοποίησης.

### 3.3 Κανάλια Φυσικά

Ο πίνακας 4 παραθέτει τα φυσικά κανάλια δεδομένων. Διακρίνονται από τους τρόπους με τον οποίο ο επεξεργαστής φυσικού καναλιού τα χειρίζεται, καθώς και από τους τρόπους με τους οποίους χαρτογραφούνται επί των συμβόλων και των υπο-φορέων που χρησιμοποιούνται από το OFDMA.

Τα πιο σημαντικά φυσικά κανάλια είναι τα PDSCH (physical downlink shared channel) και το PUSCH (physical uplink shared channel). Το PDSCH μεταφέρει δεδομένα και μηνύματα σηματοδοσίας από το κοινόχρηστο κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, καθώς και τα μηνύματα paging από το paging κανάλι. Το PUSCH μεταφέρει δεδομένα και μηνύματα σηματοδοσίας από το κοινόχρηστο κανάλι ανερχόμενης ζεύξης και μπορεί μερικές φορές να μεταφέρει τις πληροφορίες ελέγχου άνω ζεύξης (UCI).

Το φυσικό κανάλι εκπομπής (PBCH) μεταφέρει το κύριο μπλοκ πληροφοριών από το κανάλι εκπομπής, ενώ το φυσικό κανάλι τυχαίας προσπέλασης (PRACH) φέρει τυχαία πρόσβαση στις μεταδόσεις από το κανάλι τυχαίας πρόσβασης. Το physical multicast channel (PMCH) ήταν πλήρως καθορισμένο στην 8η έκδοση, για τη μεταφορά δεδομένων από το multicast κανάλι, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην έκδοση 9.

Το PDSCH και το PUSCH είναι τα μόνα φυσικά κανάλια που μπορούν να προσαρμόσουν τα συστήματα διαμόρφωσης σε απάντηση στις αλλαγές στο λαμβανόμενο SINR. Όλα τα άλλα φυσικά κανάλια χρησιμοποιούν ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης, συνήθως QPSK. Τα άλλα κανάλια αποστέλλονται από μία



μόνο κεραία, ή μπορεί να χρησιμοποιήσουν open loop transmit diversity στην περίπτωση της κάτω ζεύξης. Για άλλη μια φορά, οι ίδιοι περιορισμοί ισχύουν για τα φυσικά κανάλια ελέγχου.

Κανάλι	Έκδοση	Ονομασία	Πληροφορίες	Κατεύθυνση
PUSCH	R8	Physical Uplink shared channel	UL-SCH και/ή UCI	UL
		Physical random access channel	RACH	
PDSCH	R8	Physical downlink shared channel	DL-SCH και PCH	DL
PBCH	R8	Physical broadcast channel	BCH	
PMCH	R8/R9	Physical multicast channel	MCH	

Πίνακας 4. Φυσικά Κανάλια



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### 4. Κατανάλωση Ενέργειας

#### 4.1 Εισαγωγή

Με την ταχεία και ριζική εξέλιξη της Τεχνολογίας της Επικοινωνίας και της πληροφορίας, η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται με καταϊγιστικό ρυθμό. Ενώ αναπτύσσεται η τεχνολογία LTE παρέχοντας αύξηση των ρυθμών δεδομένων, η μπαταρία, δηλαδή η πηγή ενέργειας μία κινητής συσκευής δεν έχει δει μεγάλη πρόοδο και κατέχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτές των προηγούμενων τεχνολογιών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αναγκαία και σημαντική η ανάπτυξη μηχανισμών για την εξοικονόμηση ενέργειας και την μετάδοση μεγάλων ρυθμών δεδομένων.

Σημαντικός καταναλωτής ενέργειας είναι οι σταθμοί βάσης (BS). Είναι υπεύθυνοι για το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας των δικτύων ασύρματης πρόσβασης, λόγω του μεγάλου αριθμού των BSs και της σημαντικής κατανάλωσης ενέργειας τους. Το 50% της συνολικής ενέργειας καταναλώνεται από το τμήμα ασύρματης πρόσβασης, όπου το 50-80% χρησιμοποιείται για τον ενισχυτή ισχύος (PA).

Η κατανάλωση ισχύος ενός σταθμού βάσης μεταβάλλεται με το χρόνο. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού βάσης. Ένας σταθμός βάσης μπορεί να είναι σε μία λειτουργική ή μη λειτουργική κατάσταση. Σε κατάσταση λειτουργίας μπορούν να διαχωριστούν διαφορετικές συνθήκες, π.χ., μια χαμηλή επισκεψιμότητα και μια λειτουργία αιχμής κυκλοφορίας. Μεταξύ όλων των καταστάσεων, απαιτείται ένας χρόνος μετάβασης για να φτάσει σε μια νέα κατάσταση π.χ., το ξεκίνημα της λειτουργίας ενός σταθμού βάσης χρειάζεται συγκεκριμένο μέγεθος χρόνου και ενέργειας. Εάν ο συσσωρευμένος χρόνος σε μια αποκλειστική λειτουργία είναι μεγαλύτερος από όλους τους χρόνους μετάβασης, τότε μπορούν να αγνοηθούν αυτοί οι χρόνοι μετάβασης.

Η LTE παρέχει υψηλό εύρος ζώνης για τη μεταφορά δεδομένων. Έχοντας υψηλό εύρος ζώνης μεταφοράς εξαντλεί την ενέργεια του εξοπλισμού χρήστη (UE) και κατ'επέκταση τη μπαταρία γρήγορα.

Επιπλέον, οι διαχειριστές κινητής τηλεφωνίας είναι ήδη μεταξύ των κορυφαίων καταναλωτών ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται πολύ ταχύτερα από ό, τι των ICT στο σύνολο.

Από την πλευρά των χρηστών, η ενεργειακή αποδοτική ασύρματη επικοινωνία είναι επίσης επιτακτική ανάγκη. Χωρίς καμία σημαντική ανακάλυψη στην τεχνολογία των μπαταριών, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των τερματικών είναι ο μεγαλύτερος περιορισμός για τις ενεργοβόρες εφαρμογές (π.χ., βιντεοπαιχνίδια, κινητά P2P,



διαδραστικά βίντεο, οθόνες βίντεο, τα πολυμέσα, κινητή τηλεόραση, 3D υπηρεσίες, και βίντεο sharing).

## 4.2 Εξοικονόμηση Ενέργειας

Για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι όπως: σύνθετες τεχνικές στο φυσικό στρώμα, όπως πολλαπλής εισόδου -πολλαπλής εξόδου (MIMO) και Ορθογώνια Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM), cognitive radio, κωδικοποίηση δικτύου, συνεργατική επικοινωνία, νέες αρχιτεκτονικές δικτύου, όπως τα ετερογενή δίκτυα, οι κατανεμημένες κεραιες, cellulars multi-hop, συστήματα διαχείρισης ραδιο πόρων και δικτύου, διάφοροι cross layer αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, δυναμική εξοικονόμησης ενέργειας και πολλές άλλες.

Στην παρούσα εργασία αναλύονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτοί είναι:

1. οι ασυνεχείς υποδοχείς (Discontinuous Reception –DRX). Η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της μεθόδου των ασυνεχών υποδοχέων έχει σα στόχο την απενεργοποίηση του ραδιο σήματος προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος που το κινητό παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο.
2. ο Αλγόριθμος Distance-Aware Base Station Sleeping. Όπως αναφέραμε η κατανάλωση ενέργειας στους σταθμούς βάσης αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έχουν προκύψει. Με την προσέγγιση του αλγόριθμου Distance-Aware Base Station Sleeping υπάρχει η δυνατότητα της μείωσης ορισμένων ενεργών σταθμών βάσης κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις.
3. η ανάπτυξη μικρών κυττάρων. Σε αυτή την περίπτωση επικαλείται η κατάσταση sleep στα μικρά κύτταρα και εξετάζονται τρεις μέθοδοι κατά τις οποίες σβήνουν κάποια από τα στοιχεία του hardware.

Στην εργασία παρουσιάζονται οι μέθοδοι, οι αριθμητικές εξισώσεις και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από διεθνής επιστημονικές έρευνες<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk)

**"Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced**, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis)

**Power Savings in Small Cell. Deployments via Sleep Mode Techniques**, Imran Ashraf, Federico Boccardi, Lester Ho, Bell Laboratories, Alcatel-Lucent)



## 4.3 Μέθοδοι Εξοικονόμησης Ενέργειας

### 4.3.1 Ασυνεχείς Υποδοχείς (DRX Discontinuous Reception)

Η πρώτη μέθοδος δεν είναι μια νέα ιδέα για το LTE, δεδομένου ότι έχει εφαρμοστεί στα συστήματα 2ης γενιάς, όπως στο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM).

Ένα κινητό τερματικό παρακολουθεί το σήμα ελέγχου συνεχόμενα ώστε να έχει την δυνατότητα να στείλει και να δεχτεί δεδομένα. Στο LTE αυτά τα σήματα ελέγχου στέλνονται στο PDCCH. Αλλά με την παρακολούθηση του PDCCH γίνεται μια σπατάλη των ραδιο πόρων και σπατάλη μπαταρίας όταν δεν υπάρχει μετάδοση στην άνω ζεύξη (UL) ή στην κάτω ζεύξη (DL) για μεγάλη περίοδο.

Μέσα από την παρακολούθηση των δραστηριοτήτων του Εξοπλισμού Χρήστη (UE), οι ασυνεχείς υποδοχείς (Discontinuous Reception -DRX) είναι σε θέση να επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ο στόχος αυτών των μηχανισμών είναι να απενεργοποιήσουν το ραδιο σήμα (ή sleep) ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια του χρόνου, που παραμένει συνδεδεμένο με το δίκτυο, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας όταν δεν υπάρχουν δεδομένα για μετάδοση. Ως εκ τούτου, ο δέκτης θα πρέπει να λειτουργεί ασυνεχώς για υπηρεσίες κατερχόμενης ζεύξης (DL) παρακολουθώντας το φυσικό κανάλι (PDCCH).

Η κύρια διαφορά μεταξύ του LTE και των προηγούμενων Τεχνολογιών όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος DRX είναι κατά πόσο το UE επιτρέπεται να εισέλθει σε κατάσταση sleep όταν ο ρυθμιστής κυκλοφορίας δεν είναι άδειος. Η αλλαγή των καταστάσεων στο LTE DRX εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στον προγραμματισμό, δεδομένου ότι θα επιμήκυνε τον ενεργό χρόνο ενός UE με την επανεκκίνηση του Χρονοδιακόπτη αδράνειας. Εν τω μεταξύ, λόγω της διάρκειας της αναμονής, ο προγραμματισμός σε LTE DRX επηρεάζεται από τον DRX αναλόγως. Η θεωρητική βάση των παραδοσιακών μηχανισμών προγραμματισμού καθίσταται άκυρη όταν το DRX εγκριθεί. Η DRX LTE είναι η τεχνολογία που βασίζεται σε στατική λειτουργία sleep, κατά συνέπεια, η μείωση της απόδοσης είναι αναπόφευκτη. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού υπάρχει η ανάγκη για βελτιστοποίηση των παραμέτρων DRX, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας χωρίς να υποστεί νέα είσοδο δικτύου και καθυστερήσεις πακέτων. Ειδικότερα, πρέπει να δοθεί προσοχή για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

#### 4.3.1.1 LTE και το σενάριο DRX

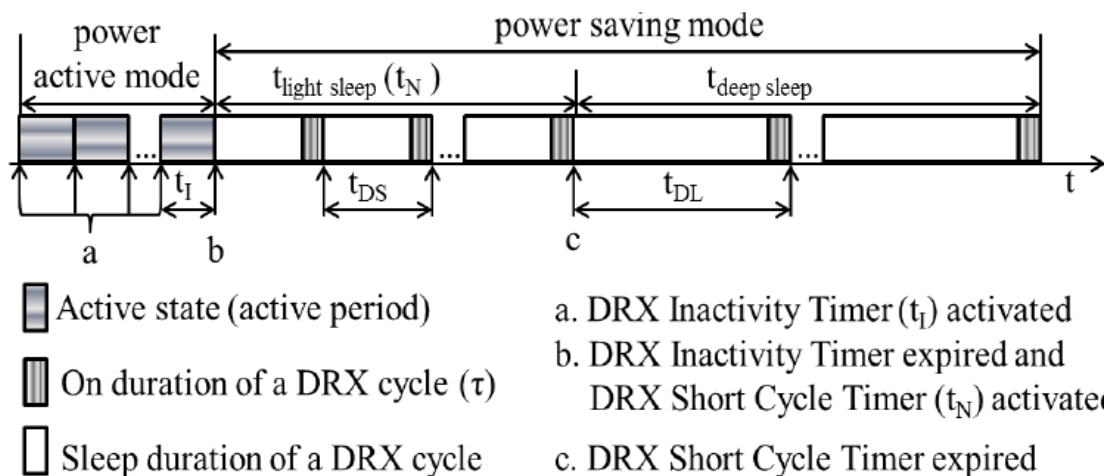
Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τις κινητές επικοινωνίες να υπάρχουν αποτελεσματικοί μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας, όπως η πηγή ενέργειας για τις ασύρματες συσκευές που είναι περιορισμένες. Η προτεινόμενη μέθοδος για ενεργειακά αποδοτική λειτουργία του LTE είναι να χρησιμοποιηθεί ο προγραμματισμός sleep (OFF)/wake (ON).



Η ενεργειακά αποδοτική στρατηγική του LTE αξιοποιεί τα σενάρια του DRX και του Discontinuous Transmission (DTX). Με τη χρήση του DRX/DTX, το τερματικό μπορεί να μετατρέψει το μόντεμ ραδιοσυχνοτήτων σε λειτουργία sleep για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, είτε στην κατάσταση RRC\_IDLE είτε στην κατάσταση RRC\_CONNECTED.

Στο μηχανισμό LTE DRX, ο προγραμματισμός sleep/wake του κάθε UE καθορίζεται από τις ακόλουθες τέσσερις παραμέτρους:

- DRX Σύντομου Κύκλου (DRX Short Cycle -  $t_{DS}$ ),
- DRX Μεγάλου Κύκλου (DRX Long Cycle -  $t_{DL}$ ),
- DRX Χρονοδιακόπτη Αδράνειας (DRX Inactivity Timer-  $t_I$ ) και
- DRX Χρονόμετρο Σύντομου Κύκλου (DRX Short Cycle Timer- $t_N$ ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 32.



Σχήμα 32. LTE DRX χρονοδιάγραμμα για λειτουργίες δέκτη UE, (πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk)

Τα  $t_{DS}$  και  $t_{DL}$  προσδιορίζουν τη διάρκεια της περιόδου ON και OFF, η οποία είναι μία σταθερή τιμή που εφαρμόζεται τόσο στο Σύντομο όσο και στο Μεγάλο κύκλο. Ο UE παρακολουθεί το φυσικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης (PDCCH) για να καθορίσει εάν υπάρχει μετάδοση μέσω του κοινόχρηστου καναλιού δεδομένων που διατίθεται για τον UE κατά τη διάρκεια της περιόδου ON. Η  $t_I$  καθορίζει τη χρονική περίοδο όπου το UE πρέπει να μείνει ξύπνιο και να παρακολουθεί το PDCCH μετά την τελευταία επιτυχή αποκωδικοποίηση των PDCCH. Ο  $t_N$  καθορίζει την περίοδο κατά την οποία ο UE πρέπει να ακολουθήσει το  $t_{DS}$  αφού το  $t_I$  έχει λήξει.



Στο LTE DRX, η λειτουργία sleep/wake αποτελείται από τρία διαφορετικά επίπεδα:

- Περίοδο Αδράνειας (Inactivity period),
- Περίοδο Ελαφρού Ύπνου (Light Sleep period), και
- Περίοδο Βαθύ Ύπνου (Deep Sleep period).

Η περίοδος Inactivity είναι η ενεργή λειτουργία ισχύος, ενώ οι περίοδοι Light Sleep και η Deep Sleep είναι η λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας. Η μετάβαση από την περίοδο αδράνειας στην περίοδο Light Sleep ελέγχεται από το  $t_I$ , ενώ η μετάβαση από τη περίοδο Light Sleep στην περίοδο Deep Sleep κατά τη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας ελέγχεται από το  $t_N$ .

Τα ακόλουθα περιγράφουν πώς λειτουργεί ο δέκτης UE κατά τη διάρκεια των περιόδων Inactivity, Light Sleep και Deep Sleep.

**Περίοδος DRX Inactivity:** Όταν ο DRX Χρονοδιακόπτης αδράνειας<sup>2</sup> είναι ON και ο δέκτης UE παρακολουθεί το PDCCH, την ίδια στιγμή είναι έτοιμος να λάβει πακέτα μέσω του involved node-B (eNB) από τον EPC. Κατά την διάρκεια του DRX Χρονοδιακόπτη αδράνειας, (όταν δεν είναι εκτός χρονικού ορίου) ο PDCCH υποδεικνύει μία μετάδοση κάτω ή άνω ζεύξης. Σε περίπτωση που λήξει ο DRX Χρονοδιακόπτης αδράνειας, τότε ο ενεργοποιείται ο Χρονοδιακόπτης DRX Short Cycle ενεργοποιείται και αρχίζει η περίοδος Light Sleep.

**Περίοδος DRX Light Sleep:** Η περίοδος είναι ο DRX Short Cycle ( $t_{DS}$ ). Κατά τη διάρκεια της περιόδου DRX Short Cycle ο UE ξυπνά για την παρακολούθηση του PDCCH (ενεργή κατάσταση - ενεργός περίοδος) ή επίσης γνωστή ως Listen Interval. Εάν ο PDCCH δείχνει μετάδοση κάτω ζεύξης, ο UE αλλάζει από την περίοδο Light Sleep σε μια Inactivity περίοδο και ξεκινά ο DRX Inactivity Timer. Διαφορετικά, ο UE θα επιστρέψει στην περίοδο Light Sleep. Ο UE θα κρατήσει τον Light Sleep μέχρι το DRX Short Cycle Timer<sup>3</sup> να λήξει. Ενώ στην περίοδο DRX Light Sleep ο eNB δεν θα διαβιβάζει όλα τα πακέτα στο UE.

**Περίοδος DRX Deep Sleep:** Κατά τη διάρκεια του DRX Deep Long Cycle το UE ξυπνά για την παρακολούθηση του PDCCH. Εάν ο PDCCH δείχνει μια μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης, ο UE αλλάζει από την περίοδο Deep Sleep σε ενεργή περίοδο και ξεκινά το DRX Inactivity Timer. Διαφορετικά, ο UE θα επιστρέψει στην περίοδο Deep Sleep. Κατά την περίοδο DRX Deep Sleep οι eNB δεν θα διαβιβάζουν πακέτα στο UE.

<sup>2</sup> καθορίζει τον αριθμό των διαδοχικών TTIs (Transmission time interval) κατά την οποία ο UE παρακολουθεί PDCCH μετά την επιτυχή αποκωδικοποίηση ενός PDCCH υποδεικνύοντας UL ή DL δεδομένα που μεταφέρει για αυτό το UE

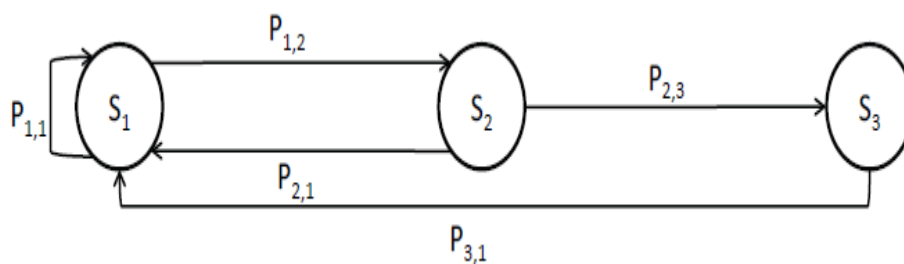
<sup>3</sup> Υποδεικνύει τον αριθμό των αρχικών DRX cycles για να ακολουθήσει το short DRX cycles πριν από τη μετάβαση του long DRX cycles



### 4.3.1.2 Αναλυτικό μοντέλο για LTE εξοικονόμησης ενέργειας

#### 4.3.1.2.1 Μοντέλο Bursty Packet Traffic

Για ορισμένα περιβάλλοντα, τα δεδομένα κίνησης είναι αυτο-όμοια σε σχέση με τα παραδοσιακές ουρές που εξαρτώνται από την κίνηση δεδομένων που είναι Poisson. Στο παραδοσιακό μοντέλο Κυκλοφορίας Poisson, έχει συνήθως ένα πολύ περιορισμένο εύρος της κλίμακας χρόνου. Με αυτο-όμοια κίνηση, εμφανίζει εκρηκτικότητα και αλληλεπιδρά πάνω από ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα της κλίμακας χρόνου.



Σχήμα 33. Semi-Markov διαδικασία για ανάλυση του LTE DRX, (πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk).

Ο μηχανισμός LTE DRX είναι μια διαδικασία semi-Markov και απεικονίζεται στο σχήμα 33. Το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων αποτελείται από τρεις καταστάσεις, οι οποίες σχετίζονται με τις τρεις περιόδους όπως φαίνεται στο Σχήμα 33.

- Η κατάσταση  $S_1$  περιλαμβάνει μία αλληλουχία γειτονικών ενεργών χρονικών διαστημάτων που αντιστοιχούν στο σύνολο της διάρκειας ενός ενιαίου πακέτου κλήσης μετάδοσης, δηλαδή ο UE είναι σε ενεργή λειτουργία ισχύος.
- Η κατάσταση  $S_2$  περιλαμβάνει μία περίοδο Light Sleep ( $t_{lightsleep}$  ( $t_N$ )) η οποία ξεκίνησε από το  $S_1$ , δηλαδή ο UE ακολουθεί DRX Short Cycles.
- Η κατάσταση  $S_3$  περιλαμβάνει μια περίοδο Deep Sleep ( $t_{deepsleep}$ ), η οποία ξεκίνησε από την  $S_2$ , δηλαδή ο UE ακολουθεί DRX Long Cycles.

Ένα νέο πακέτο κλήσης μπορεί να θεωρηθεί ως συνέχεια της τρέχουσας περιόδου (Κατάσταση 1) ή ως την έναρξη μιας νέας περιόδου λειτουργίας (Κατάσταση 2) εξαρτώμενη από το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών πακέτων κλήσεων. Το πακέτο κλήσεων μπορεί να είναι inter-packet call idle time ( $t_{ipc}$ ) με πιθανότητα





$P_{pc} = 1 - 1/\mu_{pc}$  ή να είναι inter-session idle time ( $t_{is}$ ) με πιθανότητα  $P_s = 1/\mu_{pc}$ .

Αν δούμε αυτή τη semi-Markov διαδικασία μόνο κατά τη στιγμή της μετάβασης, παίρνουμε ένα ενσωματωμένη Markov αλυσίδα με πιθανότητες μεταβατικής κατάστασης  $P_{i,j}$ , όπου  $i, j \in \{1, 2, 3\}$ .

#### 4.3.1.2.2 Μετάβαση από την Κατάσταση 1 στην Κατάσταση 1 και από την Κατάσταση 1 στην Κατάσταση 2

Η Κατάσταση  $S_1$  περιέχει  $N_p$  περιόδους αδράνειας<sup>4</sup>. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας περιόδου αδράνειας, εάν ο PDCCH υποδεικνύει την επόμενη παράδοση πακέτων κλήσης που συνέβη πριν λήξει ο DRX Inactivity Timer, ο DRX Inactivity Timer ακυρώνεται, μια άλλη περίοδος αδράνειας ξεκινάει και η κατάσταση  $S_1$  καταχωρείται εκ νέου (ο  $t_I$  δεν έχει λήξει). Διαφορετικά, εισάγεται η κατάσταση  $S_2$  όταν λήξει ο DRX Inactivity Timer. Η πιθανότητα ότι ένα νέο πακέτο κλήσης αρχίζει πριν από τη λήξη του  $t_I$  είναι  $q_1 = P_r[t_{ipc} < t_I] = 1 - e^{-\lambda_{ipc} t_I}$  στην Κατάσταση 1 και  $q_2 = P_r[t_{is} < t_I] = 1 - e^{-\lambda_{is} t_I}$  στην Κατάσταση 2, αντίστοιχα. Έτσι έχουμε:

$$P_{1,1} = P_{pc} q_1 + P_s q_2 \quad (1)$$

$$P_{1,2} = P_{pc} (1 - q_1) + P_s (1 - q_2) \quad (2)$$

#### 4.3.1.2.3 Ρυθμιζόμενος Χρονοδιακόπτης DRX για Κατάσταση Light Sleep

Ο Short DRX Cycle είναι ο πρώτος DRX κύκλος που πρέπει να ακολουθηθεί μετά την ενεργοποίηση του DRX. Οι πιθανοί short DRX cycles είναι  $2^n$ , όπου  $n = 1, 2, \dots, 9$  και  $5 \times 2^m$ , όπου  $m = 1, 2, \dots, 6$  από την άποψη των υποπλαισίων ή του χρόνου. Η διάρκεια του νιοστού διαστήματος ύπνου λαμβάνεται με:

$$T(n) = \begin{cases} k2^n & 1 \leq n < M \\ T_{\max} & M \geq n \end{cases}$$

<sup>4</sup> Αριθμός πακέτων για κάθε πακέτο κλήσης



όπου  $M$  είναι η τιμή για  $T(n) = T_{\max}$  και  $k$  είναι ένας παράγοντας επανακλιμακώσεως, το οποίο χρησιμοποιείται για να ελέγξει την συνολική διάρκεια του κύκλου Light Sleep. Η διάρκεια του  $k^{\text{th}}$  sleep cycle, ο οποίος αποτελείται από ένα διάστημα ύπνου και ένα διάστημα ακρόασης, δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{DS}^n = T_n + L \quad (3)$$

Όπου  $L$  είναι η διάρκεια του διαστήματος ακρόασης.

Η πιθανότητα ότι δεν υπάρχει έναρξη της αφύπνισης κατά τη διάρκεια  $C_{DS}^n(P_n)$  επιτυγχάνεται με:

$$P_n = e^{-\lambda C_{DS}^n}, 1 \leq n \leq M \quad (4)$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 27, ο χρόνος μετάβαση από το Light Sleep στο Deep Sleep αποτελείται είναι:

$$t_{CS} = t_N = k \sum_1^n C_{DS}^n \quad (5)$$

#### 4.3.1.2.4 Μετάβαση από την Κατάσταση 2 στην Κατάσταση 1 και από την Κατάσταση 2 στην Κατάσταση 3

Σύμφωνα με το ρυθμιζόμενο DRX Light Sleep cycle, η πιθανότητα ότι υπάρχει τουλάχιστον μία έναρξη αφύπνισης κατά την διάρκεια  $C_{DS}$  είναι  $1 - e^{-\lambda C_{DS}}$ . Στην Κατάσταση  $S_2$  το UE ακολουθεί DRX Short Cycles. Αν το PDCCH δηλώνει ότι ένα νέο πακέτο κλήσης ξεκινάει πριν λήξει το adjustable DRX Short Cycle Timer (αυτό σημαίνει νέο πακέτο κλήσης λαμβάνει χώρα πριν το  $t_N$  έχει λήξει), το χρονόμετρο ακυρώνεται, και η Κατάσταση  $S_1$  εισάγεται, διαφορετικά εισάγεται η Κατάσταση  $S_3$ . Η πιθανότητα ότι υπάρχει τουλάχιστον μία έναρξη αφύπνισης στο  $n^{\text{th}}$  κύκλο ύπνου κατά την διάρκεια μίας κατάστασης sleep λειτουργίας είναι:

$$\begin{aligned} P_{2,1} &= P_{pc} \cdot \sum_{\alpha}^n (1 - P_{\alpha}) + P_s \cdot \sum_{\alpha}^n (1 - P_{\alpha}) \quad (6) \\ &= P_{pc} (1 - \prod_{\alpha} e^{-\kappa \lambda_{ipc} C_{DS}^{\alpha}}) + P_s (1 - \prod_{\alpha} e^{-\kappa \lambda_{is} C_{DS}^{\alpha}}) \end{aligned}$$

και



$$\begin{aligned}
 P_{2,3} &= P_{pc} \cdot \sum_{\alpha}^n P_{\alpha} + P_s \cdot \sum_{\alpha}^n P_{\alpha} \\
 &= P_{pc} e^{-\lambda_{ipc} \sum_{\alpha}^n C_{Ds}^{\alpha}} + P_s e^{-\lambda_{is} \sum_{\alpha}^n C_{Ds}^{\alpha}} \\
 &= P_{pc} \prod_{\alpha}^n e^{-\kappa_{ipc} C_{Ds}^{\alpha}} + P_s \prod_{\alpha}^n e^{-\kappa_{is} C_{Ds}^{\alpha}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

#### 4.3.1.2.5 Μετάβαση από την Κατάσταση 3 στην Κατάσταση 1

Υπάρχει μόνο μία μετάβαση από την κατάσταση  $S_3$  στην κατάσταση  $S_1$ , έτσι, έχουμε  $P_{3,1} = 1$ .

#### 4.3.1.2.6 Μεταβατική Πιθανότητα Matrix

Η Μεταβατική πιθανότητα matrix  $P = (P_{i,j})$  της ενσωματωμένης αλυσίδας Markov chain μπορεί, να δοθεί ως εξής (8):

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & 0 \\ P_{2,1} & 0 & P_{2,3} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

Αν  $\pi_i (i \in \{1,2,3\})$ , υποδηλώνει την πιθανότητα ότι η ενσωματωμένη αλυσίδα Markov είναι στην κατάσταση  $S_i (i \in \{1,2,3\})$ . Με τη χρήση  $\sum_{j=1}^3 \pi_j = 1$  και την εξίσωση του ισοζυγίου  $\pi_i = \sum_{j=1}^3 \pi_j P_{j,i}$ , μπορούμε να λύσουμε τη στάσιμη κατανομή και να εξασφαλίσουμε την εξίσωση (9),

$$\Pi = \left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{1}{1 + P_{1,2} + P_{1,2} P_{2,3}} \\ \pi_2 = \frac{P_{1,2}}{1 + P_{1,2} + P_{1,2} P_{2,3}} \\ \pi_3 = \frac{P_{1,2} P_{2,3}}{1 + P_{1,2} + P_{1,2} P_{2,3}} \end{array} \right\} \tag{9}$$

Αν  $H_i (i \in \{1,2,3\})$ , αντιπροσωπεύει τον χρόνο διατήρησης της semi-Markov διαδικασίας στην κατάσταση  $S_i (i \in \{1,2,3\})$ .



$E[H_i]$ : Στην κατάσταση  $S_1$ , η κινητή συσκευή βιώνει μια πολυάσχολη περίοδο  $t_B$ <sup>5</sup> και στη συνέχεια μια interpacket call inactivity period  $t_I$ . Στο LTE ο αλγόριθμος 8-process Stop-And-Wait Hybrid Automatic Request (SAWHARQ) flow-control υλοποιείται στην μετάδοση πακέτων, το οποίο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα M/M/8 μοντέλο ουράς.

Σύμφωνα με την εξίσωση [6] έχουμε:

$$E[H_1] = E[t_B] + E[t_I] \quad (10)$$

Γεδομένου ότι μια πολυάσχολη περίοδος είναι ίδια με τη διάρκεια της παράδοσης πακέτων κλήσης, ένα  $t_B$  αποτελείται από  $N_p$  πακέτα που εξυπηρετούν χρόνους σε  $t_x$ <sup>6</sup>.

Επίσης έχουμε:

$$E[t_B] = E[N_p]E[t_x] = \frac{\mu_p}{\lambda_x} \quad (11)$$

όπου  $\mu_p$  είναι ο αριθμός των πακέτων κλήσης μέσα σε μια συνεδρία υπηρεσίας πακέτων και  $\lambda_x$  είναι το Inter-packet arrive time.

Εάν ένα πακέτο φτάσει πριν λήξει ο Inactivity Timer ( $t_{ipc} < t_I$ ), τότε η περίοδος Inactivity ισούται με το inter-packet call idle time  $t_I = t_{ipc}$ . Διαφορετικά, το επόμενο πακέτο φτάνει αφού λήξει ο Χρονοδιακόπτης αδράνειας DRX ( $t_I \geq t_{ipc}$ ). Ως εκ τούτου, έχουμε  $t_I = \min(t_{ipc}, t_I)$ . Ομοίως, σε Inter-session idle χρόνο ( $t_{is}$ ), έχουμε  $t_I = \min(t_{is}, t_I)$ .

Επομένως, έχουμε για  $t_I$  για  $t_{ipc}$  και  $t_{is}$  αποδόσεις:

$$E[t_I] = P_{pc}E[\min(t_{ipc}, t_I)] + P_sE[\min(t_{is}, t_I)] \quad (12)$$

Έχουμε εξασφαλίσει ότι:

<sup>5</sup> αποτελείται από τον αριθμό των πακέτων μέσα σε ένα πακέτο ανά κλήση

<sup>6</sup> Το χρονικό διάστημα μεταξύ όταν το πακέτο που μεταδίδεται από το LTE επεξεργαστή RNC και όταν η αντίστοιχη θετική ACK λαμβάνεται από το επεξεργαστή LTE RNC



$$\begin{aligned}
 E[\min(t_{ipc}, t_I)] &= \int_{x=0}^{\infty} P_r[\min(t_{ipc}, t_I) > x] dx & (13) \\
 &= \int_{x=0}^{t_I} P_r[t_{ipc} > x] dx \\
 &= \int e^{-\lambda_{ipc}x} dx = \left(\frac{1}{\lambda_{ipc}}\right)[1 - e^{-\lambda_{ipc}t_I}]
 \end{aligned}$$

Όπου  $f(t_{ipc}) = \lambda_{ipc} e^{-\lambda_{ipc}t_{ipc}}$  είναι το PDF των inter-packet call idle time  $t_{ipc}$ .

Επίσης:

$$E[\min(t_{is}, t_I)] = \left(\frac{1}{\lambda_{is}}\right)[1 - e^{-\lambda_{is}t_I}] \quad (14)$$

Υποκατάστατη εξίσωση (13) και (14) σε (12):

$$E[t_I] = \left(\frac{P_{pc}}{\lambda_{ipc}}\right)[1 - e^{-\lambda_{ipc}t_I}] + \left(\frac{P_s}{\lambda_{is}}\right)[1 - e^{-\lambda_{is}t_I}] \quad (15)$$

Υποκατάστατη εξίσωση (11) και (15) σε (10):

$$E[H_1] = \left(\frac{\mu_p}{\lambda_x}\right) + \left(\frac{1}{\lambda_{ipc}}\right)[1 - e^{-\lambda_{ipc}t_I}] + \left(\frac{1}{\lambda_{is}}\right)[1 - e^{-\lambda_{is}t_I}] \quad (16)$$

#### 4.3.1.3 Ρυθμιζόμενοι DRX Κύκλοι σε LTE

Στη συνέχεια αναλύουμε την καθυστέρηση αφύπνισης από το DRX. Είτε είμαστε στην κατάσταση Deep Sleep ή Light Sleep μια μετάδοση πακέτων κλήσης μπορεί να ξεκινήσει σε μία από τις καταστάσεις sleep. Η πιθανότητα ένα πακέτο κλήση να παραδοθεί ξεκινά κατά την διάρκεια του  $i^{th}$  DRX Cycle είναι σε ένα σταθερό DRX Cycles:



$$p_i = \begin{cases} \underbrace{P_{pc} e^{-\lambda_{ipc} t_I} e^{-\lambda_{ipc} (i-1) t_{DS}} (1 - e^{-\lambda_{ipc} t_{DS}})}_{1 \leq i \leq N_{DS}} \\ + \underbrace{P_s e^{-\lambda_{is} t_I} e^{-\lambda_{is} (i-1) t_{DS}} (1 - e^{-\lambda_{is} t_{DS}})}_{1 \leq i \leq N_{DS}} \\ P_{pc} e^{-\lambda_{ipc} [(t_I + N_{DS} t_{DS} + (i - N_{DS} + (i - N_{DS} - 1) t_{DL})]} (1 - e^{-\lambda_{ipc} t_{DL}}) \\ + \underbrace{P_s e^{-\lambda_{is} [(t_I + N_{DS} t_{DS} + (i - N_{DS} + (i - N_{DS} - 1) t_{DL})]} (1 - e^{-\lambda_{is} t_{DL}})}_{i \geq N_{DS}}, \end{cases} \quad (17)$$

Ωστόσο, έχοντας ρυθμιζόμενο DRX Sleep cycle σε  $t_{DS}$ , η εξίσωση (17), η πιθανότητα μια παράδοση πακέτων κλήσης ξεκινά κατά τη διάρκεια του κύκλου  $i^{th}$  DRX Cycle είναι τώρα:

$$p_i = \begin{cases} \underbrace{P_{pc} e^{-\lambda_{ipc} t_I} \prod_{j=1}^i e^{-k \lambda_{ipc} C_{DS}^j} (1 - e^{-k \lambda_{ipc} C_{DS}^j})}_{1 \leq i \leq N_{DS}} \\ + \underbrace{P_s e^{-\lambda_{is} t_I} \prod_{j=1}^i e^{-k \lambda_{is} C_{DS}^j} (1 - e^{-k \lambda_{is} C_{DS}^j})}_{1 \leq i \leq N_{DS}} \\ P_{pc} e^{-\lambda_{ipc} [(t_I + t_N + (i - N_{DS} - 1) t_{DL})]} (1 - e^{-\lambda_{ipc} t_{DL}}) \\ + \underbrace{P_s e^{-\lambda_{is} [(t_I + t_N + (i - N_{DS} - 1) t_{DL})]} (1 - e^{-\lambda_{is} t_{DL}})}_{i \geq N_{DS}}, \end{cases} \quad (18)$$

#### 4.3.1.4 Καταστάσεις Ύπνου $H_2$ και $H_3$

Η κατάσταση  $S_2$  περιλαμβάνει μία περίοδο Light Sleep αποτελούμενη από  $N_{DS}$  DRX Short Cycles. Θεωρούμε ως  $N_{DS}$  το συνολικό μήκος του  $t_N$ . Στην περίπτωση αυτή, ο DRX Short Cycle Timer έχει λήξει και η κατάσταση  $S_3$  ξεκινά. Η πιθανότητα ότι ένα νέο πακέτο κλήσης ξεκινάει πριν λήξει ο  $t_N$  καταλήγει  $N_{DS}^*$ ,  $N_{DS}^* < N_{DS}$ . Ως εκ τούτου, ο μέσος χρόνος κατοχής στην κατάσταση  $S_2$  είναι:

$$\begin{aligned} E[H_2] &= E[N_{DS}] \langle t_{CS} \rangle \\ &= (P_{23} N_{DS} + P_{21} E[N_{DS}^*]) \kappa \sum_{i=1}^n \frac{C_{DS}^i}{n} \end{aligned} \quad (19)$$



Λόγω της έλλειψης κύριας μνήμης της εκθετικής  $t_{ipc}$  και  $t_{is}$ , το  $N_{DS}^*$  έχει μια γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή  $\frac{1}{P_{DS}}$ , όπου  $P_{DS}$  είναι η πιθανότητα όπου τα πακέτα φτάνουν κατά τη διάρκεια ενός κύκλου DRX και προκύπτει ως εξής:

$$E[N_{DS}^*] = \frac{P_{pc}}{P_r[t_{ipc} < C_{DC}]} + \frac{P_s}{P_r[t_{is} < C_{DC}]} = \frac{P_{pc}}{1 - \prod_{i=1}^n e^{-k\lambda_{ipc}C_{DS}^i}} + \frac{P_s}{1 - \prod_{i=1}^n e^{-k\lambda_{is}C_{DS}^i}} \quad (20)$$

Τότε αντικαθιστούμε τις εξισώσεις (6), (7) και (20) σε (19):

$$\begin{aligned} E[H_2] &= ([P_{pc} \prod_{\alpha}^n e^{-k\lambda_{ipc}C_{DS}^{\alpha}} + P_s \prod_{\alpha}^n e^{-k\lambda_{is}C_{DS}^{\alpha}}] N_{DS} \\ &+ [P_{pc} (1 - \prod_{\alpha}^n e^{-k\lambda_{ipc}C_{DS}^{\alpha}}) + [P_s (1 - \prod_{\alpha}^n e^{-k\lambda_{is}C_{DS}^{\alpha}})]) \\ &\cdot [\frac{P_{pc}}{1 - \prod_{\alpha=1}^n e^{-k\lambda_{ipc}C_{DS}^{\alpha}}} + \frac{P_s}{1 - \prod_{\alpha=1}^n e^{-k\lambda_{is}C_{DS}^{\alpha}}}] \kappa \sum_{\alpha=1}^n \frac{C_{DS}^{\alpha}}{n} \end{aligned} \quad (21)$$

Η κατάσταση  $S_3$  περιέχει μία περίοδο βαθύ ύπνου αποτελούμενη από την κατάσταση  $n_{DL}$  Long DRX Cycles. Επομένως:

$$E[H_3] = (\frac{P_{pc}}{1 - e^{-\lambda_{ipc}t_{DL}}} + \frac{P_s}{1 - e^{-\lambda_{is}t_{DL}}}) t_{DL} \quad (22)$$

#### 4.3.1.5 Συντελεστής Εξοικονόμησης Ενέργειας (Power Saving Factor-PS)

Ο power saving factor (PS) είναι ίσος με την πιθανότητα όπου η διαδικασία semi-Markov είναι στην  $S_2$  και  $S_3$  στην σταθερή κατάσταση. Κάθε DRX Short Cycle και κάθε DRX Long Cycle περιέχει μία σταθερά για την διάρκεια  $\tau$  έτσι ώστε να μπορεί να ακούει τις πληροφορίες paging από το δίκτυο. Ως εκ τούτου, ο πραγματικός χρόνος ύπνου είναι  $C_{DS} - \tau$  ή  $t_{DS} - \tau$ . Αποτέλεσμα αυτού, ο πραγματικός χρόνος του ύπνου και στις δύο καταστάσεις  $S_2$  και  $S_3$  προκύπτει ως εξής:

$$E[H_2'] = (P_{23} N_{DS} + P_{21} E[N_{DS}^*]) (\kappa \sum_{i=1}^n \frac{C_{DS}^i}{n} - \tau) \quad (23)$$



και

$$E[H_3'] = \left( \frac{P_{pc}}{1 - e^{-\lambda_{ipc} t_{DL}}} + \frac{P_s}{1 - e^{-\lambda_{is} t_{DL}}} \right) (t_{DL} - \tau) \quad (24)$$

Από το Θεώρημα 4.8.3, παίρνουμε  $PS = \lim_{t \rightarrow \infty} P_r$  [ο UE δέκτης είναι απενεργοποιημένος τη χρονική στιγμή  $t$ ] για το PS πρέπει να ληφθεί έως:

$$PS = \frac{\pi_2 E[H_2'] + \pi_3 E[H_3']}{\sum_{i=1}^3 \pi_i E[H_i]} \quad (25)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (18), (16), (21), (22), (23), (24) στην εξίσωση (25), αντλούμε την εξίσωση κλειστής μορφής για τον power saving factor PS.

Οι αφίξεις πακέτων κλήσης ακολουθούν μια κατανομή Poisson δεδομένου ότι ο inter-packet call idle time και ο inter-session idle timer είναι τυχαίες εκθετικά κατανομημένες μεταβλητές. Επίσης, το event άφιξης είναι τυχαίος παρατηρητής. Ως εκ τούτου, έχουμε:

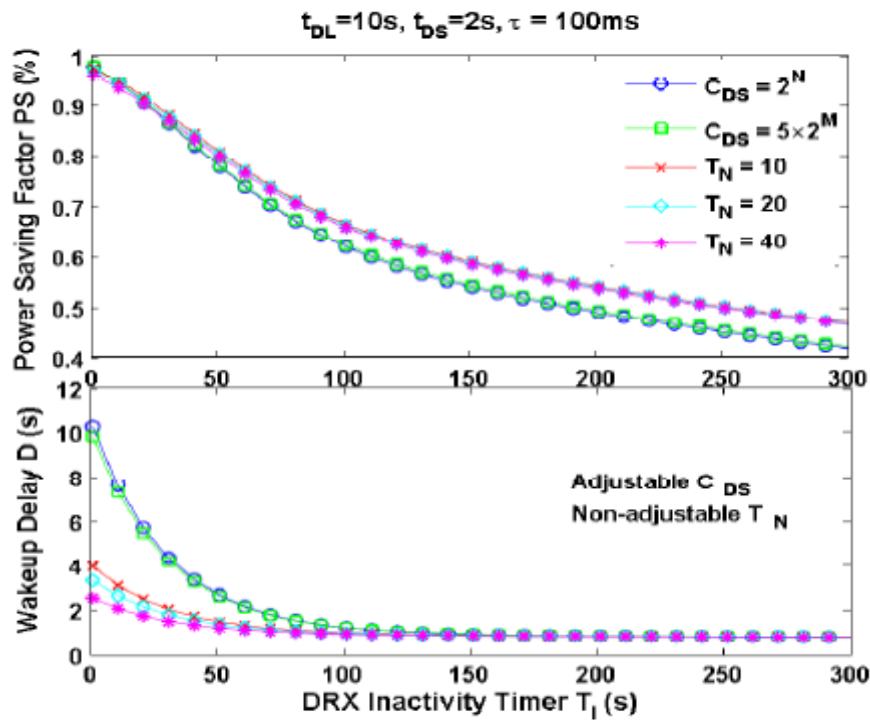
$$E[D] = \sum_{i=1}^{N_{DS}} p_i \frac{C_{DS}^i}{2i} + \sum_{i=N+1}^{\infty} p_i \frac{t_{DL}}{2} \quad (26)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (18) στην εξίσωση (26), αντλούμε την εξίσωση κλειστής μορφής για τη μέση τιμή της wake-up delay  $E[D]$ .

#### 4.3.1.6 Αριθμητικά αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του DRX Inactivity Timer  $T_I$  και του DRX Short Cycle Timer  $T_N$  περιγράφονται στα σχήματα 34 - 35. Τόσο το PS όσο και το D μειώνονται όσο ο  $T_I$  και  $T_N$  αυξάνουν με την μη-ρυθμιζόμενη προσέγγιση, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τη ρυθμιζόμενη περίπτωση.

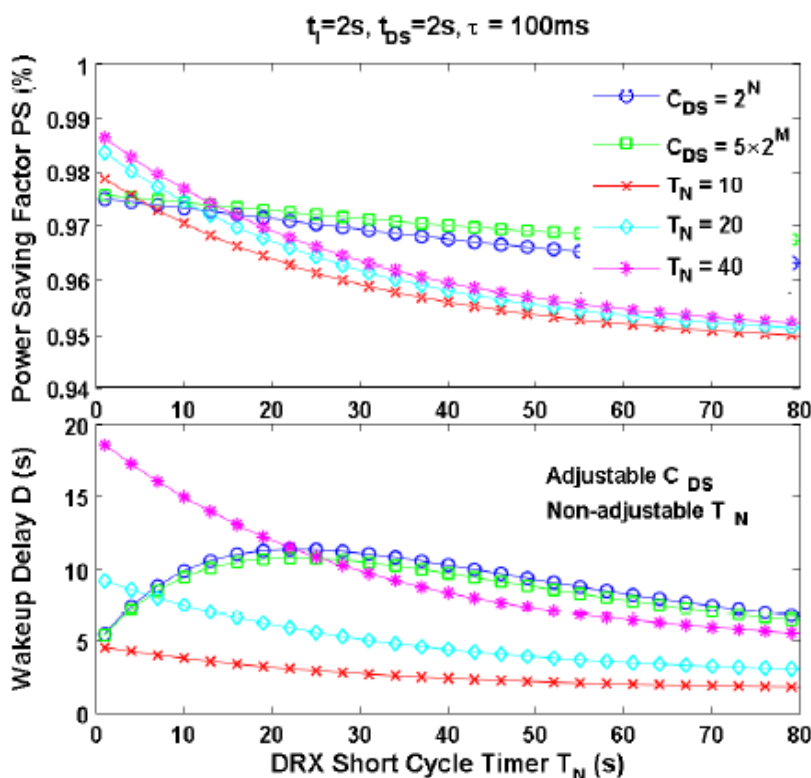




Σχήμα 34: LTE DRX Inactivity Timer στο  $T_I$  για Ενέργεια

LTE DRX Inactivity Timer στο  $T_I$  για Καθυστέρηση

(πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk)



Σχήμα 35: LTE DRX Short Cycle στο  $T_N$  για Ενέργεια

LTE DRX Short Cycle στο  $T_N$  για Καθυστέρηση

(πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk).

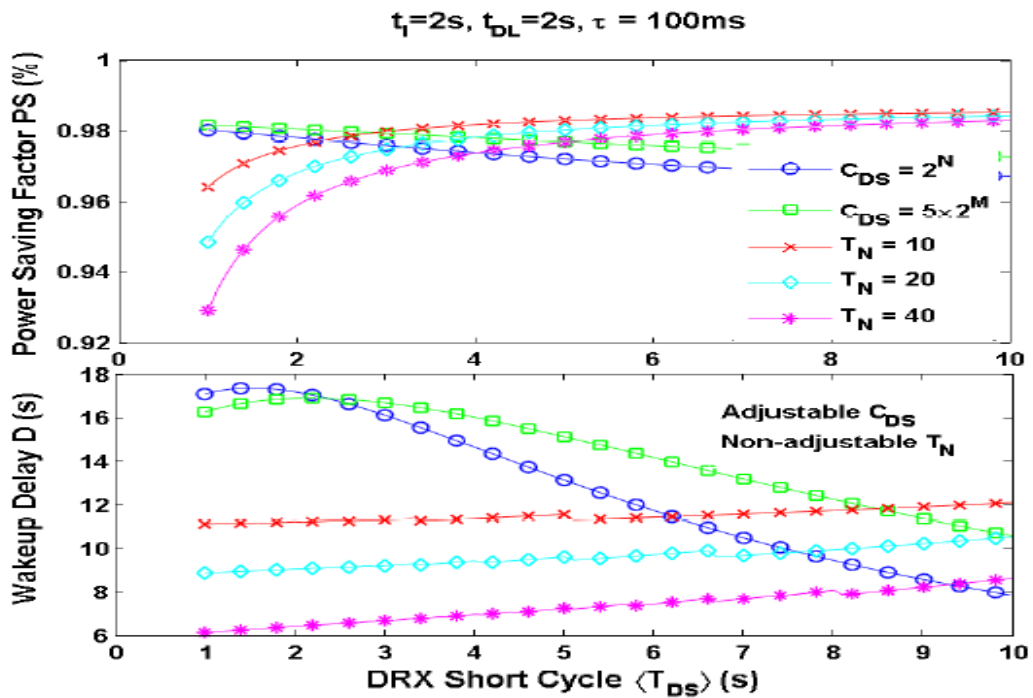
Όταν ο  $T_I$  γίνεται μεγαλύτερος, στην περίπτωση του μη ρυθμιζόμενου κύκλου, είναι πιο πιθανό ένα πακέτο κλήσης να εμφανίζεται πριν από την λήξη του DRX Inactivity Timer, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται λιγότερες μεταβάσεις σε κατάσταση λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας. Δεδομένου ότι ο αριθμός των μεταβάσεων σε λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας είναι πιο σπάνιες, οι επιπτώσεις του ποσού καθυστερήσεων των παραδόσεων πακέτων κλήσεων θα είναι ελάχιστης σημασίας όσο η εξοικονόμηση ενέργειας και η καθυστέρησης είναι μικρότερες.

Σε χαμηλότερες τιμές του  $T_I$  για το ρυθμιζόμενο κύκλο DRX, ο UE βρίσκεται στη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, όμως, όσο ο  $T_I$  γίνεται μεγαλύτερος το PS μειώνεται για ρυθμιζόμενο DRX ενώ το μη-ρυθμιζόμενο PS είναι υψηλότερο. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο χρόνο παραμονής σε λειτουργία PS, αφού ο  $C_{DS}$  είναι μικρότερος με ένα ρυθμιζόμενο DRX στην αρχή, αλλά στη συνέχεια γίνεται μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερες μεταβάσεις στη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας.



Στο Σχήμα 35 το ρυθμιζόμενο DRX έχει χαμηλότερη αξία εξοικονόμησης ενέργειας όταν ο  $T_N$  βρίσκεται μεταξύ 8 - 18, αλλά έχει μεγαλύτερο παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας όσο ο  $T_N$  αυξάνεται. Η εξοικονόμηση ενέργειας εξακολουθεί να μειώνεται, λόγω του γεγονότος ότι το UE είναι λιγότερο πιθανό να εισέλθει στην περίοδο Deep Sleep. Δεδομένου ότι οι ρυθμιζόμενοι DRX κύκλοι preforms καλύτερη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας σε μικρές τιμές του  $T_N$ , η αντίστοιχη καθυστέρηση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την μη-ρυθμιζόμενη περίπτωση. Αλλά, όσο το  $T_N$  αυξάνεται στο μέγεθος, η καθυστέρηση κορυφώνεται περίπου στα 25 και στη συνέχεια μειώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη εκθετική κατανομή των πλαισίων εντός της περιόδου Light Sleep και την στατιστική φύση των πακέτων, τα οποία αρχίζουν να καταφθάνουν στην πιο πυκνή περιοχή του κύκλου.

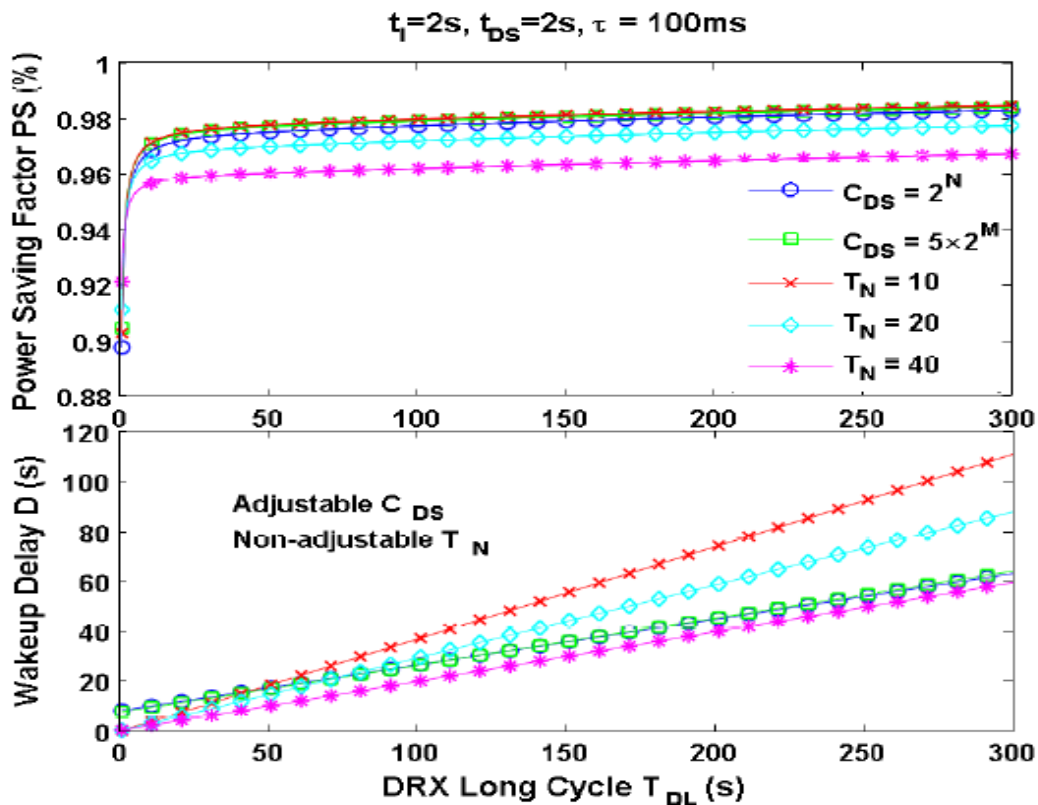
Η εξοικονόμηση ενέργειας και η καθυστέρηση που φαίνεται στο σχήμα 36 αυξάνονται τόσο για το  $T_{DS}$  όσο και για το  $T_{DL}$  για τη μη ρυθμιζόμενο μέθοδο, όπου βάσει του Sleep Cycles είναι μεγαλύτερα και η «ON Διάρκεια είναι σταθερή». Όσο μεγαλύτεροι Κύκλοι DRX υπάρχουν τόσο πιο αποτελεσματικό χρόνο ύπνου ανά κύκλο, τόσο καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση της απόδοσης της wake-up καθυστέρησης έχουμε.



Σχήμα 36. LTE DRX Short Cycles στο  $T_{DS}$  για Ενέργεια

LTE DRX Short Cycle στο  $T_{DS}$  για Καθυστέρηση

(πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk).



Σχήμα 37. LTE DRX Long Cycle στο  $T_{DL}$  για Ενέργεια

LTE DRX Short Cycle στο  $T_{DL}$  for Καθυστέρηση

(πηγή: **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk).

Ο συντελεστής εξοικονόμησης ενέργειας στο σχήμα 36 μειώνεται για την ρυθμιζόμενη περίπτωση. Όσο οι Sleep Cycles αυξάνονται σε μέγεθος και το " ON Διάρκεια είναι ρυθμιζόμενο", ο μεγαλύτερος DRX Cycles μεταφράζεται σε λιγότερο αποτελεσματικό χρόνο ύπνου ανά κύκλο, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης για εξοικονόμηση ενέργειας. Το  $T_{DS}$  στο σχήμα 36 έχει μεγαλύτερη wake-up καθυστέρηση, περίπου 1.5, αλλά στη συνέχεια αρχίζει να βελτιώνεται, η οποία οφείλεται στη συσχέτιση μεταξύ των εκθετικής κατανομής των πλαισίων μέσα στο ρυθμιζόμενο κύκλο DRX και της στατιστικής φύση των πακέτων.

Ο ρυθμιζόμενος κύκλος DRX είναι σε θέση να προσαρμοστεί στη συμπεριφορά προγραμματισμού του συστήματος, προκειμένου να ενισχυθεί ο μηχανισμός του κέρδους της εξοικονόμησης ενέργειας για  $T_{DL}$ . Ωστόσο, έχοντας αύξηση του Συντελεστή Εξοικονόμησης Ενέργειας, αναπόφευκτα επηρεάζεται η απόδοση της καθυστέρησης αφύπνιση, όπως στην κατάσταση όταν ο  $T_N$  βρίσκεται στην περιοχή γύρω στα 30, όπως φαίνεται στο Σχήμα 37. Αν και σε μεγαλύτερες τιμές του



γύρω στα 40 και άνω και για τους δύο  $C_{DS} = 2^N$  και  $C_{DS} = 5 \times 2^M$  το ρυθμιζόμενο κύκλο DRX έχει μικρότερη καθυστέρηση.

#### 4.3.1.7 Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη μέθοδο έγινε μια επισκόπηση του LTE DRX μηχανισμού με ρυθμιζόμενους και μη ρυθμιζόμενους κύκλους DRX και το μοντέλο με κίνηση bursty πακέτων δεδομένων χρησιμοποιώντας μία semi-Markov διαδικασία.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η ρυθμιζόμενη LTE DRX αποδίδει διαφορετικά σε σύγκριση με το μη ρυθμιζόμενο LTE DRX.



## 4.3.2 Green Distance-Aware Base Station Sleeping Αλγόριθμος

### 4.3.2.1 Εισαγωγή

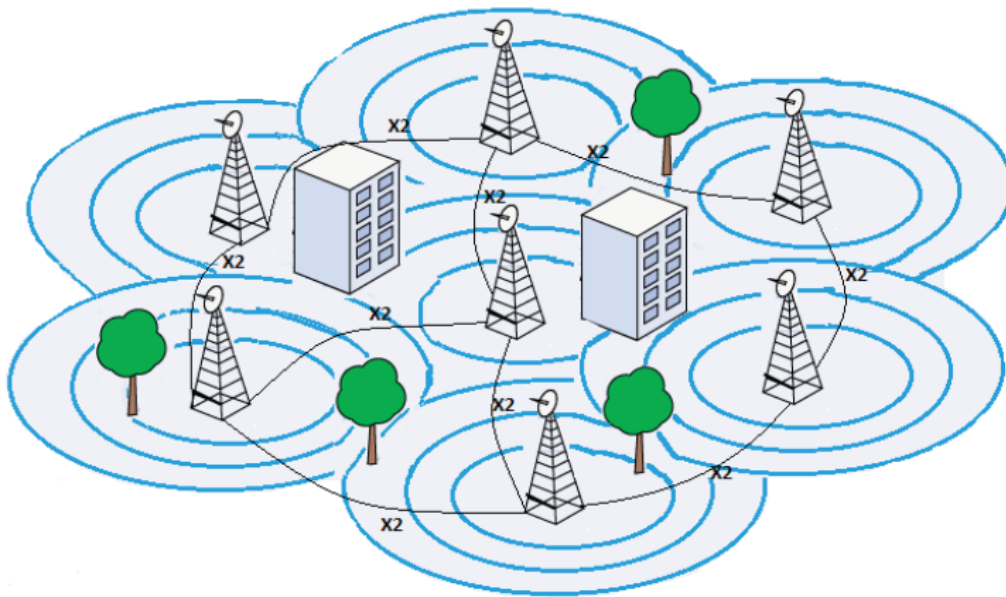
Ο σκοπός στη συγκεκριμένη προσέγγιση είναι να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, μειώνοντας τον αριθμό των ενεργών σταθμών βάσης (BSs). Οι BSs απενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλής κυκλοφορίας, όταν η παρουσία τους δεν είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Η απόφαση για το ποιοι BSs θα πρέπει να απενεργοποιηθούν είναι είτε τυχαία, είτε με βάση την κίνηση του φορτίου του σε κάθε BS (π.χ. ο BS με το χαμηλότερο φορτίο κίνησης απενεργοποιείται).

Στην συγκεκριμένη προσέγγιση εξετάζουμε την απόσταση μεταξύ των UEs και των σχετικών eNBs τους, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας του συνολικού δικτύου. Το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας μελετάται σβήνοντας κάποιους eNBs υπό χαμηλές συνθήκες κυκλοφορίας.

Για το σκοπό αυτό προτείνεται συγκεκριμένος αλγόριθμος με συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα.

### 4.3.2.2 Το Μοντέλο του Συστήματος

Θεωρούμε ένα πυκνό ανεπτυγμένο δίκτυο, όπου οι περιοχές κάλυψης των γειτονικών κυττάρων αλληλεπικαλύπτονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 38. Το δίκτυό μας αποτελείται από ένα σύνολο  $K$  κυττάρων που έχουν την ίδια ακτίνα κάλυψης  $R$  και κυκλοφορία φορτίου που έχει το μοντέλο περιοδικό ημέρας/νύχτας (σχήμα 39).



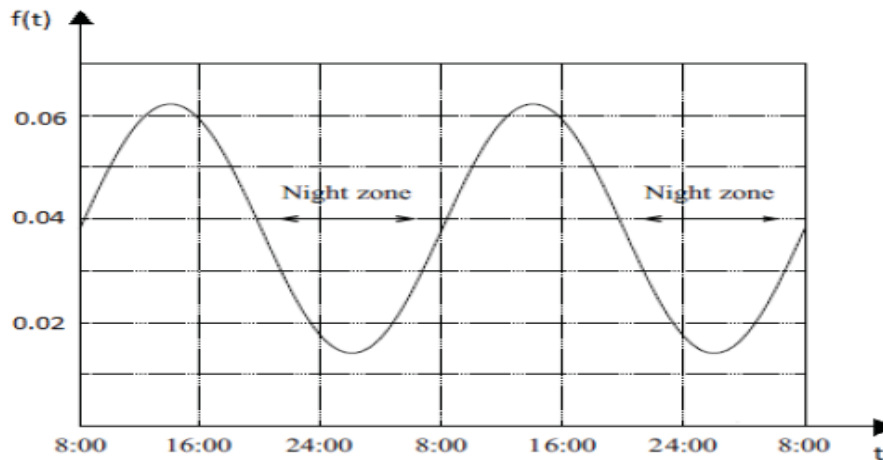
Σχήμα 38. Τοπολογία Δικτύου, (πηγή: **"Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced**, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).

Εξετάζουμε ένα μοντέλο παραγωγής κυκλοφορίας που βασίζεται σε μια M/M/N ουρά, το οποίο αντιπροσωπεύει τη ροή της κυκλοφορίας μεταξύ των UEs και των eNBs στο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μας. Το μοντέλο βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- (i) οι eNBs παράγουν κυκλοφορία (ή κίνηση), σύμφωνα με μια διαδικασία Poisson με μέση τιμή  $\lambda$ ,
- (ii) Ο χρόνος υπηρεσίας κυκλοφορίας ακολουθεί μια εκθετική κατανομή με μέση τιμή  $1/\mu$ .

Παρά τις απλουστεύσεις που έχουν γίνει στο μοντέλο της κυκλοφορίας, εξακολουθεί να αποτελεί την κατάλληλη και ρεαλιστική απεικόνιση της κίνησης, προκειμένου να εκτιμηθεί το ποσό της εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί με energy-aware προγραμματισμό. Ο ρυθμός παραγωγής κλήσης έχει ως χαρακτηριστικό το μοντέλο περιοδικό ημέρας/νύχτας, όπως αυτό που αναφέρεται στο σχήμα 39. Η συνάρτηση κίνησης  $f(t)$  έχει το απλό ημιτονοειδές σχήμα, το οποίο υποθέτουμε ότι αντιστοιχεί στο μοντέλο ημέρα/νύχτα. Η νυχτερινή ζώνη εκτείνεται από 8μμ έως 8πμ. Υποθέτουμε ότι το καθημερινό προφίλ κίνησης επαναλαμβάνεται περιοδικά, και η μέση κίνηση ανά χρήστη σε όλα τα δίκτυα πρόσβασης είναι το ίδιο, έτσι ώστε η συνολική κίνηση να είναι ανάλογη με τον αντίστοιχο αριθμό των χρηστών.





Σχήμα 39. Ρυθμός παραγωγής κυκλοφορίας σε σχέση χρόνου, (πηγή: "Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis)

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας του eNB σε ένα κύτταρο, γνωρίζουμε ότι η συνολική ενέργεια λειτουργίας του αποτελείται από δύο μέρη:

ένα σταθερό τμήμα  $E_{const}$  που καλύπτει την ενέργεια που είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των χρηστών και τις αποστάσεις τους (π.χ. ισχύς για την ψύξη, τροφοδοτικό, κ.λπ.) και

ένα δυναμικό τμήμα  $E_{dyn}$  που αντιστοιχεί στην κατανάλωση ενέργειας για τη ραδιο λειτουργία. Το δυναμικό τμήμα αποτελείται από δύο μέρη: το  $E_{trans}$ , είναι η ενέργεια κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, που εξαρτάται από τον αριθμό των χρηστών και την απόστασή τους από τους συνδεδεμένους eNBs, και το  $E_{idle}$  που αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται όταν ο eNB βρίσκεται σε κατάσταση idle.

Η συνολική ενέργεια λειτουργίας δίνονται στις ακόλουθες εξισώσεις. Για ένα μονό κύτταρο, με έναν eNB που εξυπηρετεί  $N$  χρήστες, η συνολική κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$E_{total} = E_{const} + E_{dyn} \quad (1)$$

$$E_{const} = P_{const} \cdot t_{on} \quad (2)$$

$$E_{dyn} = \sum_{i=1}^N (P_{trans,i} \cdot t_{trans,i}) + P_{idle} \cdot t_{idle} \quad (3)$$

όπου



$P_{const}$  : είναι η κατανάλωση ενέργειας του eNB όταν είναι ενεργός,

$t_{on}$  : είναι ο συνολικός χρόνος όπου ο eNB είναι ενεργός,

$P_{trans,i}$  : είναι η ισχύς που καταναλώνεται κατά την μετάδοση στο UE  $i$ ,

$t_{trans,i}$  : είναι ο χρόνος όπου ο eNB μεταφέρει δεδομένα στο UE  $i$ ,

$P_{idle}$  : είναι η κατανάλωση ενέργειας του eNB όταν είναι αδρανής,

$t_{idle}$  : είναι ο χρόνος όπου ο eNB είναι αδρανής

Η ισχύς μετάδοσης μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$P_{trans,i} = P_{max} \cdot \min \left\{ \frac{1}{N_{RB}}, \max[R_{min}, \left(\frac{L_{x-ile,i}}{L}\right)^a] \right\} \quad (4)$$

$$L_{x-ile,i} = l = 37.6 \cdot \log_{10} R_i \quad (5)$$

όπου

$P_{max}$  : είναι η μέγιστη ισχύς μετάδοσης,

$N_{RB}$  : είναι ο αριθμός των υποπλαισίων που αναθέτονται στο UE,

$R_{min}$  : είναι το ελάχιστο ποσοστό μείωσης ισχύος για να αποτρέψει τους UEs με καλά κανάλια να μεταδώσουν σε πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος,

$L_{x-ile,i}$  : είναι το  $x$ -percentile pathloss για τον χρήστη  $i$ . Αν  $x$  έχει οριστεί σε 5, τότε στατιστικά 5% των UEs με κακά κανάλια θα μεταδώσουν σε  $P_{max}$ ,

$0 < a < 1$ : είναι εξισορροπητικός παράγοντας για UEs με κακά κανάλια και UEs με καλά κανάλια,

$L$ : είναι το pathloss,

$l$ : είναι μια σταθερά που ενσωματώνει το γρήγορο fading και τη σκίαση του καναλιού,

$R_i$  : είναι η απόσταση μεταξύ του UE  $i$  και eNB

Επιπλέον υποθέτουμε ότι όταν σβήνουμε έναν από τους eNBs, το κυκλοφοριακό φορτίο θα πρέπει να εξυπηρετείται από έναν γειτονικό eNB που παραμένει ενεργός. Ως εκ τούτου, η συνολική κατανάλωση ενέργειας του eNB, που παραμένει σε λειτουργία είναι:



$$E_{total\_new} = E_{total} = \Delta E \quad (6)$$

$$\Delta E = \sum_{i=1}^N P_{\max} \cdot \min \left\{ \frac{1}{N_{RB}}, \max \left[ R_{\min}, \left( \frac{l + 37.6 \cdot \log_{10} R_i}{L} \right)^\alpha \right] \right\} \cdot t_{trans,i} \quad (7)$$

Όπου,

$E_{total}$ : είναι η κατανάλωση ενέργειας του eNB λαμβάνοντας υπόψη μόνο την κίνηση του και το  $E_{const}$  του,

$\Delta E$ : είναι η επιπλέον ενέργεια που καταναλώνεται σύμφωνα με την επιπρόσθετη κίνηση στον κλειστό eNB.

Με τις εξισώσεις (6) και (7) προκύπτει η επίδραση της απόστασης μεταξύ του eNB και των UEs οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους εξαιτίας του αλγόριθμου

#### 4.3.2.3 Ο προτεινόμενος Switch on/off Αλγόριθμος

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με σκοπό να ικανοποιήσει τους QoS περιορισμούς υπό off-peak περιόδους κυκλοφοριακού φορτίου. Ως εκ τούτου, η ανεπαρκής αξιοποίηση των eNBs σε περιόδους χαμηλής κίνησης οδηγεί σε σημαντική σπατάλη ενέργειας. Στόχος είναι να απενεργοποιήσουμε κάποιους eNBs όταν το κυκλοφοριακό φορτίο είναι χαμηλό, και να αποφασίσουμε τον αριθμό των eNBs που πρέπει να απενεργοποιήσουμε και τις συνθήκες υπό τις οποίες το switch on/off σχέδιο είναι αποτελεσματικό.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι το QoS δεν θα πρέπει να υποβαθμίζεται, η κάλυψη των κυττάρων δεν πρέπει να μειωθεί και οι εργασίες του δικτύου πρέπει να είναι σταθερές. Όταν απενεργοποιήσουμε κάποιους eNBs, η κάλυψη είναι περιορισμένη, και ως εκ τούτου, ορισμένοι χρήστες είναι σε διακοπή λειτουργίας. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα ραδιοκάλυψης στα μέρη που καλύπτονται από τους απενεργοποιημένους eNBs. Προκειμένου να επιτευχθεί αυξημένη κάλυψη, πρέπει να αυξήσουμε την ισχύ μετάδοσης. Η ισχύς μετάδοσης εξαρτάται από την απόσταση του UE, όπως αποδεικνύεται στις εξισώσεις (4) και (5). Ως αποτέλεσμα, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ του UE και του eNB τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς κατά την μετάδοση. Η επίδραση της απόστασης στην ισχύ εκπομπής, η διάδοση και το pathloss παίζει τον ρόλο στην απόφαση σχετικά με το ποιους και πόσους eNBs πρέπει να απενεργοποιηθούν.

Βάσει των παραπάνω, η προτεινόμενη ιδέα είναι να απενεργοποιηθεί ένας eNB όχι ανάλογα με το φορτίο της κυκλοφορίας του, αλλά σύμφωνα με τη μέση απόσταση των χρηστών του. Ως εκ τούτου, κάθε eNB θα πρέπει να υπολογίζει την απόσταση των UEs. Στη συνέχεια, κάθε eNB θα πρέπει να υπολογίζει την απόσταση των UEs από τους γειτονικούς του eNBs, μετά την ανταλλαγή των αναγκαίων πληροφοριών μέσω του X2.



Κάθε eNB υπολογίζει το μέσο όρο των ανωτέρω αποστάσεων. Μεγαλύτερη μέση απόσταση οδηγεί σε μεγαλύτερη μέση ισχύ μετάδοσης. Ο Αλγόριθμος προτείνει να ενεργοποιήσει τον eNB με τη μέγιστη μέση τιμή των αποστάσεων γιατί αυτός ο eNB θα αυξήσει την ισχύ μετάδοσής του σε μια μεγαλύτερη αξία αν είχε ενεργοποιηθεί.

Ο Αλγόριθμος οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά είναι σημαντικό να εγγυάται την ποιότητα των υπηρεσιών QoS. Το QoS αναφέρεται στην πιθανότητα διακοπής των UEs και της απόδοσης. Η διακοπή λαμβάνει χώρα όταν δεν υπάρχει eNB να εξυπηρετήσει την κυκλοφορία ενός απενεργοποιημένου eNB. Το προτεινόμενο σύστημα ασχολείται με την μείωση των πιθανοτήτων διακοπής διατηρώντας την κάλυψη κυττάρου του δικτύου. Η πιθανότητα διακοπής πρέπει να είναι σχεδόν μηδενική. Παρά το γεγονός ότι σβήνουν κάποιοι eNBs, οι υπόλοιποι eNBs είναι υπεύθυνοι για την κάλυψη των τμημάτων των δικτύων, οι οποίοι καλύπτονται από τους απενεργοποιημένους eNBs. Επιπλέον, πριν από την απενεργοποίηση ενός eNB, πρέπει πρώτα να εξασφαλιστεί ότι οι υπόλοιποι eNBs μπορούν να εξυπηρετήσουν την κίνηση του δικτύου. Δεν διακόπτουμε οποιονδήποτε περαιτέρω eNBs αν εκείνοι που παραμένουν δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν την υπάρχουσα κυκλοφορία στην συγκεκριμένη φάση στο δίκτυο.

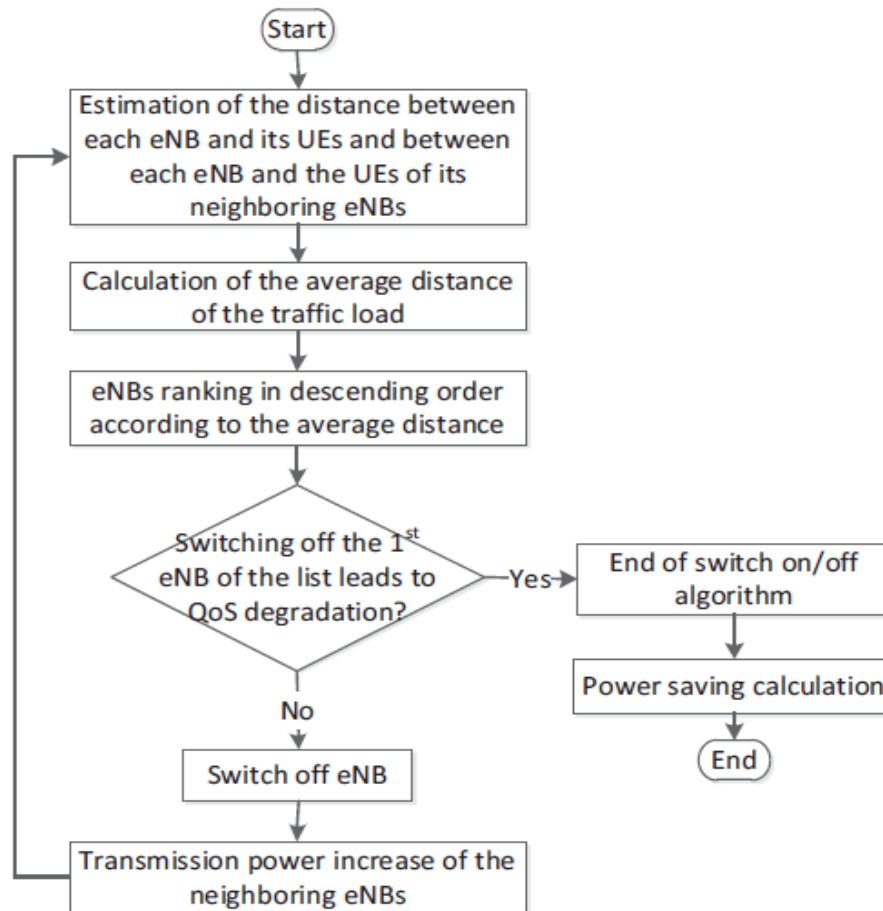
Ο eNBs switch on/off αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 34:

Βήμα 1: Κάθε eNB υπολογίζει την απόσταση των UEs του και αποκτά την πληροφορία για την απόσταση των UEs που σχετίζονται με τους γείτονές τους μέσω της διεπαφής X2

Βήμα 2: Οι eNBs υπολογίζουν τη μέση απόσταση του φορτίου κυκλοφορίας βασιζόμενοι στα αποτελέσματα του πρώτου βήματος. Οι eNBs κατατάσσονται με βάση το εκτιμώμενο μέσο όρο και εξετάζονται από την κορυφή του ενός με τη μέγιστη μέση τιμή απόσταση.

Βήμα 3: Ο πρώτος eNB απενεργοποιείται, εάν δεν υπάρχει υποβάθμιση του QoS, και τα γειτονικά eNBs αντιμετωπίσουν τις πιθανές αυξήσεις στη μετάδοση ισχύος.

Βήμα 4: Ο αλγόριθμος συνεχίζει με τον επόμενο eNB στη λίστα, μέχρι να απενεργοποιηθεί ο μέγιστος αριθμός eNBs. Όσο οι eNBs απενεργοποιηθούν, θα πρέπει να υπάρχει εγγύηση ότι δεν υπάρχει καμία υποβάθμιση QoS.



Σχήμα 40. Switch on/off scheme, (πηγή: "Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).

#### 4.3.2.4 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

##### 4.3.2.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Παρακάτω γίνεται μία μελέτη όσον αφορά την απόκριση του συστήματος σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση του δικτύου.

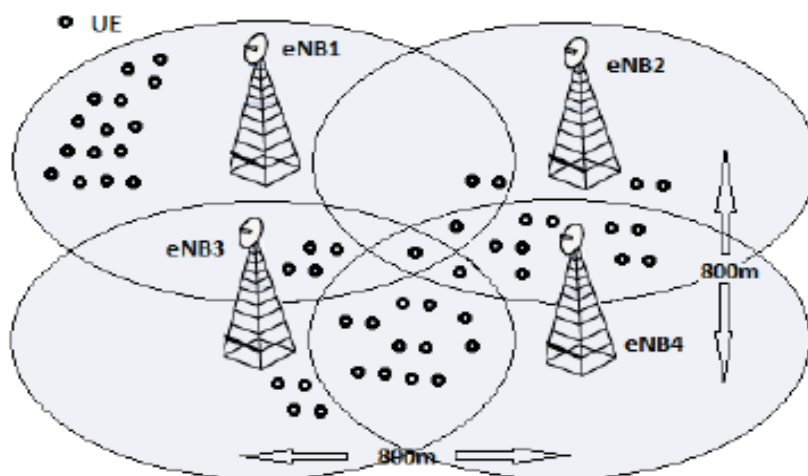
Θεωρούμε ένα τυπικό σενάριο, παρόμοιο με εκείνο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 41. Το δίκτυο αποτελείται από  $K = 25$  κύτταρα, όπου η απόσταση μεταξύ των eNBs είναι 800 μέτρα. Οι eNBs έχουν αναπτυχθεί σε ένα ορθογώνιο πλέγμα, ενώ κάθε eNB έχει να εξυπηρετήσει τον ίδιο αριθμό χρηστών (10 UEs κατά μέσο όρο). Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας, θεωρούμε την ισχύς που καταναλώνεται στους eNBs για μετάδοση κάτω ζεύξης. Τα μοντέλα και οι παραδοχές προσομοίωσης επιλέγονται σύμφωνα με τα κριτήρια αξιολόγησης 3GPP όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 5. Τα κανάλια ελέγχου θεωρούνται ότι είναι χωρίς λάθη. Σε κάθε επανάληψη της προσομοίωσης οι UEs τοποθετούνται στην περιοχή του συστήματος που βασίζεται σε μια ομοιόμορφη κατανομή και οι eNBs δημιουργούν



κυκλοφορία, σύμφωνα με μια κατανομή Poisson. Το μέγεθος του πακέτου που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση είναι 1500 bytes. Το ράδιο κανάλι μεταξύ κάθε eNB και ζεύγους UE υπολογίζεται σύμφωνα με τον πολλαπλασιασμό και τα εξασθενημένα μοντέλα.

Η μελέτη περίπτωσης βασίζεται σε ένα σενάριο εξωτερικού κυψελοειδές δικτύου ευρείας περιοχής, όπου οι περιοχές κάλυψης των eNBs επικαλύπτονται. Υποθέτουμε ότι έχουμε τέσσερα πανομοιότυπα eNBs με την ίδια κάλυψη των κυττάρων και το ίδιο φορτίο κυκλοφορίας.

Οι eNBs τοποθετούνται στο κέντρο κάθε κυττάρου.



Σχήμα 41. Παράδειγμα δικτύου για τον προτεινόμενο αλγόριθμο, (πηγή: "Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).

Όταν εφαρμόζουμε το τυχαίο switch on/off σενάριο, υποθέτουμε ότι ο eNB<sub>1</sub> είναι απενεργοποιημένος βασιζόμενος σε μια τυχαία απόφαση. Ωστόσο, σύμφωνα με το προτεινόμενο αλγόριθμο, επιλέγουμε να απενεργοποιήσουμε τον eNB<sub>3</sub>, δεδομένου ότι οι UEs του eNB<sub>1</sub> συγκεντρώνονται κοντά στην άκρη των κυττάρων μακριά από τους eNB<sub>2</sub>, eNB<sub>3</sub>, και eNB<sub>4</sub>. Προφανώς, η τυχαία απόφαση οδηγεί τους eNBs σε σημαντική αύξηση της ισχύος εκπομπής, ώστε να καλύψουν ολόκληρη την περιοχή και για να εξυπηρετηθεί το φορτίο κίνησης του απενεργοποιημένου eNB. Από την άλλη πλευρά, ο προτεινόμενος distance-aware scheme επιλέγει έξυπνα ποιος eNB θα απενεργοποιηθεί, πετυχαίνοντας έτσι την ελάχιστη αύξηση της ισχύος μετάδοσης.



Μοντέλο Κίνησης	
Κατανομή Χρήστη	Uniform
λ	Μεταβλητή: 0.03-0.15 κλήσεις/sec
μ	1/50 κλήσεις/sec
Μοντέλο Ραδιο Δικτύου	
Απόσβεση απόστασης	$L_{x-ile,i} = l = 37.6 \cdot \log_{10} R_i$
Inter site distance	800m
Penetration loss (L)	20dB
Μοντέλο Συστήματος	
Μέγιστη UE output power	250mW (24dBm)
Προγραμματισμός	Τυχαίος προγραμματισμός με 10 χρήστες
BS συνολική TX ισχύς	46dBm
BS idle power	0.19 dBm
Έλεγχος ισχύος	
Path-loss	$\alpha=0.8$
Compensation	

Πίνακας 5. Παράμετροι Προσομοίωσης βασιζόμενοι στο LTE-Advanced, (πηγή: "Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).

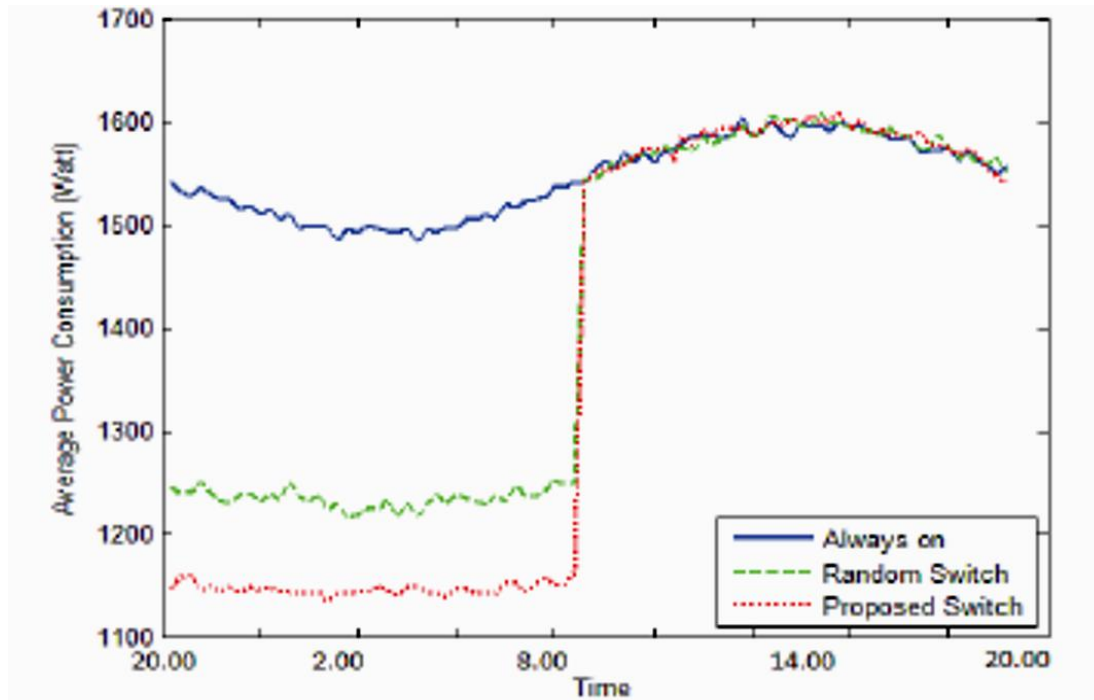
#### 4.3.2.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στα σχήματα που ακολουθούν, φαίνεται η πραγματική απόδοση των διαφορετικών προσεγγίσεων εξοικονόμησης ενέργειας σύμφωνα με το προφίλ μιας ρεαλιστική ημερήσιας κυκλοφορίας.

Το Σχήμα 42 δείχνει τη μέση κατανάλωση ισχύος του προτεινόμενου συστήματος μας σε σχέση με τον τυχαίο αλγόριθμο και στην περίπτωση που όλοι οι eNBs παραμένουν ενεργοί. Το Σχήμα 43 αντιπροσωπεύει το ποσοστό της εξοικονόμησης στην κατανάλωση ισχύος κατά τη διάρκεια της νύχτας. Υποθέτουμε ότι κάθε eNB μπορεί να απενεργοποιηθεί για περίπου 12 ώρες, εξοικονομώντας 29% της κατανάλωσης ενέργειας σε μια μέρα. Σε σύγκριση με τον αλγόριθμο switch on/off, το προτεινόμενο σύστημα επιτυγχάνει έως και 10% καλύτερη απόδοση. Το Σχήμα 44 απεικονίζει την ενεργειακή απόδοση επιτυγχάνοντας το με προτεινόμενο σχέδιο. Για τη μετρική της ενεργειακής απόδοσης υπολογίζεται ο αριθμός των bits που παραδίδονται ανά μονάδα ενέργειας. Η μετρική της ενεργειακής απόδοσης είναι

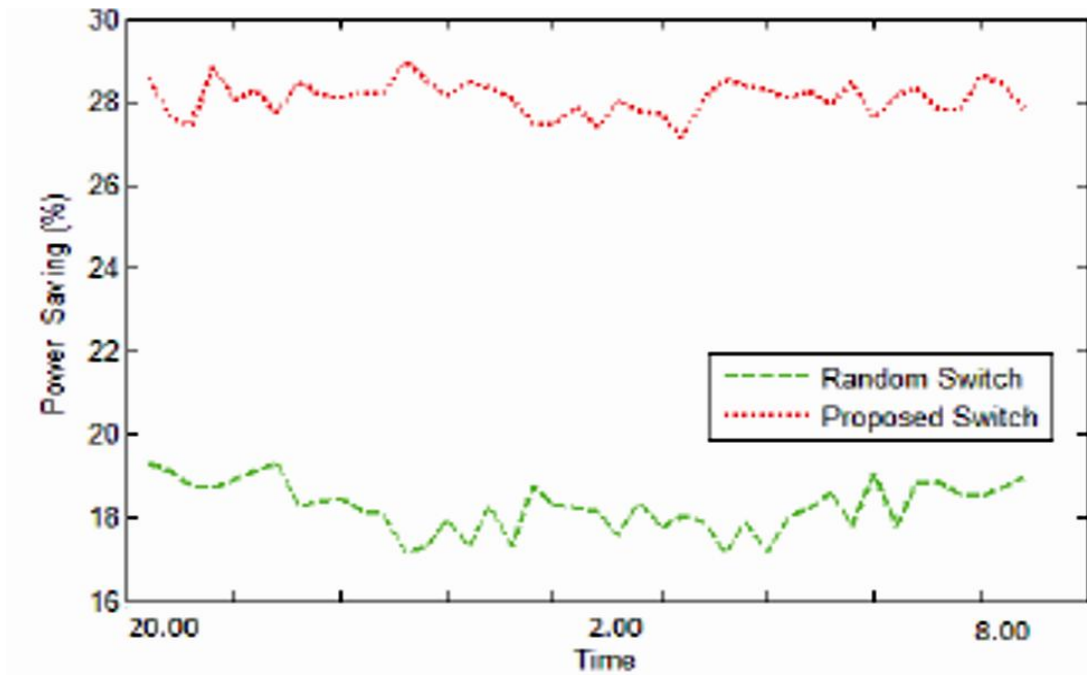


κατάλληλη για το δίκτυό, γιατί τόσο ο αριθμητής (ο αριθμός των παραδοθέντων bits) όσο και ο παρονομαστής (η κατανάλωση ενέργειας δικτύου) είναι συνήθως μεταβλητά. Έτσι, η μετρική απόδοσης είναι πιο βολική για δίκτυα με χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο.

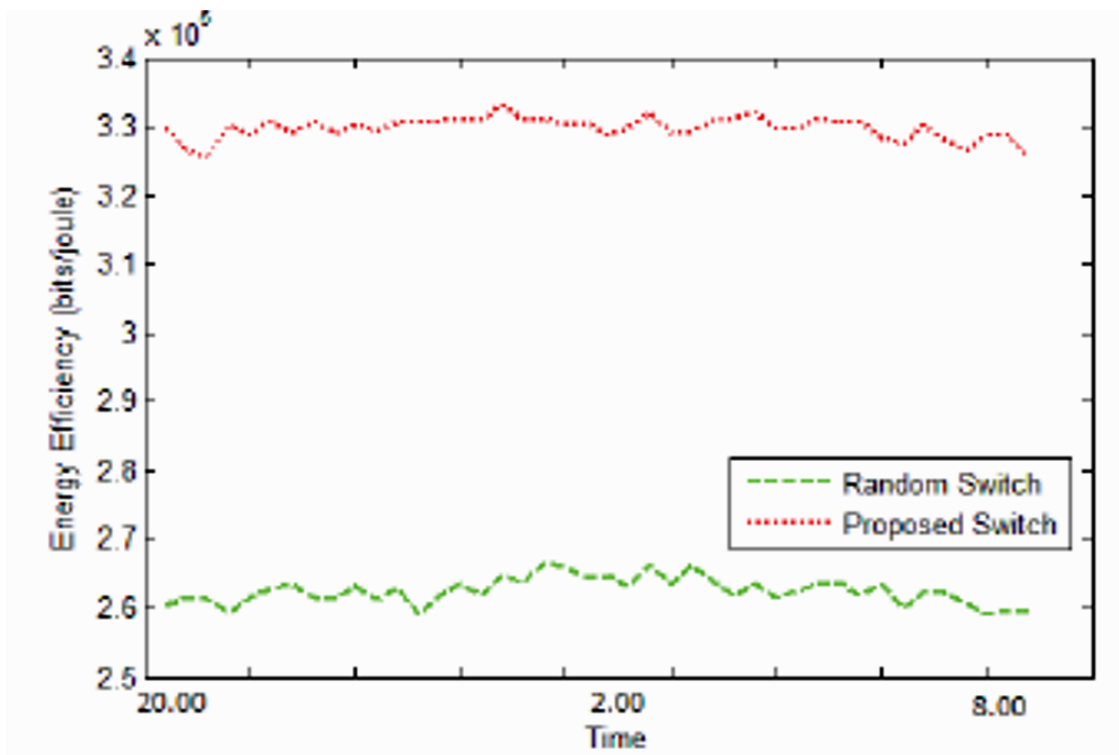


Σχήμα 42. Μέση εφικτή κατανάλωση ενέργειας όταν οι μισοί eNBs είναι σβηστέι σε σχέση με τον χρόνο, (πηγή: **"Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced**, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).





Σχήμα 43. Μέγιστη % εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με το χρόνο, (πηγή: **"Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced**, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).



Σχήμα 38. Ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το χρόνο, (πηγή: **"Green" Distance-Aware Base Station Sleeping Algorithm in LTE-Advanced**, Alexandra Bousia, Angelos Antonopoulos, Luis Alonso, and Christos Verikoukis).



#### 4.3.2.5 Αποτελέσματα

Στην παρούσα προσέγγιση έγινε εισαγωγή ενός distance-aware αλγόριθμου ο οποίος επιτυγχάνει σημαντική μείωση κατανάλωση ενέργειας. Βάσει της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι σημαντικό να επιλεγούν ποιοι eNBs θα απενεργοποιηθούν κατά την περίοδο χαμηλής κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 29% της ενέργειας που καταναλώνεται για τη λειτουργία του δικτύου. Η μείωση του αριθμού των ενεργών eNBs πραγματοποιείται σε περιόδους χαμηλής κίνησης.



### 4.3.3 Εξοικονόμηση ενέργειας σε μικρά κύτταρα

Τα Μικρά κύτταρα σταθμών βάσης (BSs) που σχηματίζουν ένα στρώμα επικάλυψης στο υπάρχον δίκτυο macrocell προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες όσον αφορά την ικανοποίηση των απαιτήσεων της κυκλοφορίας υψηλής ταχύτητας δεδομένων και διευκόλυνση της διεξόδου των υπηρεσιών. Ωστόσο, μικρές αναπτύξεις κυττάρων μπορεί να προκαλέσουν αρνητικές συνέπειες για την ενεργειακή απόδοση, εάν δεν είναι εφοδιασμένα με προηγμένους μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό το αντιμετωπίζουν αλγόριθμοι που έχουν τη δυνατότητα να επικαλεστούν την λειτουργία sleep χαμηλής ισχύος όταν δεν απαιτείται η εξυπηρέτηση οποιαδήποτε κίνησης χρήστη. Με βάση τον συνδυασμό φωνής και μοντέλου κίνησης των δεδομένων, οι αλγόριθμοι προσφέρουν περίπου 13 με 56% εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο.

#### 4.3.3.1 Εισαγωγή

Ενώ οι macrocell αναπτύξεις δικτύου στο παρελθόν υπήρξαν αποτελεσματικές για παροχή απαιτούμενης κάλυψης και χωρητικότητας για φωνή και υπηρεσίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων, δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί στην παροχή υψηλότερων ρυθμών δεδομένων λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης τους. Το σενάριο των μικρών κύτταρων θεωρείται ως μια από τις πιθανές λύσεις για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων των κλιμακωτών ρυθμών δεδομένων σε κυψελοειδή δίκτυα. Μικρότερης κλίμακας κάλυψης των δεκάδων ή λίγων εκατοντάδων μέτρων, μικρά κυττάρια προσφέρονται για τη χρήση υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων που είναι κατάλληλες για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Η μειωμένη περιοχή κάλυψης των μικρών κυττάρων σημαίνει επίσης ότι ο αριθμός των χρηστών που μοιράζονται το ίδιο κύτταρο είναι μικρότερος σε σύγκριση με τα macrocells, δίνοντας στους χρήστες μια πιο «προσωπική» χρήση του εύρους ζώνης. Ένα παράδειγμα της ανάπτυξης μικρών κυττάρων είναι η έναρξη της αγοράς των femtocell σταθμών βάσης (BSS). Τα Femtocells είναι ανεπτυγμένοι χρήστες, χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος, που χρησιμοποιούν ευζωνική σύνδεση IP ως backhaul.

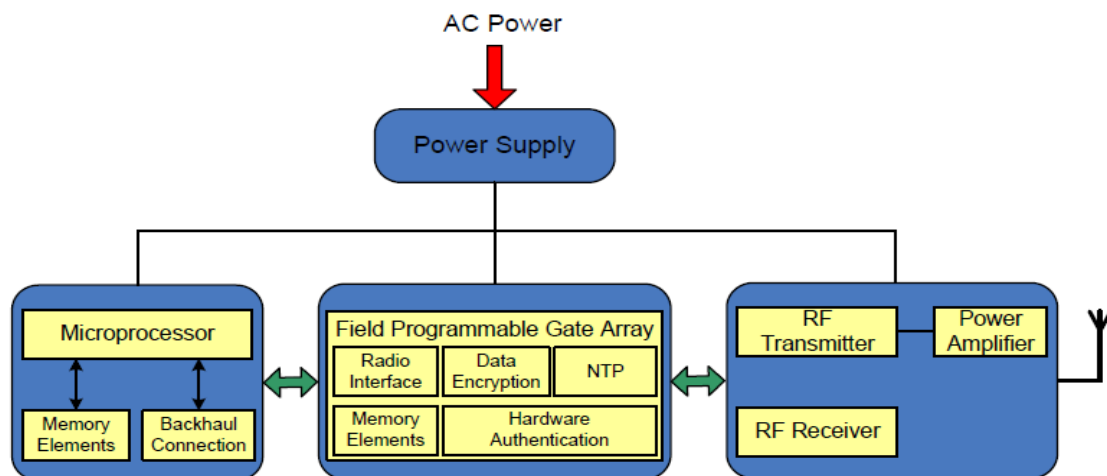
Από πλευράς οικολογικής βιωσιμότητας, ένας προβληματισμός που συνδέεται με τη χρήση μικρών κυττάρων είναι η προκύπτουσα σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο. Ενώ κάθε μικρό κελί καταναλώνει ένα σχετικά χαμηλό ποσό ενέργειας, μια μεγάλη αναπτυσσόμενη κλίμακας με τη συμμετοχή δεκάδων ή εκατοντάδων χιλιάδων μικρών κυττάρων σημαίνει ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου μπορεί να εκτοξευτεί στα ύψη. Μια προσέγγιση είναι η εφαρμογή μικρών σταθμών βάσης κυττάρων με την ικανότητα να εισέρχονται σε μια κατάσταση sleep χαμηλής ισχύος όταν δεν τους ζητείται να εξυπηρετήσουν οποιαδήποτε κίνηση χρήστη. Η λειτουργία του sleep ενεργοποίησης/απενεργοποίησης σε μικρά κύτταρα επιτρέπει διαθεσιμότητα της χωρητικότητας του συστήματος στο δίκτυο. Όταν συνδυάζεται με μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας κίνησης σε macrocell περιοχές, η εφαρμογή της



κατάστασης sleep σε μικρά κελιά μπορεί να μειώσει ουσιαστικά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με ένα μόνο δίκτυο macrocell.

#### 4.3.3.2 Hardware σχεδιασμός για μικρά κύτταρα

Η κατανόηση του hardware μικρών κυττάρων γίνεται εφικτή σχεδιάζοντας αλγόριθμους λειτουργίας sleep αξιοποιώντας τη διακοπή λειτουργίας ορισμένων στοιχείων hardware σε χαμηλές συνθήκες κυκλοφορίας. Το σχήμα 45 απεικονίζει μία υψηλού επιπέδου σχηματική αναπαράσταση hardware κυττάρων. Αποτελείται από ένα μικροεπεξεργαστή που είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή και τη διαχείριση του τυποποιημένου ασύρματου πρωτοκόλλου και τη σχετική επεξεργασία baseband, μαζί με τη διαχείριση της σύνδεσης backhaul με το κεντρικό δίκτυο. Αυτή η ικανότητα γενικά υλοποιείται ως μία multi-core εφαρμογή ειδικού ολοκληρωμένου κυκλώματος (ASIC), το οποίο έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Εκτός από την on-chip μνήμη, ένα ή περισσότερα στοιχεία τυχαίας πρόσβασης μνήμης συνδέονται με τον μικροεπεξεργαστή, τα οποία χρησιμοποιούνται για διάφορες λειτουργίες χειρισμού δεδομένων και εκκίνηση του συστήματος. Ο σχεδιασμός περιέχει επίσης μια field-programmable gate array (FPGA) και κάποια άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την εφαρμογή ορισμένων χαρακτηριστικών, όπως η κρυπτογράφηση δεδομένων, ο έλεγχος ταυτότητας του υλικού, του (NTP), κ.λπ. Το ραδιο στοιχείο στο FPGA ενεργεί ως διεπαφή μεταξύ του μικροεπεξεργαστή και των ραδιοσυχνοτήτων (RF) πομποδέκτη.



Σχήμα 45. Μοντέλο hardware για μικρά κύτταρα BS, (πηγή: **Power Savings in Small Cell. Deployments via Sleep Mode Techniques**, Imran Ashraf, Federico Boccardi, Lester Ho, Bell Laboratories, Alcatel-Lucent

Υπάρχουν ξεχωριστές συνιστώσες RF για τη μετάδοση δεδομένων και την υποδοχή στο μοντέλο του hardware, καθένα καταναλώνει ένα ορισμένο ποσό ισχύος.



Ένας ενισχυτής ισχύος ραδιοσυχνοτήτων (PA) είναι επίσης παρόν για να περάσει ένα σήμα υψηλής ισχύος στην κεραία εκπομπής. Λόγω των εξαιρετικά υψηλών κοστολογικών επιπτώσεων στον μικρό σχεδιασμό hardware των κυττάρων, απαιτείται ένας οικονομικά αποδοτικός και ισχυρός PA με υψηλή γραμμικότητα και κέρδος. Συνήθως, η ισχύς που προστίθεται αποδοτικά (Αναλογία RF κέρδους ισχύος στο DC ισχύς IN) τέτοιων PAs μπορεί να κυμαίνεται από 5-40%, ανάλογα με την ισχύ εξόδου RF από τον PA. Ο Πίνακας 6 δείχνει την κατανάλωση ισχύος των μικρών hardware εξαρτημάτων κυττάρων.

Θεωρώντας την στατική κατανάλωση ισχύος σε όλα τα φορτία της κυκλοφορίας, τα hardware κυκλώματα καταναλώνουν συνολικά  $P_{ACT} = 10.2W$  όταν είναι πλήρως ενεργά (RE κατάσταση).

Στοιχεία Hardware	Εξοικονόμηση Ενέργειας (Watt)
Μικροεπεξεργαστής	1.7
Associated Μνήμη	0.5
Backhaul Circuitry	0.5
FPGA	2.0
Associated Μνήμη	0.5
Άλλες Hardware Λειτουργίες	1.5
RF Πομπός	1.0
RF Δέκτης	0.5
RF Ενισχυτής	2.0

Πίνακας 6. Προφίλ Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Hardware Μικρού Κελιού (πηγή: **Power Savings in Small Cell. Deployments via Sleep Mode Techniques**, Imran Ashraf, Federico Boccardi, Lester Ho, Bell Laboratories, Alcatel-Lucent).

#### 4.3.3.3 Διαδικασίες λειτουργίας sleep για μικρά κύτταρα

Ο λόγος που υποστηρίζεται η ενεργοποιημένη λειτουργία sleep σε μικρό κύτταρο BSs είναι η εισαγωγή μίας κατάστασης χαμηλής ισχύος στο hardware. Υποθέτουμε ότι το μικρό κύτταρο βρίσκεται σε μία από τις ακόλουθες καταστάσεις σε κάθε δεδομένη στιγμή:

- **Ready State (RE).** Σε αυτή την κατάσταση, όλα τα στοιχεία του hardware στο μικρό κύτταρο BS είναι πλήρως ενεργοποιημένα. Στα πιλοτικά κανάλια εκτελούνται RF μεταδόσεις για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη περιοχή ραδιοκάλυψης και όλοι οι επιτρεπόμενοι χρήστες στην περιοχή κάλυψης εξυπηρετούνται από τον προγραμματισμό ραδιο πόρων στα κανάλια δεδομένων. Όλη η κυκλοφορία εξυπηρετείται υπό τους περιορισμούς της μέγιστης χωρητικότητας του BS.



- **Sleep State (SL).** Σε αυτή την κατάσταση, ορισμένα από τα hardware στοιχεία στα μικρά κύτταρα BS είναι είτε εντελώς απενεργοποιημένα ή λειτουργούν σε καταστάσεις χαμηλής κατανάλωσης. Αντίστοιχα ο BS πέφτει σε λειτουργία sleep. Τα ακριβή στοιχεία που απενεργοποιούνται είναι συνάρτηση της ειδικής αρχιτεκτονικής υλικού και του συγκεκριμένου αλγόριθμου εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτό, με τη σειρά του, έχει άμεση επίδραση στο χρόνο μετάβασης μεταξύ των SL και RE καταστάσεων.

#### 4.3.3.4 Ελεγχόμενη Λειτουργία Sleep

Για να καταστεί δυνατή η μετάβαση, των μικρών BS κυττάρων, μεταξύ των SL και RE καταστάσεων, κατάσταση sleep ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί. Οι μηχανισμοί αυτοί διαφέρουν θεμελιωδώς ως προς την τοποθέτηση του ελέγχου κατάσταση ύπνου στο δίκτυο, το οποίο μπορεί να πραγματοποιείται είτε στο μικρό κύτταρο, είτε στο κεντρικό δίκτυο, ή στον εξοπλισμό χρήστη (UE).

##### 4.3.3.4.1 Μικρά Κύτταρα Ελεγχόμενα από Λειτουργία Sleep

Αξιοποιώντας την παρουσία επαρκούς κάλυψης υποστρώματος macrocell, το hardware μικρού κυττάρου μπορεί να αυξηθεί με δυνατότητα ανίχνευσης χαμηλής ισχύος που επιτρέπει την ανίχνευση μιας ενεργής κλήσης από ένα UE προς το macrocell υπόστρωμα. Με αυτόν τον τρόπο, το μικρό κελί μπορεί να αντέξει να απενεργοποιήσει τις πιλοτικές μεταδόσεις και την σχετική ραδιο επεξεργασία (SL κατάσταση) όταν δεν πραγματοποιούνται κλήσεις από τους UE, στην περιοχή κάλυψης του.

Η βασική ιδέα της τεχνικής αυτής είναι ότι όταν ένας UE βρίσκεται μέσα στο εύρος ανίχνευσης του μικρού sniffer κυττάρου, συνδέεται στο macrocell, ο sniffer ανιχνεύει μια αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος στην ζώνη συχνοτήτων άνω ζεύξης. Αυτή η αύξηση στο επίπεδο θορύβου είναι εύκολα ανιχνεύσιμη, δεδομένου ότι ο UE μεταδίδει σε υψηλή ισχύ στον macrocell ενώ βρίσκεται πολύ κοντά στο μικρό κύτταρο. Εάν η ισχύς του σήματος που λαμβάνεται υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, ο ανιχνεύσιμος UE θεωρείται αρκετά κοντά στο να καλυφτεί ενδεχομένως από το μικρό κύτταρο. Σε αυτό το σημείο, το μικρό κελί μεταβαίνει στην κατάσταση RE και ενεργοποιεί την επεξεργασία του και το πιλοτικό σήμα μετάδοσης. Ο ενεργός UE στο εύρος του μικρού κυττάρου μπορεί τότε να αναφέρει τις μετρήσεις των μικρών πιλοτικών κυττάρων στο macrocell. Εάν ο UE επιτρέπεται να έχει πρόσβαση στο μικρό κύτταρο, η παράδοση του UE από το macrocell στο μικρό κύτταρο θα ξεκινήσει, διαφορετικά το μικρό κύτταρο μπορεί να επανέλθει στην κατάσταση αναμονής. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας μεταπομπής, το μικρό κύτταρο εξυπηρετεί τον UE μέχρι η σύνδεση του να τερματιστεί, στη συνέχεια μπορεί να επιστρέψει στην κατάσταση sleep. Σημειώνουμε ότι αυτή η διαδικασία απαιτεί macrocellular κάλυψη, δεδομένου ότι βασίζεται στον εντοπισμό των μεταδόσεων από ένα UE σε ένα macrocell. Προκειμένου να μετρηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας



που βασίζεται στην τεχνική που περιγράφεται παραπάνω ο πομπό RF, ο PA και μερικές μη βασικές λειτουργίες του hardware (περίπου 1 W) μπορούν να απενεργοποιηθούν σε συνθήκες idle. Αυτό οδηγεί σε μια εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 4 W. Ο υπάρχον δέκτης RF χρησιμοποιείται για τη λειτουργικότητα sniffer που καταναλώνει 0,5 W. Αυτό σημαίνει ότι ο FPGA διατηρείται ON για να λειτουργεί ως διασύνδεση μεταξύ του ανιχνευτή και του μικροεπεξεργαστή, ο οποίος διατηρεί το συγχρονισμό και backhaul συνδεσιμότητα με το δίκτυο κορμού. Ρίχνοντας μια ματιά στις τιμές του Πίνακα I, μια εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 4,7 W είναι εφικτή.

#### 4.3.3.4.2 Δίκτυο Κορμού Ελεγχόμενο από Λειτουργία Sleep

Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτεί sniffer χαμηλής ισχύος στο μικρό κελί για να εντοπίσει ενεργούς UEs. Εναλλακτικά, η μετάβαση των μικρών κυττάρων από SL στη RE κατάσταση ελέγχεται από το δίκτυο κορμού μέσω σύνδεσης στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα μήνυμα ελέγχου αφύπνισης. Η υπόθεση του υποστρώματος macrocell που παρέχει κάλυψη σε UE ισχύει και σε αυτή την περίπτωση. Επιπλέον, το μικρό BS κύτταρο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να διαμένει στην SL κατάσταση εξορισμού και να κινείται στην RE κατάσταση.

Μια σύνδεση μεταξύ του macrocell και του UE έχει ρυθμιστεί μετά από ένα μήνυμα σελιδοποίησης το οποίο διαβιβάζεται στην κατερχόμενη ζεύξη του UE ή σε μια αίτηση σύνδεσης ανερχόμενης ζεύξης από τον UE που γίνεται στο macrocell. Μετά από μια επιτυχημένη εγκατάσταση σύνδεσης, το κατάλληλο στοιχείο του κεντρικού δικτύου προσδιορίζει το serving macrocell του UE και ελέγχει αν υπάρχει κάποιο UE-συνδεδεμένο μικρό κελί στην ίδια περιοχή macrocell. Για παράδειγμα, η επαλήθευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του MME (Mobility Management Entity), ένα στοιχείο του δικτύου που κρατά UE πληροφορίες περιβάλλοντος. Ο συνδεδεμένος BS μικρού κυττάρου, στο οποίο ο tagged UE επιτρέπεται να συνδεθεί, αποστέλλεται ένα μήνυμα αφύπνισης μέσω backhaul για τη μετάβαση στην κατάσταση RE και εξυπηρετεί τον UE. Όσον αφορά την small cell driven λύση που περιγράφηκε προηγουμένως, η ελεγχόμενη λύση του δικτύου κορμού έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Πρώτον, ο μηχανισμός ελεγχόμενου δικτύου κορμού επιτρέπει τη διάκριση των εγγεγραμμένων και μη εγγεγραμμένων χρηστών.
- Δεύτερον, η προσέγγιση του driven δικτύου κορμού επιτρέπει τη δυνατότητα να λάβει μια κεντρική απόφαση, στηριζόμενη όχι μόνο σε ένα συγκεκριμένο UE, αλλά και λαμβάνοντας υπόψη το κυκλοφοριακό φορτίο macrocell, τη συμπεριφορά της κυκλοφορίας, το είδος της υπηρεσίας, κ.λπ.
- και τέλος, η προσέγγιση του ελεγχόμενου δικτύου κορμού επιτρέπει την εκμετάλλευση εκτιμώμενης τοποθεσίας των UE's (ή τοποθέτησης), προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η αποτελεσματική απόφαση.



Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, παρόλο που η μέθοδος driven δικτύου κορμού παρέχει καλύτερο έλεγχο της ενεργοποίησης, αναλαμβάνει επιπλέον έλεγχο σηματοδότησης μέσω του backhaul για να ξυπνήσει μικρά κελιά. Για παράδειγμα, ένα μονό πακέτο ελέγχου που ξύπνα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των μικρών BS κυττάρων. Η διαδικασία network driven προβλέπει ένα ζευγάρι επιλογών όσον αφορά την απενεργοποίηση συγκεκριμένων στοιχείων του hardware. Μια επιλογή βασίζεται στην εφαρμογή της επεξεργασίας δεδομένων backhaul στον μικροεπεξεργαστή, η οποία θα μπορούσε να σβήσει όλα τα μέρη του hardware, εκτός από το κύκλωμα backhaul (π.χ. διακόπτης Ethernet) και τον μικροεπεξεργαστή. Αυτό οδηγεί σε μια κατανάλωση ενέργειας περίπου 3 W σε κατάσταση sleep - εξοικονόμηση 75%. Η άλλη επιλογή θα μπορούσε να βασίζεται στην εφαρμογή του ελέγχου επαναφοράς του διακόπτη backhaul, επιτρέποντας έτσι ο μικροεπεξεργαστής να απενεργοποιηθεί επίσης. Αυτό μπορεί να μειώσει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας σε λειτουργία sleep για περίπου 1 W –μια εξοικονόμηση του 92%. Σημειώνουμε ότι, αν είναι αρχιτεκτονικά δυνατόν, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί επίσης να λειτουργήσει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και στις δύο περιπτώσεις βασιζόμενο σε μειωμένο φορτίο επεξεργασίας.

#### 4.3.4.4.3 UE Ελεγχόμενο από Λειτουργία Sleep

Μια τρίτη προσέγγιση είναι να τοποθετηθεί ο έλεγχος της κατάστασης sleep στην UE πλευρά, η οποία μπορεί να μεταδώσει σήματα αφύπνισης για να ξυπνήσει το μικρό κελί BS όταν βρίσκεται εντός της εμβέλειάς του. Το μικρό κελί, όταν βρίσκεται σε κατάσταση SL, διατηρεί τη δυνατότητα να λαμβάνει σήματα μετάδοσης αφύπνισης από τον UE, και κάθε φορά που λαμβάνει τέτοια σήματα, να μεταβαίνει στην κατάσταση RE. Η λύση αυτή μπορεί κυρίως να χρησιμοποιηθεί όταν το UE βρίσκεται σε κατάσταση idle, ενώ οι λύσεις των small cell driven και των ελεγχόμενων δικτύων κορμού απαιτούν την ύπαρξη UE για να δημιουργήσει μια σύνδεση με το δίκτυο. Η εκπομπή UE μπορεί να περιέχει τέτοιες πληροφορίες αναγνώρισης όπως η λειτουργία κλειστού μικρού κελιού που ξυπνά μόνο σε εγγεγραμμένο UE.

Αυτή η λύση μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο UE μπορεί να μεταδίδει περιοδικά σήματα αφύπνισης συνεχώς, έτσι ώστε τυχόν μικρά κελιά στην SL κατάσταση να μεταβούν στη RE κατάσταση όταν το UE το πλησιάζει. Αυτό σημαίνει ότι η κάλυψη που παρέχεται από μικρά κύτταρα «ακολουθεί» έναν UE. Στα αρνητικά είναι ότι αυτή η εφαρμογή μειώνει την ποσότητα της εξοικονομούμενης ενέργειας, όπου τα μικρά κύτταρα θα περνούν περισσότερο χρόνο στην RE κατάσταση ενεργή ακρόαση για σήματα αφύπνισης UE. Ως άμεση συνέπεια, αυξάνεται η κατανάλωση της μπαταρίας UE, λόγω περιοδικών μεταδόσεων.

Μια εναλλακτική στρατηγική εφαρμογή για το UE για να μεταδίδονται σήματα αφύπνισης, όταν απαιτείται on-demand, όπως στην απουσία επαρκούς macrocell κάλυψης, υψηλότερες απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων, κ.λπ. Σε μια τέτοια





κατάσταση, ο UE μπορεί να μεταδίδει τις εκπομπές επιχειρώντας να ξυπνήσει κάποια μικρά κελιά εντός εμβέλειας. Το UE μπορεί επίσης να εκτελέσει αυτές τις εκπομπές πριν από τη δημιουργία μιας σύνδεσης με το δίκτυο. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο UE να ξυπνήσει κάθε μικρό κελί και στη συνέχεια να συνδεθεί απευθείας μέσα από το μικρό κελί. Η προσέγγιση on-demand μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας αφού το μικρό κύτταρο μπορεί να είναι σε κατάσταση SL πιο συχνά, και να μεταβεί στην κατάσταση RE μόνο όταν απαιτείται.

Η UE ελεγχόμενη λύση έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σχέση με την λύση του small cell driven και τις ελεγχόμενες λύσεις δικτύου πυρήνα:

- Πρώτον, η UE ελεγχόμενη προσέγγιση δεν στηρίζεται στην ανάγκη για underlay κάλυψη macrocell για ενεργοποίηση / απενεργοποίηση μικρών κελιών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς πολλά μικρά κύτταρα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο για την επίλυση της κάλυψης macrocell black spots. Οι ελεγχόμενες λύσεις των μικρών κελιών και πυρήνα του δικτύου απαιτούν επαρκή κάλυψη macrocell για το UE για να ενεργοποιηθεί η λειτουργία sleep ενεργοποίησης / απενεργοποίησης.
- Δεύτερον, η ποσότητα του πυρήνα δικτύου που σχετίζονται με σηματοδοσία μειώνεται. Κάθε φορά που το UE κάνει μια κλήση, δεν χρειάζεται να ξεκινήσει μια σύνδεση με το υπόστρωμα macrocell και στη συνέχεια να παραδοθεί στο μικρό κελί μετά την μετάβαση από την SL στη RE κατάσταση. Με βάση τις προσεγγίσεις του UE driven, το μικρό κελί θα ήταν ήδη σε κατάσταση RE κατά τη στιγμή όπου η εγκατάσταση σύνδεσης επιτρέπει στο UE να κινήσει τη σύνδεση άμεσα με αυτό.
- Τρίτον, η προσέγγιση επιτρέπει την εφαρμογή της «coverage follows UE» αρχής χωρίς την απόκτηση συγκεκριμένης UE τοποθέτησης και ως εκ τούτου την εξοικονόμηση σχετικά με τη διαβίβαση τέτοιων πληροφοριών.

Προκειμένου να παρέχεται γρήγορη ενεργοποίηση μεταξύ της SL και RE καταστάσεων στην UE ελεγχόμενη μέθοδο, στον πομπό RF, PA, και ορισμένα στοιχεία μπορούν να απενεργοποιηθούν στην SL κατάσταση για να αποκτήσει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 4,7 W, παρόμοια με τη μέθοδο small cell driven.

#### 4.3.2.5 Αριθμητικά αποτελέσματα

Προκειμένου να παραχθεί μία πρώτη εκτίμηση για την απόδοση της κατανάλωσης ενέργειας των μικρών σε ανάπτυξη κυττάρων με τη λειτουργία sleep, εξετάστηκε κυψελοειδές δίκτυο LTE βασίζεται σε μια αστική περιοχή που αποτελείται από macrocells και ανοικτής πρόσβασης picocells.

Η ανάπτυξη picocell μπορεί να είναι ένα μείγμα από ανεπτυγμένους χρήστες και ανεπτυγμένους χειριστές δικτύου. Ο αριθμός των θέσεων macrocell και picocells εκφράζεται από  $n_{macro}$  και  $n_{micro}$  αντίστοιχα. Συνολικά 40.000 συνδρομητές κινητής



τηλεφωνίας υπάρχουν στην περιοχή, και κάθε συνδρομητής είναι πιθανόν να έχει τις ίδιες μέσες απαιτήσεις της κυκλοφορίας των 0.5 Mbps.

Κάθε picocell έχει  $P_{pico} = 12W$ , εκπέμπει περίπου 0,2 W, και λόγω της χωρικής κατανομής των χρηστών, εξυπηρετεί έως και 4 χρήστες κατά μέσο όρο. Κάθε macrocell site αποτελείται από τρεις τομείς και, στηριζόμενη σε ξεχωριστή απομακρυσμένη μονάδα radio head ανά τομέα (500 W το καθένα), καταναλώνει συνολική ισχύ  $P_{macro} = 1.5kW$ . Η κατανάλωση ενέργειας καθορίζεται ανεξάρτητα από την κίνηση. Μια μέση φασματική απόδοση 1,7 b/s/Hz ανά τομέα macrocell θεωρείται και από την πλευρά του εύρους ζώνης 20 MHz, 204 ενεργοί χρήστες ταυτόχρονα μπορούν να υποστηριχθούν ανά περιοχή macrocell, ο καθένας απαιτεί 0,5 Mbps. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου ετησίως (= 8760 ώρες) σε μονάδες Watt Ώρες μπορεί να γραφτεί ως

$$E_{network} = (n_{macro} \cdot P_{macro} + n_{pico} \cdot P_{pico}) \cdot 8760 \quad (1)$$

υπό την προϋπόθεση ότι τα στοιχεία του πυρήνα του δικτύου μπορούν να αγνοηθούν τόσο για macro όσο και picocells δεδομένα και η συμβολή τους στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου να είναι πολύ χαμηλή.

Από την μοντελοποίηση μικτής φωνής και κίνησης δεδομένων, κάθε συνδρομητής κινητής τηλεφωνίας θεωρείται ότι έχει έναν κύκλο καθήκοντος 17,15%.

Αυτό σημαίνει ότι, ένα μέσο όρο,  $n_{macro} = \lfloor \frac{4000 \times 0.1715}{204} \rfloor = 34$  macrocell sites

απαιτούνται για την παροχή μοντελοποιημένου περιβάλλον. Βασιζόμενοι στην εξυπηρέτηση 4 UEs, κάθε picocell χρειάζεται να βρίσκεται στην RE κατάσταση για 50.18% του χρόνου για να εξυπηρετήσει την κυκλοφορία των χρηστών του. Για να υπολογιστεί η μέση κατανάλωση ενέργειας του δικτύου από την εξίσωση (1), το μέσο όρος  $\overline{P_{pico}}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{P_{pico}} = 0.5018 \times P_{pico} + (1 - 0.5018) \times P_{pico,SL} \quad (2)$$

όπου  $P_{pico} = 12W$ ,  $P_{pico,SL}$  είναι ισοδύναμο με 7.3 W και 3 W για UE/small cell driven και core network controlled μέθοδοι, αντίστοιχα.

Το σχήμα 46 σχεδιάζει την μέση κατανάλωση ενέργειας δικτύου  $E_{network}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ανεπτυγμένων picocells.

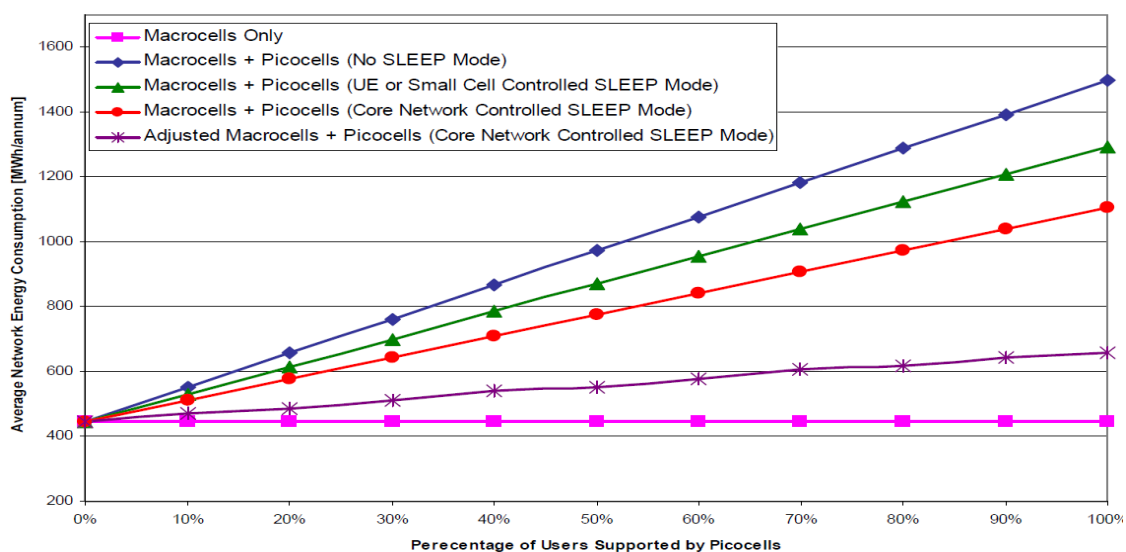
Εξετάζουμε πρώτα την περίπτωση των αναπτύξεων μικρών κυττάρων χωρίς να ενεργοποιείται η κατάσταση sleep λειτουργία. Σε αυτήν την περίπτωση, όσο το ποσοστό των χρηστών που εξυπηρετούνται από τις picocells αυξάνεται, το φορτίο macrocell κίνησης μειώνεται αντίστοιχα. Ωστόσο, λόγω της αδυναμίας να προσαρμοστούν με το φορτίο κυκλοφορίας, η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου macrocell παραμένει σταθερή. Τα κυριότερα σημεία του γραφήματος είναι ότι η



κατανάλωση ενέργειας του δικτύου αυξάνεται γραμμικά με την εισαγωγή των picocells. Το δίκτυο παίρνει υπερβολικά υπερτροφοδότηση (από άποψη χωρητικότητας του συστήματος), όσο η ανάπτυξη των picocells κλιμακώνεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας υποχρησιμοποιούμενων BSs.

Στην περίπτωση του σβησίματος περισσότερων στοιχείων στην κατάσταση SL, η λύση του ελεγχόμενου δικτύου κορμού φαίνεται να προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους των ελεγχόμενων κυττάρων και UE. Για την περίπτωση που το σύνολο της κίνησης χρήστη που υποστηρίζεται από picocells, οι προσεγγίσεις των ελεγχόμενων κυττάρων, UE και ελεγχόμενου κορμού παρέχουν εξοικονόμηση 13,7% και 26,2%, αντίστοιχα, σε σχέση με την απουσία των λειτουργιών sleep σε picocells.

Το σχήμα 46 παρέχει επίσης μια απεικόνιση της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο με προσαρμοσμένη διαμόρφωση macrocell. Με την εκφόρτωση της κυκλοφορίας, το δίκτυο macrocell θεωρείται ότι εκ νέου τροφοδοτείται και ο απαιτούμενος αριθμός των macrocell περιοχών  $n_{macro}$  και της αντίστοιχης  $P_{macro}$  κατανάλωσης ενέργειας υπολογίζονται εκ νέου. Ως αποτέλεσμα, τα κέρδη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι πολύ υψηλότερα από το μικρότερο αριθμό macrocell BSs που απαιτούνται (περίπου 56% σε σχέση με κάποια μη λειτουργία sleep). Εδώ, η τάση ακολουθεί ένα γραμμικό προφίλ σύμφωνα με την συντηρητική παραδοχή της ομοιόμορφης εκφόρτωσης κυκλοφορίας. Στην πράξη, η κατανομή της κυκλοφορίας χρήστη δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, πράγμα που σημαίνει ότι μερικές macrocell περιοχές κυττάρων είναι πιο φορτωμένες από άλλες. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα μικρό ποσοστό των μικρών κυττάρων μπορεί να απαλλαχτεί μεγάλου όγκου κυκλοφορίας macrocell που οδηγούν σε κέρδη μη-γραμμικής ενέργειας.



Σχήμα 46. Ενέργεια που καταναλώνεται από τους ράδιο BSs ετησίως σε σχέση με την κατάσταση sleep λειτουργίας εγκατάστασης ενεργοποιημένου picocell, (πηγή:



---

**Power Savings in Small Cell. Deployments via Sleep Mode Techniques**, Imran Ashraf, Federico Boccardi, Lester Ho, Bell Laboratories, Alcatel-Lucent).

#### 4.3.2.6 Συμπεράσματα

Οι τρεις διαφορετικές στρατηγικές, δηλαδή το μικρό κελί, ο κορμός δικτύου, και το user equipment (UE), έχουν δείξει ότι προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο περίπου 13 έως 56% σε σχέση με τις συνεχόμενες sleep modes.



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### 5. Γενικά Συμπεράσματα

Στόχος της πτυχιακής ήταν να καλύψει το σύνολο των συστημάτων LTE, τόσο τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για ραδιοεπικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου όσο και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων και μηνύματα σηματοδοσίας μέσω του δικτύου.

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία LTE απαιτούν να παραμένουν συνεχώς συνδεδεμένες ανά πάσα στιγμή και οποιαδήποτε στιγμή. Αυτό έχει επίπτωση στην ενέργεια του συστήματος. Στην εργασία αναλύθηκαν τρεις τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας χωρίς να αλλοιώνονται οι υπηρεσίες που παρέχει η τεχνολογία.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών προκύπτουν τα εξής:

Όσον αφορά την μέθοδο με τους Ασυνεχείς Υποδοχείς (DRX) εφαρμόστηκε ο προγραμματισμός ON/FF με ρυθμιζόμενους και μη ρυθμιζόμενους κύκλους DRX.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ρυθμιζόμενη LTE DRX αποδίδει διαφορετικά σε σύγκριση με τη μη ρυθμιζόμενη LTE DRX προσέγγιση.

Τόσο το PS όσο και το D μειώνονται όσο ο  $T_I$  και  $T_N$  αυξάνουν με την μη ρυθμιζόμενη προσέγγιση, αλλά δεν ισχύει το ίδιο για τη ρυθμιζόμενη περίπτωση.

Όταν ο  $T_I$  γίνεται μεγαλύτερος, στην περίπτωση του μη ρυθμιζόμενου κύκλου, πραγματοποιούνται λιγότερες μεταβάσεις σε κατάσταση λειτουργίας εξοικονόμησης ενέργειας. Για το ρυθμιζόμενο κύκλο DRX, σε χαμηλότερες τιμές του  $T_I$ , ο UE βρίσκεται στη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας, όσο ο  $T_I$  γίνεται μεγαλύτερος υπάρχουν λιγότερες μεταβάσεις στη λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας. Όσο οι Sleep Cycles αυξάνονται μειώνεται η εξοικονόμηση ενέργειας.

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί αλγόριθμο προκειμένου να μειωθούν όσο περισσότεροι σταθμοί βάσεις χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα των υπηρεσιών. Ο αλγόριθμος αποφασίζει να απενεργοποιήσει σταθμούς βάσης όχι ανάλογα με το φορτίο της κυκλοφορίας του, αλλά σύμφωνα με τη μέση απόσταση των χρηστών του. Ο αλγόριθμος distance-aware επιτυγχάνει σημαντική μείωση κατανάλωση ενέργειας τις τάξεις του 29% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για τη λειτουργία του δικτύου.

Η Τρίτη μέθοδος εφαρμόζει την λειτουργία sleep στα μικρά κύτταρα σταθμών βάσης όταν δεν απαιτείται η εξυπηρέτηση οποιαδήποτε κίνησης χρήστη. Εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές στρατηγικές: Τα μικρά κύτταρα ελεγχόμενα από την λειτουργία Sleep, το Δίκτυο Κορμού Ελεγχόμενο από την λειτουργία Sleep και το Εξοπλισμό Χρήστη ελεγχόμενο από την λειτουργία Sleep.



Στην περίπτωση του σβησίματος στοιχείων στην κατάσταση SL, η λύση του ελεγχόμενου δικτύου κορμού προσφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους των ελεγχόμενων κυττάρων και UE. Για την περίπτωση που το σύνολο της κίνησης χρήστη υποστηρίζεται από pico-cells, οι προσεγγίσεις των ελεγχόμενων κυττάρων, UE και ελεγχόμενου κορμού παρέχουν εξοικονόμηση 13,7% και 26,2%, αντίστοιχα, σε σχέση με την απουσία των λειτουργιών sleep σε pico-cells.

Οι τρεις διαφορετικές στρατηγικές προσφέρουν συνολικά εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο περίπου 13 έως 56%.



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### 6. Μελλοντικά

Η Τεχνολογία που ακολουθεί της τεχνολογίας 4G είναι αυτή της πέμπτης γενιάς (5G). Η 5G μπορεί να είναι μια ολοκληρωμένη ασύρματη επικοινωνία χωρίς περιορισμούς, είναι η επόμενη σημαντική φάση των προτύπων κινητής τηλεφωνίας.

Κάθε νέα έκδοση θα ενισχύσει περαιτέρω την απόδοση του συστήματος και θα προσθέσει νέες δυνατότητες και νέα πεδία εφαρμογών. Η τεχνολογία 5G θα αλλάξει τα μέσα ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε πολύ υψηλό εύρος ζώνης. Οι τεχνολογίες 5G περιλαμβάνουν όλους τους τύπους των προηγμένων χαρακτηριστικών που καθιστούν την τεχνολογία 5G πιο ισχυρή στο άμεσο μέλλον. Οι χρήστες θα μπορούν να συνδέουν τα κινητά τους τηλέφωνα με το φορητό υπολογιστή τους για να μπορούν να έχουν ευρυζωνική πρόσβαση στο internet. Η τεχνολογία 5G θα περιλαμβάνει κάμερα, εγγραφή MP3, video player, μεγάλη μνήμη του τηλεφώνου, ταχεία κλήση, αναπαραγωγή ήχου κ.α . Στην πέμπτη γενιά, η αρχιτεκτονική του δικτύου θα αποτελείται από ένα τερματικό χρήστη (ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στη νέα αρχιτεκτονική) και μια σειρά από ανεξάρτητες, αυτόνομες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RAT). Το κινητό σύστημα 5G είναι IP-μοντέλο. Αυτή η γενιά αναμένεται στην αγορά το 2020

Οι εφαρμογές της επόμενης γενιάς μπορούν να εξελιχθούν σε ένα περιβάλλον με πολλαπλές πλατφόρμες. Εφαρμογές 4G θα είναι διαθέσιμες σε διάφορες ασύρματες τεχνολογίες αλλά και σε συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, e-readers, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, εκτυπωτές κ.α. Εφαρμογές 4G είναι πολύ πιθανό να επεκταθούν καθώς και βελτιωμένες εκδόσεις των υφιστάμενων υπηρεσιών 3G. Μερικές από τις εφαρμογές των δικτύων επόμενης γενιάς είναι:

Εικονική Παρουσία: Αυτό σημαίνει ότι τεχνολογίες 4G και 5G θα παρέχουν υπηρεσίες χρήστη ανά πάσα στιγμή, ακόμη και αν ο χρήστης είναι off-site.

Εικονική πλοήγηση: η τεχνολογία 4G θα παρέχει στους χρήστες εικονική πλοήγηση μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων όσον αφορά τους δρόμους, κτίρια κλπ των μεγάλων πόλεων. Αυτό απαιτεί τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας.

Τηλε-Ιατρική: οι τεχνολογίες 4G και 5G θα υποστηρίζουν την εξ αποστάσεως παρακολούθηση της υγείας των ασθενών. Ένας χρήστης δεν θα χρειάζεται να μεταβεί στο νοσοκομείο, ο χρήστης θα μπορεί να του παρέχεται ιατρική βοήθεια μέσω τηλεδιάσκεψης ανά πάσα στιγμή και οπουδήποτε..

εφαρμογές Τηλε-γεωεπεξεργασία: Αυτός είναι ένας συνδυασμός των GIS (Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών) και GPS (Global Positioning System).  
διαχείριση κρίσεων: Οι φυσικές καταστροφές μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα



συστήματα επικοινωνίας. Στο σημερινό κόσμο μπορεί να χρειαστούν μέρες ή εβδομάδες για να επαναφέρετε το σύστημα. Στο μέλλον τα συστήματα 4G, αναμένεται να αποκαταστήσουν τέτοια θέματα κρίσης μέσα σε λίγες ώρες.

Εκπαίδευση: Η τεχνολογία 4G θα παρέχει διά βίου εκπαίδευση. Οι άνθρωποι σε όλο τον κόσμο θα μπορούν να συνεχίσουν την εκπαίδευσή τους μέσω online με οικονομικά και αποδοτικό τρόπο κ.α.





## Βιβλιογραφία

1. **Working Paper: Intergenerational effects in the diffusion of new technology: The case of mobile phones ETLA Discussion Papers**, Provided in Cooperation with: Research Institute of the Finnish Economy (ETLA), Helsinki, Liikanen, Jukka; Stoneman, Paul; Toivanen, Otto.
2. **AN INTRODUCTION TO LTE. LTE, LTE-ADVANCED, SAE, VoLTE AND 4G MOBILE COMMUNICATIONS**, Christopher Cox.
3. **3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband**, Eric Dahlman, Stefen Pakrall, Johan Skold and Per Beming.
4. **MOBILE TECHNOLOGY: EVOLUTION FROM 1G TO 4G.**
5. **ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**, Μ. Ε ΘΕΟΛΟΓΟΥ.
6. **Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network**, Pankaj Sharma. Department of Computer Science, Abhilashi Educational Society, Ner Chowk, Mandi, Himachal Pradesh, India.
7. **LTE in a Nutshell: Protocol Architecture.**
8. **Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G**, Amit Kumar, Dr. Yunfei Liu, Dr. Jyotsna Sengupta, Divya.
9. **Study on Power Saving Based on Radio Frame in LTE Wireless Communication System Using DRX**, Scott Fowler.
10. **Analysis of Adjustable and Fixed DRX Mechanism for Power Saving in LTE/LTE-Advanced**, Scott Fowler, Ranjeet S. Bhamber, Abdelhamid Mellouk.
11. D. Lister, Vodafone Group Research & Development, **“An operator’s view on green radio,”** presented at the Proc. IEEE Int. Workshop on Green Communications.



**12. Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks**, Oliver Arnold, Fred Richter, Gerhard Fettweis, Oliver Blume. Vodafone Chair Mobile Communications Systems, Technische Universität Dresden.

**13. A Survey of Energy-Efficient Wireless Communications.** Daquan Feng, Chenzi Jiang, Gubong Lim, Leonard J. Cimini, Jr. Fellow, IEEE, Gang Feng, Senior Member, IEEE, and Geoffrey Ye Li, Fellow, IEEE.

**14. Impact of DRX on VoIP Performance and battery Life in LTE**, Waqas Ahmad Khan.

**15. Power Savings in Small Cell. Deployments via Sleep Mode Techniques**, Imran Ashraf, Federico Boccardi, Lester Ho, Bell Laboratories, Alcatel-Lucent.

**16. Wireless Communications: Past Events and a Future Perspective**, Theodoros Rappaport, A. Annamalai, R. M. Buerera, ND William H. Tranter.

**17 LTE-SAE architecture and performance**, Per Beming, Lars Frid, Göran Hall, Peter Malm, Thomas Noren, Magnus Olsson and Göran Rune.

**18. Understanding LTE and its Performance**, Tara Ali-Yahiya.

**19. A Study on 5G Evolution and Revolution**, Priya Goyal Department of Electronics and Communication, Punjab Technical University, Jalandhar, India, Avtar Singh Buttar Department of Electronics and Communication, Punjab Technical University, Jalandhar, India