



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επισκόπηση των ενεργειών προτυποποίησης και των
δυνατοτήτων του LTE-LTE Advanced-LTE Advanced Pro**

Θεόδωρος Α. Λίτσας

Επιβλέπωντας: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επισκόπηση των ενεργειών προτυποποίησης και των
δυνατοτήτων του LTE-LTE Advanced-LTE Advanced Pro

Θεόδωρος Α. Λίτσας

A.M.: 1115200600100

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑΣ: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία σκοπεύει στην παρουσίαση της τεχνολογίας του LTE, που αποτελεί τη βάση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 4G. Η παρουσίαση δεν επικεντρώνεται μόνο στα τεχνικά/λειτουργικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας, αλλά ασχολείται και με την ιστορική εξέλιξή τους, όπως αυτή αποτυπώνεται στα διάφορα releases. Πρόκειται για μία κατάδυση στα releases 8-14, δίνοντας βάρος στις ανάγκες που επιδιώχτηκε να καλυφθούν, στις προδιαγραφές που τέθηκαν, στις λύσεις που προτάθηκαν και στα ζητήματα που έμειναν για μελλοντική πρόβλεψη. Έπειτα από μία βασική εισαγωγή στην τεχνολογία του LTE όπως αυτή ορίστηκε στο πιστοποιητικό γέννησής της, το Release 8, η οποία και κάλυψε τα ζητήματα της αρχιτεκτονικής και των λύσεων φυσικού επιπέδου, επιλέχτηκε η παρουσίαση κάθε release ξεχωριστά, όπου και περιγράφονταν οι επιμέρους τεχνολογίες που είτε εισάγονταν είτε εμπλουτίζονταν με το release αυτό. Με αυτό τον τρόπο δίνεται μια σαφέστερη εικόνα της εξέλιξης, των νέων απαιτήσεων που προέκυπταν αλλά και της προοδευτικής λειτουργικής αναβάθμισης της τεχνολογίας αυτής. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, η μελέτη των releases συνδυάστηκε με την εξέταση και άλλων πηγών, τόσο ακαδημαϊκών όσο και από τηλεπικοινωνιακούς κολοσσούς και ενώσεις, που στόχευαν αφενός στη συνοπτική παρουσίαση κάθε release και των τεχνολογιών του, αφετέρου τις συνέδεαν με το γενικότερο τηλεπικοινωνιακό πλαίσιο. Κατά τη μελέτη του υλικού, μας δόθηκε η ευκαιρία να διαπιστώσουμε την πλειάδα των τεχνολογιών που πρέπει να ενσωματώνει ένα σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό σύστημα και των διαφορετικών λειτουργιών που πρέπει να επιτελεί. Επίσης, συνειδητοποιήσαμε πως το LTE είναι στραμμένο στο μέλλον: ενώ η τεχνολογία 4G δε βρίσκεται καν στο μέγιστο της ακμής της, το 5G είναι ήδη στα σκαριά, με ορίζοντα το 2020.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Κινητές Τηλεπικοινωνίες

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: LTE, 4G, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, 3GPP Releases, κινητή τηλεφωνία

ABSTRACT

The present assignment aims at presenting the technology of LTE, the core of the 4G cellular networks. The presentation does not focus on the technical and functional details of LTE only, but deals with their evolution over time as well, as this is illustrated in the various releases. Actually, it is a dive into releases 8 to 14, focusing on the needs behind them, the specifications, the requirements, the proposed solutions and the issues left for future releases. After a brief introduction in the LTE technology, as this has been defined in Release 8, which covers the physical layer and architecture aspects of the technology, the presentation of each of the following releases separately at a chronological order was adopted, where the technologies related to each release were presented. In that way, a clear review of the evolution described by each release is shown, including the new requirements arised and the step-by-step enhancement of LTE. For that reason, the study of releases was combined with the reviewing of other sources, both academic and commercial, in order to achieve a better level of presentation of each release and a connection to the market. While examining the material, we had the opportunity to understand the vast number of underlying technologies of each modern telecommunications system and of the diversity of functions this has to implement. Moreover, we took into consideration that LTE's community is always future-oriented: while 4G is still in growth, the technology of 5G is to be standardized.

SUBJECT AREA: mobile communications

KEYWORDS: LTE, 4G, 3GPP Releases, mobile communications, radio networks

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
2. 3GPP RELEASES 8 & 9: LTE.....	18
2.1 Φυσικό Επίπεδο ή Επίπεδο Διαύλου.....	19
2.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου.....	28
2.3 LTE Release 9.....	43
3. 3GPP RELEASES 10 & 11: LTE-ADVANCED.....	51
3.1 MIMO.....	55
4. 3GPP RELEASES 12 & 13: LTE-ADVANCE PRO.....	63
4.1 Release 12.....	63
4.2 Release 13.....	65
5. 3GPP RELEASE 14: Ο ΔΡΟΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G.....	71
6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	74
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	87
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	88
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	91

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Χρονική εξέλιξη των κινητών δικτύων συναρτήσει του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης [6].....	11
Εικόνα 2: Οι 4 γενιές των κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [7].....	12
Εικόνα 3: Ταξίδι των releases του LTE στον χρόνο [15].....	13
Εικόνα 4: Βασικά στάδια διαδικασίας προτυποποίησης [1].....	13
Εικόνα 5: Ορθογωνιότητα φερουσών σήματος στο OFDM [14].....	17
Εικόνα 6: Ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην καθοδική και στην ανοδική ροή [14].....	19
Εικόνα 7: Δομή χρονικού πλαισίου FDD [14].....	20
Εικόνα 8: Δομή OFDM συμβόλου όπως μεταδίδεται στο LTE [14].....	20
Εικόνα 9: Επιλεκτικές διαλείψεις στη συχνότητα του ασύρματου καναλιού και προγραμματισμός της μετάδοσης για την αποφυγή τους [3].....	21
Εικόνα 10: Ορισμός των RB, RE για την περίπτωση της καθοδικής ροής και του κανονικού κυκλικού προθέματος [14].....	22
Εικόνα 11: Εισαγωγή των συμβόλων αναφοράς στο RB για την περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος [14].....	23
Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική του δικτύου του LTE [29].....	24
Εικόνα 13: Δομή του EPS [13].....	25
Εικόνα 14: Απλοποιημένη δομή του επιπέδου χρήστη του LTE [3].....	26
Εικόνα 15: Contention based διαδικασία τυχαίας προσπέλασης [22].....	29
Εικόνα 16: non Contention based διαδικασία τυχαίας προσπέλασης [22].....	29
Εικόνα 17: Διαδικασία επεξεργασίας του προθέματος από τον σταθμό βάσης και εκπομπή της απάντησης [21].....	30
Εικόνα 18: Η λογική του εκ των προτέρων χρονισμού [23].....	31
Εικόνα 19: Λογική του DRX [24].....	31
Εικόνα 20: Δομή του HARQ [25].....	32
Εικόνα 21: Πολύπλεξη λογικών καναλιών καθοδικής ροής [13].....	33
Εικόνα 22: Πολύπλεξη λογικών καναλιών ανοδικής ροής [13].....	33

Εικόνα 23: Μετάβαση από την κατάσταση αναμονής στην κατάσταση συνδεσιμότητας [13].....	36
Εικόνα 24: Δικτυακή αρχιτεκτονική για το MBMS [32].....	37
Εικόνα 25: Παράδειγμα οργάνωσης κυψελών σε περιοχές MBSFN [32].....	38
Εικόνα 26: Αρχιτεκτονική του δικτύου εντοπισμού της τοποθεσίας του E-UTRA [32]....	39
Εικόνα 27: Θέση των συμβόλων αναφοράς στην περίπτωση BF 2 επιπέδων και μετάδοσης από 2 κεραιές, με χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος [32].....	40
Εικόνα 28: Συχνοτικές προδιαγραφές για το MSR [32].....	41
Εικόνα 29: Λειτουργικές διεργασίες στο SON.....	42
Εικόνα 30: Η λογική της προσθήκης φέρουσας στο R10 [35].....	46
Εικόνα 31: Παράδειγμα προσθήκης φερουσών μεταβλητού εύρους ζώνης [36].....	46
Εικόνα 32: Οι 3 τρόποι προσθήκης φέρουσας [36].....	47
Εικόνα 33: Παράδειγμα κυψελών εξυπηρέτησης [36].....	48
Εικόνα 34: Παράδειγμα συστήματος MIMO 2x2 [36].....	48
Εικόνα 35: Παράδειγμα χρήσης MIMO ή άλλης μεθόδου χωρικής πολύπλεξης, ανάλογα με το λόγ σήματος προς θόρυβο [36].....	49
Εικόνα 36: Προκωδικοποίηση και MIMO μετάδοση στα R8 & R10 [36].....	49
Εικόνα 37: Ενδιάμεσοι κόμβοι στο R10 [36].....	50
Εικόνα 38: Πορεία από το R8 στο R11 [38].....	51
Εικόνα 39: Βασική δομή του CoMP [39].....	52
Εικόνα 40: Παράδειγμα παρεμβολών στα όρια των κυψελών λόγω της χρήσης των ίδιων συχνοτήτων από γειτονικές κυψέλες [42].....	52
Εικόνα 41: ICIC με χρήση διαφορετικών σχημάτων ανάθεσης ισχύος ανά σταθμό βάσης [42].....	53
Εικόνα 42: eICIC & ABS [42].....	54
Εικόνα 43: Καινούρια στοιχεία που έφερε το R12, σε συνδυασμό με τί οδήγησε σε αυτά καθώς και με τα οφέλη που έχουν [44].....	59
Εικόνα 44: Βελτιωμένη μικρή κυψέλη [43].....	60
Εικόνα 45: AAS σταθμός βάσης [46].....	61
Εικόνα 46: LTE Advanced Pro [4].....	62

Εικόνα 47: Κατευθύνσεις του LTE Advanced Pro, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο R13 [6].....	63
Εικόνα 48: Η έννοια του LAA [1].....	64
Εικόνα 49: Τεχνολογίες στενής ζώνης για το IoT [5].....	65
Εικόνα 50: Πορεία της προτυποποίησης των MC υπηρεσιών του LTE [10].....	67
Εικόνα 51: Βελτίωση απόδοσης συστημάτων MIMO του R14 σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα του R13 [8].....	68
Εικόνα 52: Τεχνολογία γρήγορης πρόσβασης [8].....	68
Εικόνα 53: Προγραμματισμένη εξέλιξη των Releases στην πορεία προς το 5G [45].....	69
Εικόνα 54: Στόχοι-Προδιαγραφές του 5G [48].....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των σημαντικότερων απαιτήσεων ως προς την απόδοση που τέθηκαν στις προδιαγραφές του LTE σε σύγκριση με τις αντίστοιχες προδιαγραφές παλαιότερων τεχνολογιών (Release 6)[12].....	15
Πίνακας 2: Παράμετροι της καθοδικής ροής του φυσικού επιπέδου του LTE [14].....	23
Πίνακας 3: Τα κανάλια του LTE [13].....	33
Πίνακας 4: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R8.....	42
Πίνακας 5: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R9.....	43
Πίνακας 6: Σύγκριση φασματικής αποδοτικότητας LTE R8 & LTE R10 για διαθέσιμο εύρος ζώνης 10MHz [35].....	45
Πίνακας 7:Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R10.....	54
Πίνακας 8: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R11.....	56
Πίνακας 9: Προσθήκη φέρουσας [15].....	57
Πίνακας 10: Εξελικτική πορεία καναλιών καθοδικής ροής.....	57

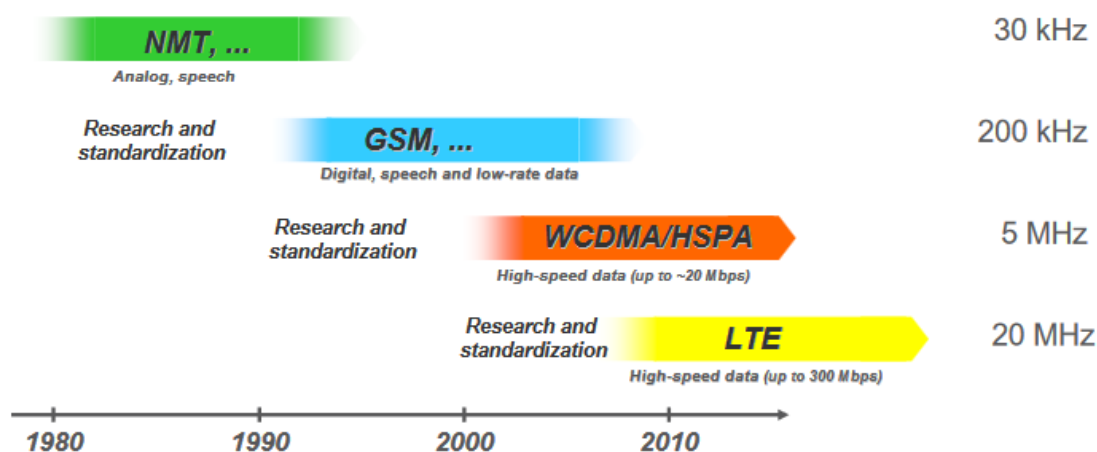
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία συγγράφηκε ως πτυχιακή εργασία στα πλαίσια της απόκτησης του πτυχίου μου και σκοπός της ήταν η εκ βάθρων μελέτη των τεχνικών λεπτομερειών των τεχνολογιών που αυτή περιλαμβάνει.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες κο Λάζαρο Μεράκο, Καθηγητή, και κο Δημήτριο Τσόλκα, για την καθοδήγηση, βοήθεια και κατανόηση τους, όσο και τα μέλη του στενού οικογενειακού και φιλικού μου περιβάλλοντος για την αμέριστη ψυχολογική υποστήριξη τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία **LTE** (Long-Term Evolution), γνωστή και ως E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network), είναι μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης (radio access technology) που εισήχθη με το release 8 (R8) της 3GPP¹, το οποίο και παγιώθηκε (frozen) τον Δεκέμβριο του 2008, αν και οι εργασίες είχαν ξεκινήσει ήδη από το 2004 [4]. Επρόκειτο για το σύστημα κινητής τηλεφωνίας (mobile system) με το μεγαλύτερο εύρος ζώνης την στιγμή εισαγωγής του, κάτι που οδήγούσε σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.

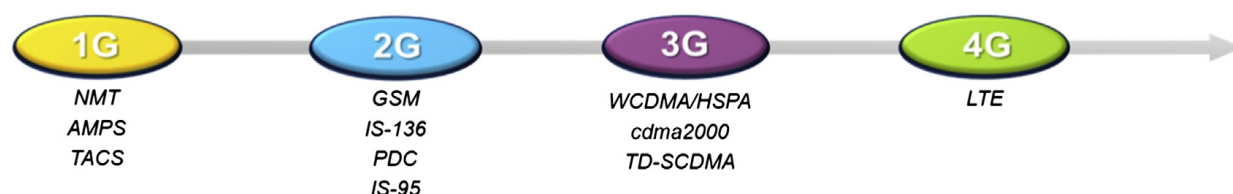


Εικόνα 1: Χρονική εξέλιξη των κινητών δικτύων συναρτήσει του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης [6].

Ο σχεδιασμός του LTE άρχισε πριν ακόμα η ανάγκη για αυτό γίνει εμφανής, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ανταγωνιστικότητα της 3GPP στον τομέα των κινητών επικοινωνιών και μετά από τον κύκλο ζωής του HSPA (3G), προγόνου του LTE. Σε σχέση με αυτό – και πέραν του αυξημένου ρυθμού μετάδοσης που αναφέρθηκε ήδη – προσέφερε μειωμένη καθυστέρηση, αυξημένη χωρητικότητα (capacity), και μειωμένο κόστος για τον χειριστή (operator) [11]. Η εισαγωγή του LTE σηματοδοτεί το πέρασμα από τα συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G systems) σε αυτά 4^{ης} γενιάς (4G systems), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Υπενθυμίζεται πως τα 3G συστήματα είναι τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας ευρείας ζώνης (mobile broadband systems), ενώ τα 4G συστήματα αποτελούν εξέλιξη των 3G (3G evolution) με ακόμα καλύτερη υποστήριξη των ευρυζωνικών υπηρεσιών [7].

Η LTE δεν προσέφερε κάτι επαναστατικό σε σχέση με τις 3G τεχνολογίες, όσον αφορά την φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency), που εκφράζεται με τον λόγο bps/Hz. Αντιθέτως, προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης λόγω της χρήσης μεγαλύτερου εύρους ζώνης [9]. Αυτό όμως δεν εμπόδισε τη θεαματική της επιτυχία: η κινητή τηλεφωνία 4^{ης} γενιάς, βασισμένη στην τεχνολογία LTE σημειώνει την ταχύτερη ανάπτυξη στην ιστορία της κινητής τηλεφωνίας. Στα μέσα του 2012, ούτε 4 χρόνια από το R8, 455 εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο επωφελούνταν ήδη της τεχνολογίας αυτής [8].

¹ Η 3rd Generation Partnership Project (3GPP) είναι μια ένωση 7 οργανισμών ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών προτύπων (standards) και ασχολείται με την προτυποποίηση τεχνολογιών, οι οποίες ορίζονται με την παραγωγή αναφορών (reports) και τεχνικών χαρακτηριστικών (specifications) [5].



Εικόνα 2: Οι 4 γενιές των κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [7].

Η γρήγορη επιτυχία του LTE οδήγησε την 3GPP στο να σχεδιάζει συνεχείς βελτιώσεις, έτσι ώστε να βελτιωθεί περαιτέρω ο ρυθμός μετάδοσης, αλλά και να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκαλεί η αυξημένη κίνηση. Έτσι, από το R8 και μετά, άλλα 5 releases έχουν παραχθεί [8]:

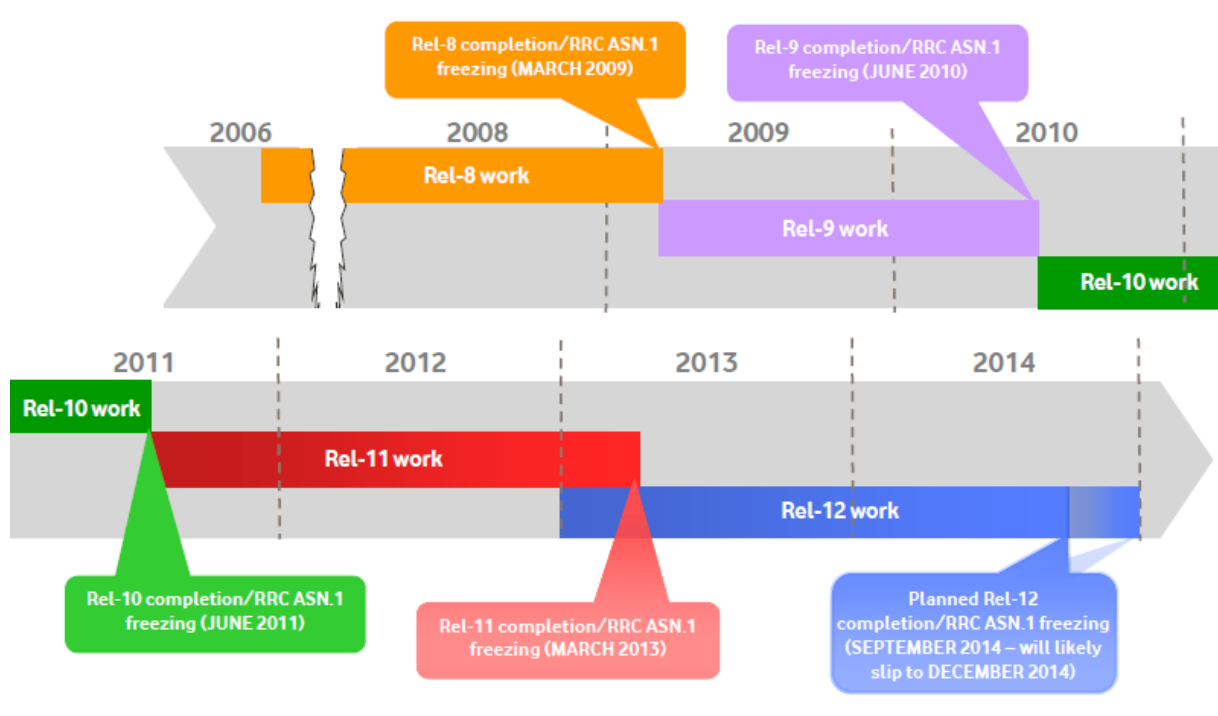
- το R9 ήταν ένα ενδιάμεσο release, που εισήγαγε λειτουργικότητα πολυεκπομπής (multicast) και ευρείας εκπομπής (broadcast).
- Το R10 αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα στην εξέλιξη του LTE. Το συγκεκριμένο release πληρούσε τις προϋποθέσεις της ITU (International Telecommunication Union) για τα IMT-Advanced συστήματα, γι' αυτό και ονομάστηκε LTE-Advanced.
- Το R11 συμπληρώνει το R10 και – πολλές φορές – χρησιμοποιούνται από κοινού για να ορίσουν το LTE-Advanced
- Το R12 εισήγαγε επιπλέον βελτιώσεις, κυρίως σε επίπεδο κελιών (little cell enhancements)
- Το R13 αποτελεί ένα βήμα μπροστά σε σχέση με το LTE Advanced, εισάγει το LTE advanced pro και αποτελεί ένα προπαρασκευαστικό στάδιο για την έλευση των συστημάτων 5^{ης} γενιάς (5G) [10].

Η χρονική εξέλιξη των releases του LTE, όπως αυτή αποτυπώθηκε τον Απρίλιο του 2013, φαίνεται στην Εικόνα 3 [15].

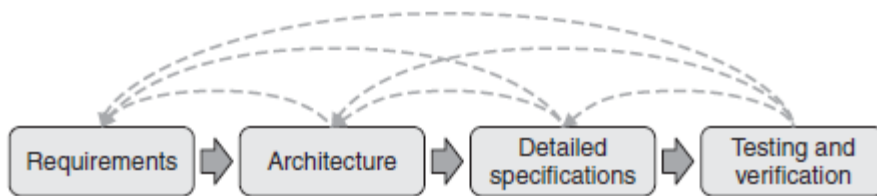
Η 3GPP έχει ήδη αρχίσει να εργάζεται πάνω στο Release 14, αυτό που αναμένεται να εισαγάγει τα συστήματα 5^{ης} γενιάς.

Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα παραπάνω, η διαδικασία της προτυποποίησης (standardization) δεν είναι στατική, απαιτεί συνεχή εξέλιξη και επικαιροποίηση, έτσι ώστε τα νέα πρότυπα να συμμορφώνονται με τις νέες απαιτήσεις ή και να τις προλαμβάνουν. Η διαδικασία προτυποποίησης διαφέρει από οργανισμό σε οργανισμό, αλλά θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε 4 βασικά στάδια, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4 [1]:

- Απαιτήσεις (requirements), όπου και διασαφηνίζονται οι προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το υπό διαμόρφωση πρότυπο
- Αρχιτεκτονική (architecture), όπου διαμορφώνεται η βασική δομή του προτύπου
- Λεπτομερή χαρακτηριστικά (detailed specifications), όπου καθορίζονται όλες οι λεπτομέρειες του προτύπου
- Δοκιμή και επαλήθευση (testing and verification), όπου δοκιμάζονται οι δυνατότητες του προτύπου και η δυνατότητα ανταπόκρισής του σε πραγματικές συνθήκες.



Εικόνα 3: Ταξίδι των releases του LTE στον χρόνο [15].



Εικόνα 4: Βασικά στάδια διαδικασίας προτυποποίησης [1].

Τα βήματα αυτά δεν εκτελούνται αποκλειστικά σειριακά, υπάρχει μια διαδικασία ανάδρασης από κάθε βήμα προς όλα τα προηγούμενά του καθώς και η εκ νέου εκτέλεση κάποιων από τα βήματα, αν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Δεδομένου ότι τα πρότυπα εξελίσσονται συνεχώς, ορίζονται συνήθως τόσο από το όνομά τους όσο και από την ημερομηνία κατά της οποίας παγιώθηκαν.²

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, θα κάνουμε το συναρπαστικό ταξίδι από την εισαγωγή του R8 μέχρι και το R14, καλύπτοντας τις αρχικές προδιαγραφές και τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE, καθώς και τις βελτιώσεις και τις αλλαγές που καθένα έφερε και επέφερε. Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η τεχνολογία LTE, όπως αυτή προτυποποιήθηκε από το 3GPP Release 8 καθώς και οι βελτιώσεις που εισήγαγε το R9. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται διαφορετικά το LTE-Advanced, όπως ορίστηκε στα releases 10 & 11, ενώ στο Κεφάλαιο 4 αναφερόμαστε στα releases 12 & 13, που προετοιμάζουν το έδαφος για το 5G.

² Ο Αγγλικός όρος που χρησιμοποιείται είναι freeze, και δηλώνει πως «παγώνουμε» το πρότυπο στον χρόνο και λαμβάνουμε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπό του.

2. 3GPP Releases 8 & 9: LTE

Όταν άρχισε ο σχεδιασμός του LTE, πίσω στο 2004, οι στόχοι που ως προς την απόδοση και τις δυνατότητες ήταν εξαιρετικά φιλόδοξοι [1]. Συγκεκριμένα, προβλέφθηκε ένας μέγιστος ρυθμός μετάδοσης 300 Mbps, μια καθυστέρηση ασύρματης μετάδοσης μικρότερη από 5ms, σημαντική βελτίωση της φασματικής αποδοτικότητας σε σχέση με παλιότερες τεχνολογίες και μία ενιαία αρχιτεκτονική με σκοπό την απλοποίηση της λειτουργίας και τη μείωση του κόστους [3]. Μια πολύ καλή συγκεντρωτική εικόνα των προδιαγραφών του LTE φαίνεται στον Πίνακα 1 [12]. Για λόγους σύγκρισης, παρατίθενται και οι προδιαγραφές παλαιότερων τεχνολογιών (Release 6), όπου και γίνεται εμφανές το ποιοτικό άλμα που επιχειρήθηκε.

Πίνακας 1: Συγκεντρωτική παρουσίαση των σημαντικότερων απαιτήσεων ως προς την απόδοση που τέθηκαν στις προδιαγραφές του LTE σε σύγκριση με τις αντίστοιχες προδιαγραφές παλαιότερων τεχνολογιών (Release 6)[12].

	Parameter	Absolute Requirement	Reference Base Line (R6: HSDPA/HSUPA)	Comment
Downlink	Peak transmission rate	> 100 Mbps	7 x 14.4 Mbps	LTE: 20 MHz FDD, 2x2 spatial multiplexing Reference: HSDPA in 5 MHz FDD, single antenna
	Peak spectral efficiency	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 1.6 - 2.1 bps/Hz/cell	3 - 4 x 0.53 bps/Hz/cell	LTE: 2x2 spatial multiplexing, interference rejection combining receiver. Reference: HSDPA, Rake receiver, 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.04 - 0.06 bps/Hz/user	2 - 3 x 0.02 bps/Hz	As above, 10 users assumed per cell
	Broadcast spectral efficiency	> 1 bps/Hz	N/A	Dedicated carriers for broadcast mode
Uplink	Peak transmission rate	> 50 Mbps	5 x 11 Mbps	LTE: 20 MHz FDD, 2x2 spatial multiplexing Reference: HSUPA in 5 MHz FDD, single antenna
	Peak spectral efficiency	> 2.55 bps/Hz	2 bps/Hz	
	Average cell spectral efficiency	> 0.66 - 1.0 bps/Hz/cell	2 - 3 x 0.33 bps/Hz	LTE: single antenna transmission, IRC receiver. Reference: HSUPA, Rake receiver, 2 receive antennas
	Cell edge spectral efficiency	> 0.02 - 0.03 bps/Hz/user	2 - 3 x 0.01 bps/Hz	As above, 10 users assumed per cell
System	User plane latency	< 10 ms	1/5	Two way radio delay
	Connection setup latency	< 100 ms		Excludes paging delay and Non-Access Stratum (NAS) signalling delay
	Operating bandwidth	1.4 - 20 MHz	5 MHz	
	VoIP capacity	> 60 sessions/MHz/cell (per NGMN)		

Για την καλύτερη κατανόηση και εποπτεία των λύσεων που εφαρμόστηκαν και της δομής που υιοθετήθηκε, η ανάλυση χωρίζεται σε 2 μέρη: στην ανάλυση στο φυσικό επίπεδο (physical layer) ή στο επίπεδο διαύλου (link layer), που αφορά τις τεχνολογίες μετάδοσης του σήματος μέσω του ασύρματου καναλιού και στην ανάλυση στο επίπεδο

αρχιτεκτονικής συστήματος (system architecture), που αφορά στη δομή πομπού και δέκτη.

2.1 Φυσικό Επίπεδο³ ή Επίπεδο Διαύλου

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του LTE είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει και με χρονοδιακριτική αμφίδρομη επικοινωνία (Time Division Duplex – TDD) και με συχνοδιακριτική αμφίδρομη επικοινωνία (Frequency Division Duplex – FDD) [1], [3]. Στην πρώτη περίπτωση, όλες οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση δεδομένων και προς τις 2 κατευθύνσεις (από τον πομπό στον δέκτη και από τον δέκτη στον πομπό)⁴. Ο διαχωρισμός των μεταδόσεων (απαραίτητος για την αποφυγή συμβολής των σημάτων) γίνεται στον χρόνο· καθένας από τους πομπό, δέκτη μεταδίδει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αντίθετα, στην περίπτωση του FDD, πομπός και δέκτης μεταδίδουν ταυτόχρονα, αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας και για λόγους απλότητας, θα θεωρήσουμε πως χρησιμοποιείται η τεχνική FDD.

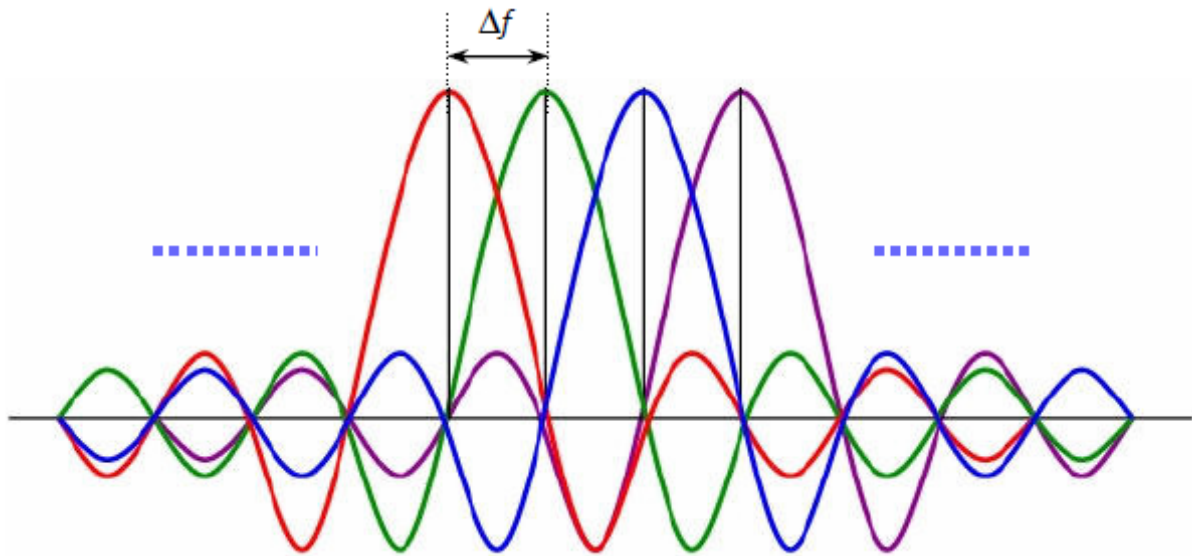
Για την μετάδοση της καθοδικής ροής χρησιμοποιείται η τεχνική της Ορθογώνιας Πολύπλεξης στη Συχνότητα (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) [1, 2, 3]. Χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή, το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων διαιρείται σε πολλές στενές ζώνες συχνοτήτων, σε καθεμιά από τις οποίες γίνεται μετάδοση ενός συμβόλου σε καθορισμένο χρόνο, έστω T_u . Η χρήση πολλών στενών ζωνών συχνοτήτων έχει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα: οι ασύρματοι δίαυλοι υποφέρουν συχνά από διαφορετική απόσβεση (selective fading) του σήματος ανάλογα με την συχνότητα, η οποία – επιπλέον – είναι και χρονικά μεταβαλλόμενη. Στην περίπτωση μετάδοσης σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων, η πιθανότητα για εμβάνιση του φαινομένου αυτού είναι σημαντική, κάτι που μπορεί να καταστρέψει το μεταδιδόμενο σήμα (να αλλοιώσει το συχνοτικό του περιεχόμενο με τέτοιο τρόπο ώστε να μην μπορεί να ανακατασκευαστεί στον δέκτη). Όταν, όμως, χωρίσουμε το διαθέσιμο φάσμα σε πολλές στενές ζώνες συχνοτήτων, τότε σε καθεμιά από αυτές υπάρχει πρακτικά μια επίπεδη απόσβεση (flat fading), μια απόσβεση, δηλαδή, που είναι πρακτικά σταθερή για όλο το εύρος ζώνης της στενής αυτής ζώνης, κάτι που καθιστά δυνατή την ανακατασκευή του σήματος στο δέκτη. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται και αντίστροφα: στα ασύρματα κανάλια, η καθυστέρηση μετάδοσης δεν είναι σταθερή, είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, που σημαίνει ότι σύμβολα που μεταδίδονται πολύ κοντά – χρονικά – το ένα στο άλλο (υψηλός ρυθμός μετάδοσης) μπορεί να φτάσουν με διαφορετική σειρά στο δέκτη ή – ακόμα χειρότερα – το πρώτο σύμβολο να μην έχει φτάσει στο δέκτη τη στιγμή που μεταδίδεται το δεύτερο, με αποτέλεσμα να έχουμε συμβολή των αντίστοιχων σημάτων και η πληροφορία που θα φτάσει στο δέκτη να είναι ακατάληπτη. Το OFDM, διαιρώντας το φάσμα σε στενές ζώνες, αυξάνει σημαντικά τον χρόνο μετάδοσης του κάθε συμβόλου συμβόλου (αντίστροφος του εύρους ζώνης), με αποτέλεσμα αυτός να γίνεται μεγαλύτερος από τη μέγιστη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης. Συνεπώς, όταν το δεύτερο σύμβολο μεταδίδεται, το πρώτο έχει σίγουρα φτάσει στο δέκτη.

Όσα περιεγράψαμε μέχρι στιγμής είναι αυτά που επιτελεί μια τεχνική πολύπλεξης στη συχνότητα. Αυτό που κάνει το OFDM επιπλέον είναι να εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα (στη συχνότητα) μεταξύ των φερουσών του σήματος κάθε ζώνης συχνοτήτων (subcarriers). Η ορθογωνιότητα αυτή, που φαίνεται στην Εικόνα 4, συνεπάγεται ότι οι

³ Στην συγκεκριμένη περίπτωση καθώς και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, ο όρος «επίπεδο» θεωρείται ισοδύναμος του όρου «στρώση» (layer).

⁴ Στη συνέχεια του παρόντος και για την αποφυγή συγχύσεων, θα θεωρούμε τον σταθερό σταθμό μετάδοσης του σήματος (κεραία) ως πομπό και την κινητή (φορητή) συσκευή ως δέκτη· θα θεωρούμε δε ως καθοδική ροή (downstream) τη ροή μετάδοσης από την κεραία στην κινητή συσκευή και ως ανοδική ροή (upstream) τη ροή μετάδοσης από την κινητή συσκευή στην κεραία.

παρεμβολές σήματος μεταξύ των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων είναι μηδενικές⁵. Το φαινόμενο αυτό της παρεμβολής μεταξύ σημάτων που μεταδίδονται ταυτόχρονα σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων ονομάζεται διασυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference – ISI) και είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στις ασύρματες επικοινωνίες, που αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας το OFDM.



Εικόνα 5: Ορθογωνιότητα φερουσών σήματος στο OFDM [14].

Για να επιτευχθεί η ορθογωνιότητα αυτή, τα σύμβολα που μεταδίδονται μέσω του OFDM προκύπτουν από αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (Inverse Fast Fourier Transform – IFFT).

Στην πράξη, προκύπτει ένα επιπλέον πρόβλημα: λόγω της ύπαρξης πολλαπλών διαδρομών μεταξύ πομπού και δέκτη (εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων του σήματος), ο δέκτης λαμβάνει συνήθως πάνω από ένα αντίτυπα του εκπεμπόμενου συμβόλου, τα οποία φτάνουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, μιας και χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδρομές διαφορετικής καθυστέρησης. Η ύπαρξη των πολλαπλών αντιτύπων προκαλεί μερική απώλεια της ορθογωνιότητας μεταξύ των φερουσών, κάτι που οδηγεί σε διασυμβολική παρεμβολή τόσο μεταξύ συμβόλων που μεταδίδονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων όσο και μεταξύ συμβόλων που μεταδίδονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Για την αποτελεσματική διευθέτηση του ζητήματος αυτού, εισάγεται ένα κυκλικό πρόθεμα πριν από την μετάδοση κάθε συμβόλου. Το πρόθεμα αυτό είναι η επανάληψη ενός τμήματος του τέλους του προηγούμενου συμβόλου (γι αυτό και ονομάζεται και κυκλικό) και διασφαλίζει τόσο την ορθογωνιότητα όσο και το ότι ο χρόνος μετάδοσης θα είναι μεγαλύτερος από τη μέγιστη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης [14].

Συγκεντρωτικά, μπορούμε να πούμε πως το OFDM συγκεντρώνει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [14]:

- Ο μεγάλος χρόνος συμβόλου και το κυκλικό πρόθεμα (με τον αντίστοιχο χρόνο που απαιτείται για την μετάδοσή του και που ονομάζεται χρόνος φύλαξης – guard interval) περιορίζει τη διασυμβολική παρεμβολή και διασφαλίζει εύρωστη μετάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών (robustness to multipath).

⁵ Σε ιδανικές συνθήκες, σε πραγματικές συνθήκες πάντα υπάρχει διασυμβολική παρεμβολή.

- Εξαλείφεται η ανάγκη για χρήση τεχνολογιών ακύρωσης παρεμβολών σε επίπεδο κυψέλης (cell)
- Γίνεται δυνατή η ευέλικτη χρήση του διαθέσιμου φάσματος
- Αυξάνεται η φασματική αποδοτικότητα μέσω της χρήσης ορθογώνιων φερουσών (όταν δεν έχουμε ορθογώνιες φέρουσες, το φάσμα συχνοτήτων δεν χρησιμοποιείται όλο, αφήνονται κενά μεταξύ γειτονικών ζωνών, ώστε να μειωθεί η διασυμβολική παρεμβολή).

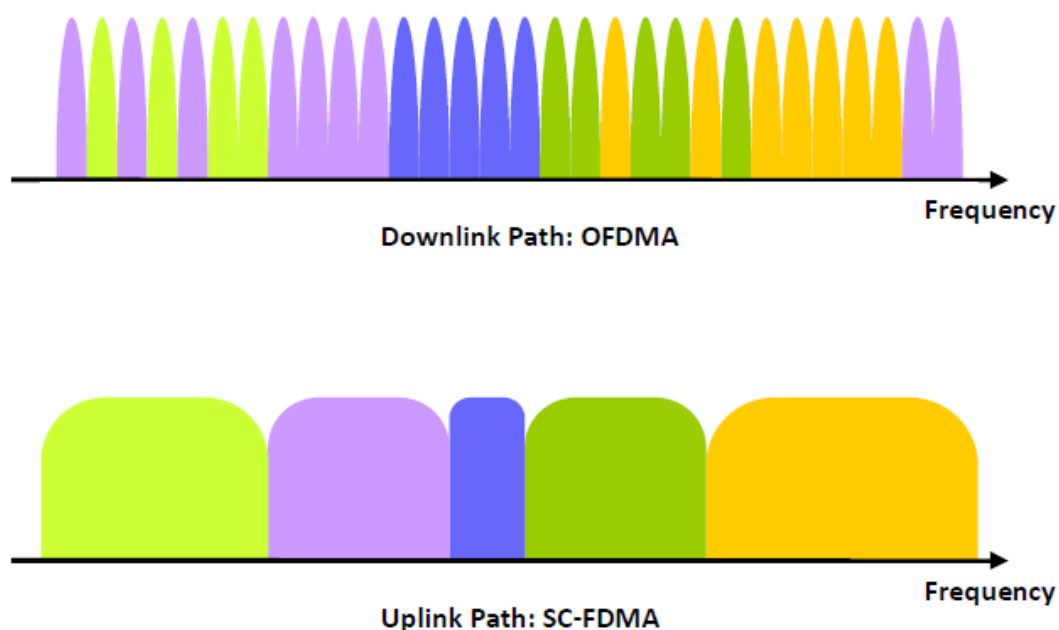
Εξέλιξη του OFDM αποτελεί το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access), το οποίο καθορίζει ότι διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικούς χρήστες για τη μετάδοση συμβόλων. Αυτή είναι και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην καθοδική ροή δεδομένων του LTE.

Το OFDMA, πέραν των σημαντικών πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι [14]:

- Μεγάλη ευαισθησία στη μετατόπιση συχνότητας (frequency offset), που μπορεί να προκληθεί τόσο από τις ηλεκτρονικές διατάξεις του πομπού/δέκτη όσο και από το φαινόμενο Doppler που εμφανίζεται στην ασύρματη μετάδοση
- Υψηλός λόγος μέγιστης προς μέση ισχύος του σήματος (peak-to-average power ratio PAPR). Αυτό προκύπτει λόγω της διαφορετικής απόσβεσης σήματος μεταξύ των ζωνών συχνοτήτων.

Το ζήτημα του υψηλού λόγου μέγιστης προς μέση ισχύος του σήματος αξιολογείται ως σημαντικό, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή διασυμβολική παρεμβολή από τα ισχυρά σύμβολα προς τα πιο ασθενή. Στην πλευρά του πομπού, όπου η διαθέσιμη ισχύς εκπομπής είναι πρακτικά απεριόριστη, το ζήτημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων. Όταν, όμως, πρόκειται να μεταδώσει η κινητή συσκευή, εκεί η διαθέσιμη ισχύς είναι ο βασικότερος περιορισμός, κάθε προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας είναι απαραίτητη. Για αυτό τον λόγο, για την μετάδοση της ανοδικής ροής δεδομένων η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με πολύπλεξη στη συχνότητα και χρήση ενός φορέα (Single Carrier – Frequency Division Multiplexing Access SC – FDMA χρησιμοποιείται), σε αντίθεση με τους πολλαπλούν φορείς του OFDMA (Εικόνα 5). Συνεπώς, στην τεχνική SC-FDMA ανατίθεται μία ζώνη συχνοτήτων σε κάθε χρήστη, ενώ στην τεχνική OFDMA ανατίθενται πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων σε κάθε χρήστη. Για την πολύπλεξη των πολλαπλών ροών (από διαφορετικούς χρήστες) χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier ενώ οι ζώνες συχνοτήτων δεν έχουν το ίδιο εύρος ζώνης (κάτι που συμβαίνει στο OFDMA): αυτό είναι ανάλογο του επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης για κάθε χρήστη. Η χρήση μιας ζώνης συχνοτήτων για κάθε χρήστη σημαίνει πως τα σύμβολα μεταδίδονται σειριακά και όχι παράλληλα (όπως στο OFDMA).

Η χρήση ενός μόνο φορέα για κάθε χρήστη οδηγεί σε υψηλή – σε σχέση με την καθοδική ροή – διασυμβολική παρεμβολή. Αντιθέτως, απαιτούνται απλούστερες διατάξεις εκπομπής, που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια [14].



Εικόνα 6: Ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην καθοδική και στην ανοδική ροή [14]. Σημειώνεται πως κάθε διαφορετικό χρώμα δηλώνει την μετάδοση από διαφορετικό χρήστη.

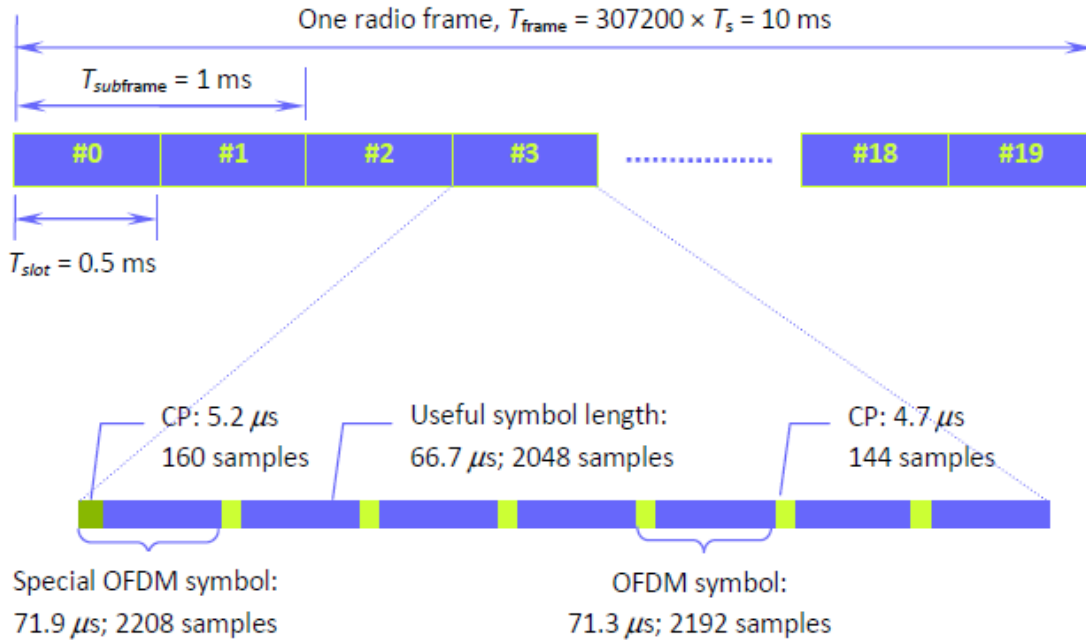
Εξετάζοντας τη μετάδοση των LTE δεδομένων στο πεδίο του χρόνου, αυτή χωρίζεται σε πλαίσια (frames) των 10 ms⁶. Καθένα από αυτά, χωρίζεται σε 10 υπο-πλαίσια διάρκειας 1ms έκαστο. Ο προγραμματισμός⁷ της μετάδοσης γίνεται σε επίπεδο υπο-πλαισίου τόσο για την ανοδική όσο και για την καθοδική ροή. Κάθε υπο-πλαίσιο αποτελείται από 2 σχισμές (slots) των 0.5 ms. Σε καθεμιά από αυτές τις χρονικές στιγμές μεταδίδεται ένας αριθμός συμβόλων OFDM, που μπορεί να είναι είτε 7 (στην περίπτωση του κανονικού κυκλικού προθέματος – normal cyclic prefix) είτε 6 (στην περίπτωση του εκτεταμένου κυκλικού προθέματος – extended cyclic prefix).

Ο ωφέλιμος χρόνος μετάδοσης του κάθε OFDM συμβόλου είναι περίπου 66.7 μs. Στην περίπτωση του κανονικού κυκλικού προθέματος, το κυκλικό πρόθεμα του πρώτου από τα 7 σύμβολα έχει διάρκεια 5.2 μs, ενώ το κυκλικό πρόθεμα καθενός από τα υπόλοιπα 6 σύμβολα έχει διάρκεια 4.7μs. Η διαφορετική διάρκεια του κυκλικού προθέματος μεταξύ του πρώτου και των υπόλοιπων συμβόλων είναι για λόγους ευθυγράμμισης του πλαισίου, που δεν θα μας απασχολήσουν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Στην περίπτωση του εκτεταμένου κυκλικού προθέματος, αυτό έχει διάρκεια 16.7μs.

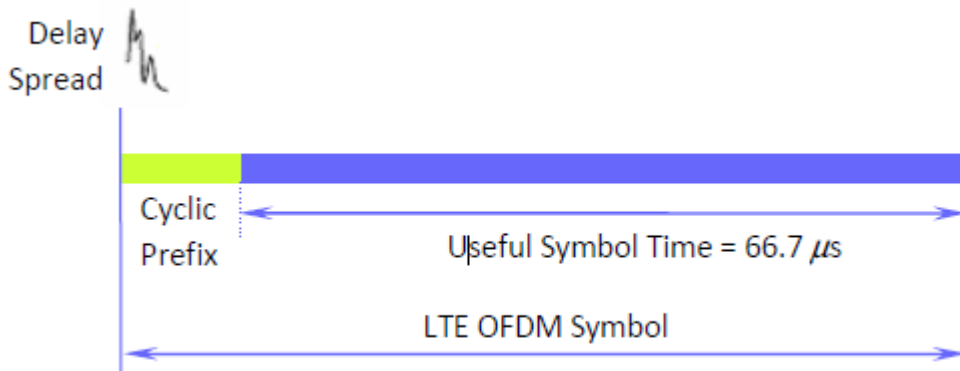
Η ύπαρξη 2 διαφορετικών περιπτώσεων κυκλικού προθέματος εξυπηρετεί τις διαφορετικές ανάγκες της μετάδοσης, ανάλογα με το μέγεθος της κυψέλης μιας και, όπως αναφέραμε παραπάνω, το κυκλικό πρόθεμα πρέπει να έχει διάρκεια μεγαλύτερη από τη χρονική διασπορά του καναλιού. Συνεπώς, σε περίπτωση αστικών κυψελών μικρής διαμέτρου, η διασπορά είναι συνήθως μικρή και το κανονικό κυκλικό πρόθεμα χρησιμοποιείται. Αντιθέτως, σε περίπτωση μετάδοσης σε κυψέλες μη αστικών περιοχών, που έχουν μεγάλη διάμετρο και η διασπορά είναι μεγαλύτερη, χρησιμοποιείται το εκτεταμένο κυκλικό πρόθεμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8.

⁶ Για λόγους απλότητας, εδώ εξετάζουμε τη δομή του χρονικού πλαισίου στην περίπτωση της FDD μετάδοσης.

⁷ Περισσότερες λεπτομέρειες για τον προγραμματισμό της μετάδοσης και για τη λειτουργία του Προγραμματιστή δίνονται στην Ενότητα 2.2.



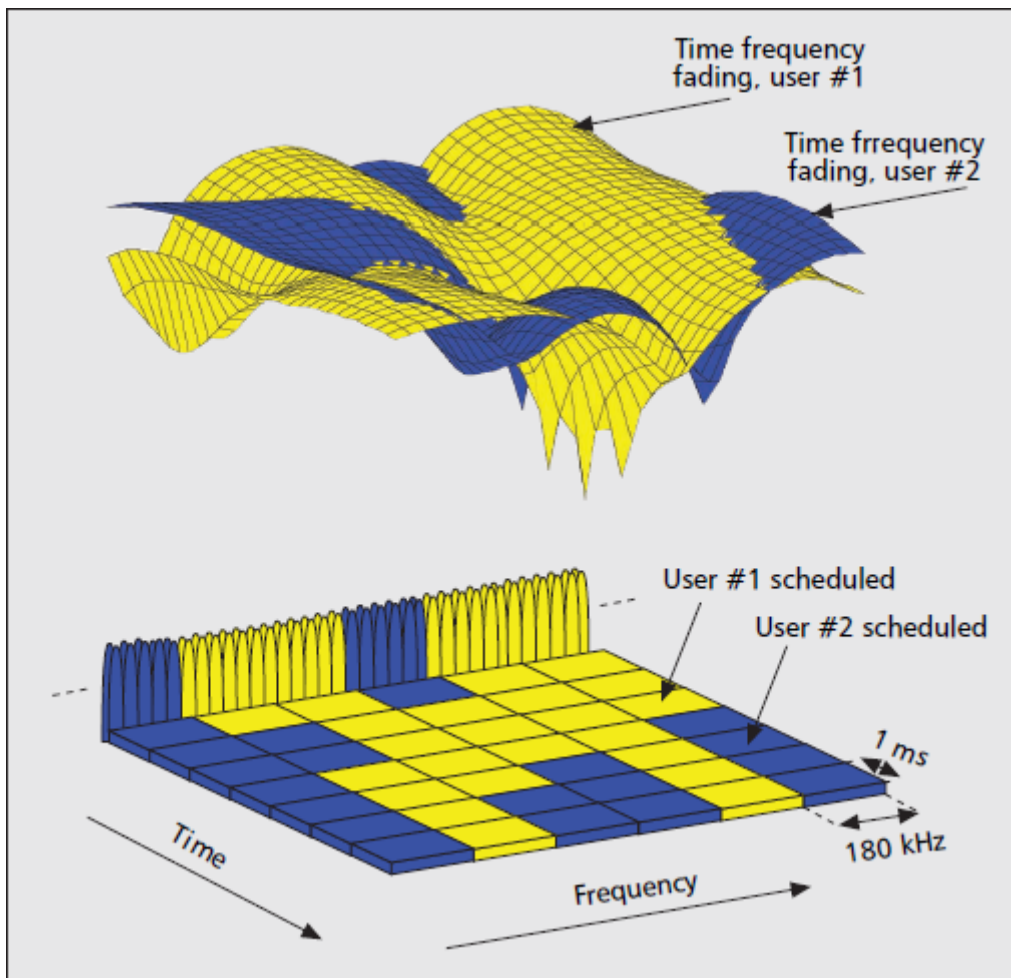
Εικόνα 7: Δομή χρονικού πλαισίου FDD [14].



Εικόνα 8: Δομή OFDM συμβόλου όπως μεταδίδεται στο LTE [14].

Όταν χρησιμοποιείται κανονικό κυκλικό πρόθεμα, περίπου 7.5% της χωρητικότητας του ασύρματου καναλιού χρησιμοποιείται για την μετάδοσή του (μη-ωφέλιμη πληροφορία). Ένας τρόπος να μειωθεί το ποσοστό αυτό είναι να αυξηθεί η διάρκεια κάθε ωφέλιμου συμβόλου, κάτι που επιτυγχάνεται με μείωση της απόστασης μεταξύ των υπο-φερουσών (sub-carrier spacing). Κάτι τέτοιο, όμως, καθιστά τη μετάδοση πιο ευάλωτη σε σφάλματα.

Περνώντας στο πεδίο της συχνότητας, το πλήθος των υπο-φερουσών ποικίλλει μεταξύ 128 και 2048, ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Στην πράξη και για το συνήθως χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης των 5 ή 10 MHz, αντιστοιχούν 512 και 1024 υπο-φέρουσες αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ των υπο-φερουσών είναι το αντίστροφο της διάρκειας του OFDM συμβόλου και είναι περίπου ίσο με 15 kHz. Γενικά, δεν χρησιμοποιούνται όλες οι υπο-φέρουσες για τη μετάδοση ωφέλιμης πληροφορίας: περίπου το 10% από αυτές (η DC υπο-φέρουσα καθώς και αυτές στα άκρα του εύρους ζώνης) χρησιμοποιούνται για λόγους ασφαλείας/φύλαξης.

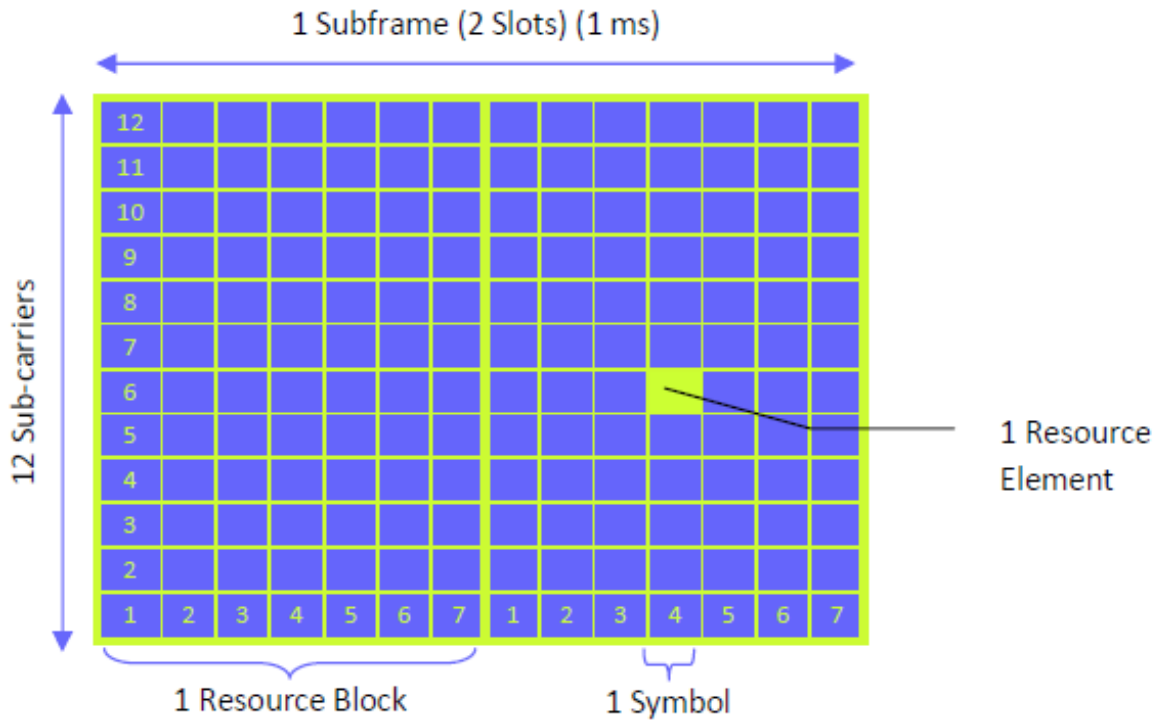


Εικόνα 9: Επιλεκτικές διαλείψεις στη συχνότητα του ασύρματου καναλιού και προγραμματισμός της μετάδοσης για την αποφυγή τους [3].

Σε επίπεδο μακρο-κυψέλης, το εύρος ζώνης συνοχής του σήματος⁸ (coherence bandwidth) είναι της τάξης του 1 MHz. Συνεπώς, σε ένα εύρος ζώνης των 5 ή 10 MHz υπάρχουν κάποιες υπο-φέρουσες που αντιμετωπίζουν διαλείψεις και άλλες που δεν αντιμετωπίζουν. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9, γίνεται προγραμματισμός της μετάδοσης έτσι ώστε να αποφεύγεται η μετάδοση σε συχνότητες που αντιμετωπίζουν διαλείψεις.

Ο προγραμματισμός της μετάδοσης στη συχνότητα γίνεται σε επίπεδο μπλοκ πόρων (Resource Block – RB). Κάθε RB αποτελείται από 12 συνεχόμενες υπο-φέρουσες, ένα συνολικό εύρος ζώνης των 180 kHz, διαθέσιμο για κάθε χρονική σχισμή. Κάθε RB αποτελείται από στοιχεία πόρων (Resource Element – RE). Το RE είναι η μικρότερη μονάδα (κβάντο) πόρων, που αποτελείται από μία υποφέρουσα OFDM που μεταδίδει για διάρκεια ίση με το διάστημα ενός OFDM συμβόλου. Κάθε RB αποτελείται από 84 RE στην περίπτωση του κανονικού κυκλικού προθέματος και από 72 στην περίπτωση του εκτεταμένου. Η παραπάνω δομή φαίνεται στην Εικόνα 10.

⁸ Ως εύρος ζώνης συνοχής καναλιού θεωρείται το εύρος ζώνης για το οποίο το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο (ομοιόμορφη απόσβεση). Με άλλα λόγια, είναι το συχνοτικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ 2 ζωνών συχνοτήτων, έτσι ώστε τα σήματα που μεταδίδονται σε αυτές να αντιμετωπίζουν συγκρίσιμες αποσβέσεις.



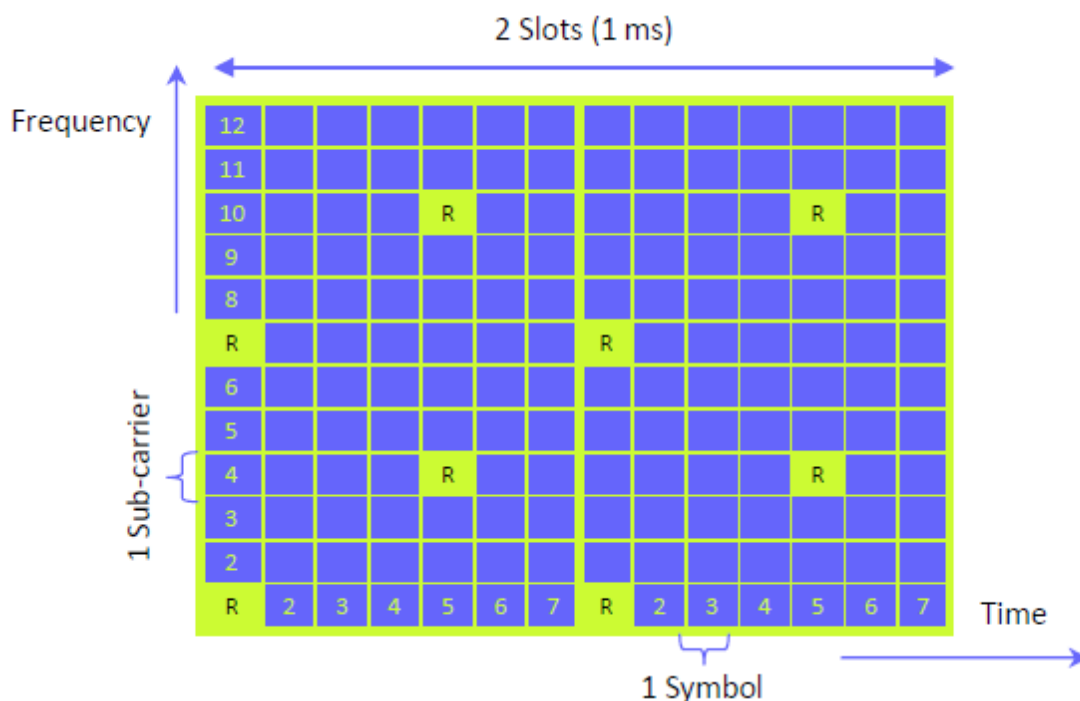
Εικόνα 10: Ορισμός των RB, RE για την περίπτωση της καθοδικής ροής και του κανονικού κυκλικού προθέματος [14].

Όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως, ισχύουν για την περίπτωση του καθοδικού ρεύματος. Στην περίπτωση του ανοδικού ρεύματος, η δομή είναι παρόμοια. Στην περίπτωση αυτή, το RE αποτελείται από ένα SC-FDMA μπλοκ δεδομένων που μεταδίδεται από μία υπο-φέρουσα. Το RB αποτελείται από 12 τέτοια RE's.

Για να γίνει η αποκωδικοποίηση του σήματος στο δέκτη, πρέπει να προηγηθεί η εκτίμηση των παραμέτρων του ασύρματου καναλιού (channel estimation). Η εκτίμηση γίνεται με τη βοήθεια συμβόλων ήδη γνωστών στον δέκτη που ονομάζονται σύμβολα αναφοράς (reference symbols) και μεταδίδονται από τον πομπό μέσω του ασύρματου καναλιού. Ο δέκτης αποκωδικοποιεί τα σύμβολα αυτά και – μιας και γνωρίζει για ποια πρόκειται – μπορεί να υπολογίσει την απόσβεση/παραμόρφωση που εισήγαγε το ασύρματο κανάλι και να χρησιμοποιήσει την εκτίμηση αυτή για την αποκωδικοποίηση των υπόλοιπων συμβόλων. Μιας και το ασύρματο κανάλι μεταβάλλεται γρήγορα, είναι απαραίτητη η περιοδική μετάδοση τέτοιων συμβόλων και η περιοδική εκτίμηση του καναλιού από πλευράς του δέκτη.

Στην περίπτωση της καθοδικής ροής, τα σύμβολα αναφοράς τοποθετούνται μεταξύ του πρώτου και του τρίτου από το τέλος OFDM συμβόλου κάθε σχισμής. Στο πεδίο της συχνότητας, υπάρχει μια απόσταση 6 υπο-φερουσών μεταξύ των συμβόλων αναφοράς (πρώτο με πρώτο και δεύτερο με δεύτερο) και μια απόσταση (βήμα) 3 υπο-φερουσών μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου συμβόλου αναφοράς. Προκύπτει, λοιπόν, η δομή του RB που φαίνεται στην Εικόνα 11.

Οι παράμετροι του φυσικού επιπέδου του LTE που ισχύουν για την καθοδική ροή φαίνονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 11: Εισαγωγή των συμβόλων αναφοράς στο RB για την περίπτωση κανονικού κυκλικού προθέματος [14].

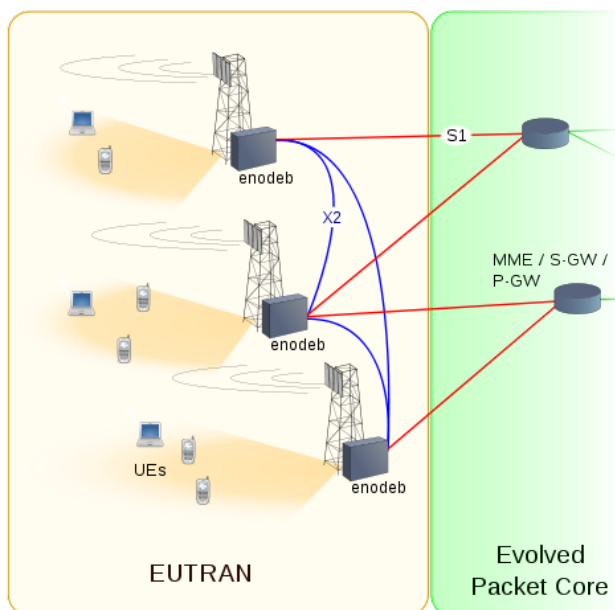
Πίνακας 2: Παράμετροι της καθοδικής ροής του φυσικού επιπέδου του LTE [14].

Channel Bandwidth (MHz)	1.25	2.5	5	10	15	20
Frame Duration (ms)	10					
Subframe Duration (ms)	1					
Sub-carrier Spacing (kHz)	15					
Sampling Frequency (MHz)	1.92	3.84	7.68	15.36	23.04	30.72
FFT Size	128	256	512	1024	1536	2048
Occupied Sub-carriers (inc. DC sub-carrier)	76	151	301	601	901	1201
Guard Sub-carriers	52	105	211	423	635	847
Number of Resource Blocks	6	12	25	50	75	100
Occupied Channel Bandwidth (MHz)	1.140	2.265	4.515	9.015	13.515	18.015
DL Bandwidth Efficiency	77.1%	90%	90%	90%	90%	90%
OFDM Symbols/Subframe	7/6 (short/long CP)					
CP Length (Short CP) (μ s)	5.2 (first symbol) / 4.69 (six following symbols)					
CP Length (Long CP) (μ s)	16.67					

2.2 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλου

Εξετάζοντας την αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου, ουσιαστικά εξετάζουμε τη δομή ενός συστήματος LTE και των επιπέδων που το απαρτίζουν. Στη βάση της αρχιτεκτονικής (χαμηλότερο επίπεδο) βρίσκεται το φυσικό επίπεδο, το οποίο και εξετάσαμε στην προηγούμενη Ενότητα.

Γενικά, το πρωτόκολλο του LTE βασίζεται στη δομή του EPS⁹ (Evolved Packet System) και ακολουθεί τη βασική δομή του, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13. Αυτή χωρίζεται σε 2 μέρη: το πρώτο αφορά στην πρόσβαση του χρήστη στο δίκτυο κορμού του LTE, ονομάζεται δίκτυο πρόσβασης (access network) και – στα πλαίσια του LTE – ονομάζεται E-UTRAN, ονομασία που αναλύεται παρακάτω. Το δεύτερο μέρος είναι ο πυρήνας του LTE (core network). Με βάση αυτό τον διαχωρισμό σε επίπεδο δικτύων, προκύπτει και ο διαχωρισμός σε επίπεδο πρωτοκόλλων. Έτσι, το πρωτόκολλο του LTE χωρίζεται σε 2 επιμέρους πρωτόκολλα¹⁰: στο πρωτόκολλο σε επίπεδο χρήστη (user plane protocol stack) και στο πρωτόκολλο σε επίπεδο ελέγχου (control plane protocol stack).



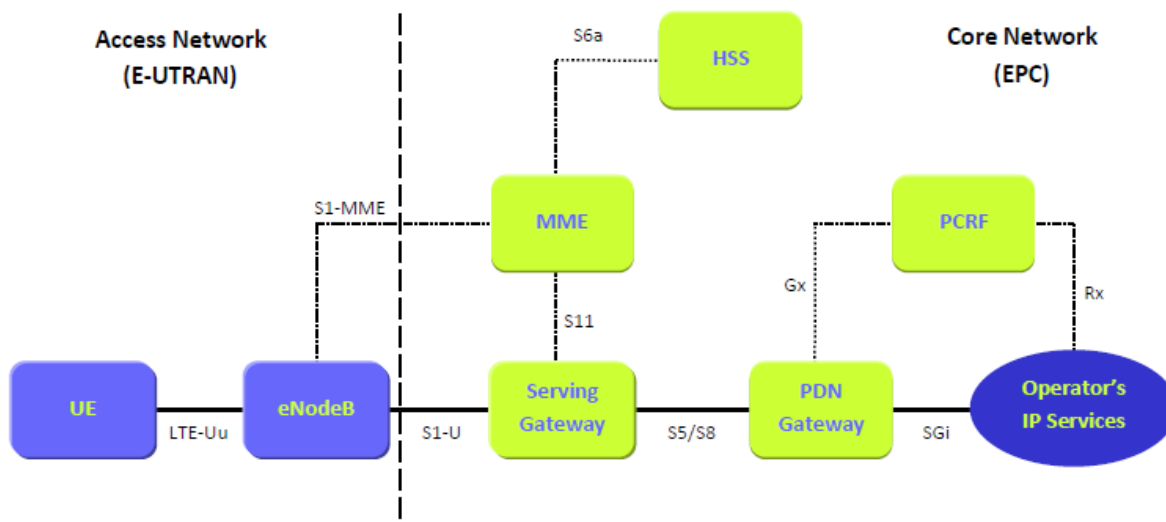
Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική του δικτύου του LTE [29].

Στην Εικόνα 12 φαίνεται η αρχιτεκτονική που εικονίζεται και στην Εικόνα 13, αλλά σε πιο μακροσκοπικό επίπεδο, που μας βοηθάει να εξοικειωθούμε με τη δομή του LTE χρησιμοποιώντας ήδη γνωστές έννοιες. Στο δεξί μέρος της Εικόνας βρίσκεται ο πυρήνας του LTE, το δίκτυο κορμού (backbone network). Το δίκτυο αυτό ονομάζεται EPC (Evolved Packet Core), όντας ο πυρήνας του EPS. Στο αριστερό μέρος βρίσκεται το γνωστό δίκτυο πρόσβασης της κινητής τηλεφωνίας, με τις τερματικές συσκευές (User

⁹ Οι ονομασίες των κόμβων της Εικόνας 12 δεν θα μας απασχολήσουν περαιτέρω, η Εικόνα παρατίθεται απλά για να αποκτήσουμε μια γενική ιδέα της δομής του πρωτοκόλλου. Στη συνέχεια αναλύονται όσα είναι χρήσιμα για την κατανόηση του LTE και σύμφωνα με τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

¹⁰ Στην πραγματικότητα, πρόκειται για ένα σύνολο πρωτοκόλλων, καθένα από τα οποία βρίσκεται σε διαφορετικό επίπεδο, για αυτό και χαρακτηρίζεται ως σωρός πρωτοκόλλων (protocol stack).

Interface – UE¹¹) και τους σταθμούς βάσης, που δηλώνονται με το όνομα eNodeB¹² (evolved nodeB). Το δίκτυο του αριστερού μέρους αποκαλείται E-UTRAN (Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network) είναι αυτό στο οποίο υλοποιούνται οι τεχνικές διαμόρφωσης, μετάδοσης και πρόσβασης που είδαμε στην προηγούμενη Ενότητα.



Εικόνα 13: Δομή του EPS [13].

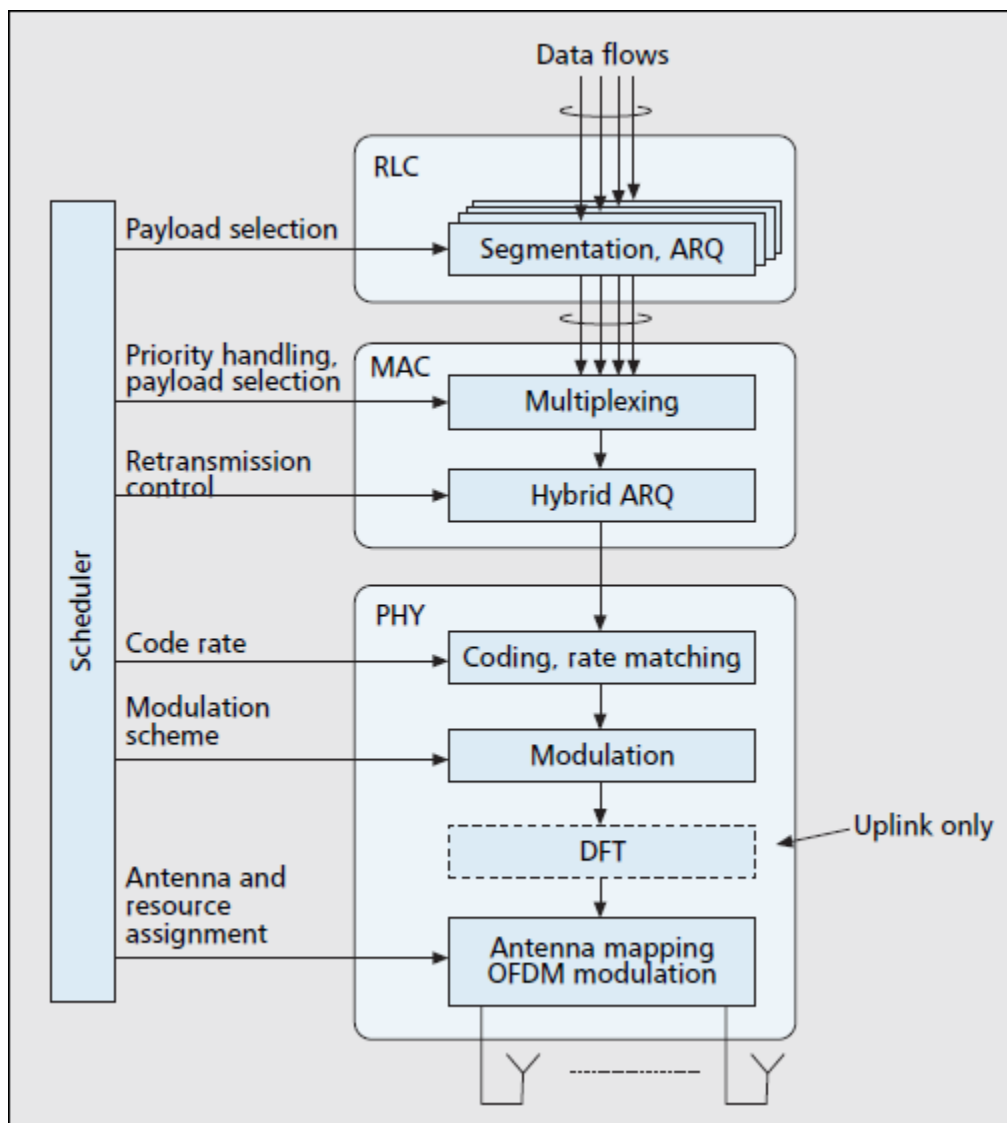
Σε επίπεδο χρήστη, το πρωτόκολλο αποτελείται από τα ακόλουθα επίπεδα (από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο) [13]:

- Επίπεδο πρωτοκόλλου σύγκλισης πακέτων δεδομένων (Packet Data Convergence Protocol Layer – PDCP).
- Επίπεδο Ελέγχου Ασύρματου Διαύλου (Radio Link Control Layer – RLC).
- Επίπεδο Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control Layer – MAC).

Η δομή του επιπέδου χρήστη (συμπεριλαμβανομένου και του χαμηλότερου επιπέδου, που είναι το επίπεδο διαύλου) φαίνεται στην Εικόνα 13. Στην Εικόνα αυτή δεν συμπεριλαμβάνεται το επίπεδο του PDCP, το οποίο και θα μπορούσε να προστεθεί στο πάνω μέρος, στο σημείο εισόδου των δεδομένων.

¹¹ Ως UE ορίζεται κάθε τερματική συσκευή χρήστη που μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο. Στα πλαίσια της παρούσας Ενότητας, οι όροι “UE” και «χρήστης» χρησιμοποιούνται ισοδύναμα.

¹² Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, προτιμήθηκε η χρήση του όρου «σταθμός βάσης» αντί για τον “eNodeB”, μιας και ο πρώτος είναι πιο διαδεδομένος και πιο γενικός (βρίσκει εφαρμογή και στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προηγούμενων γενεών).



Εικόνα 14: Απλοποιημένη δομή του επιπέδου χρήστη του LTE [3].

Το PDCP επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

1. Συμπίεση και αποσυμπίεση της επικεφαλίδας όλων των πακέτων που εξέρχονται από το επίπεδο χρήστη και εισέρχονται σε αυτό, αντίστοιχα. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στο πρωτόκολλο εύρωστης συμπίεσης επικεφαλίδας (Robust Header Compression – ROHC), το οποίο και αποθηκεύει τα στατικά (αμετάβλητα) μέρη της επικεφαλίδας και ενημερώνει την αποθηκευμένη πληροφορία μόνο σε περίπτωση αλλαγής της. Αυτό το επίπεδο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις υπηρεσίες φωνής, όπου η επικεφαλίδα αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του όλου πακέτου και η συμπίεσή της εξοικονομεί τους πόρους του καναλιού
2. Διαχείριση μεταγωγής (Handover): αναδιατάσσει και τοποθετεί στη σειρά τα πακέτα (PDU's¹³) κατά τη μεταγωγή από την περιοχή που καλύπτει μία κυψέλη σε περιοχή που καλύπτει μία γειτονική της. Υπάρχουν 2 τύποι μεταγωγής, η απρόσκοπτη μεταγωγή (seamless handover) και η αναπωλειακή μεταγωγή (lossless handover).

¹³ Το PDU ορίζεται ως μια μονάδα δεδομένων που ορίζεται από ένα πρωτόκολλο συγκεκριμένου Επιπέδου και που περιλαμβάνει όχι μόνο ωφέλιμα δεδομένα, αλλά και δεδομένα ελέγχου [17].

- a. Η απρόσκοπτη μεταγωγή εφαρμόζεται για τα δεδομένα του επιπέδου ελέγχου καθώς και για τα δεδομένα του τρόπου μετάδοσης χωρίς αναγνώριση λήψης του RLC (αναλύονται στη συνέχεια). Σε αυτούς τους τύπους δεδομένων μπορεί να γίνει ανεκτή απώλεια δεδομένων, αλλά όχι καθυστερήσεις. Αυτού του τύπου η μεταγωγή είναι απλή στην υλοποίηση και δεν περιλαμβάνει επίπεδο ασφαλείας.
 - b. Η αναπωλαιική μεταγωγή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου μπορεί να γίνει ανεκτή κάποια καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων και δίνεται προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση των απωλειών στην μετάδοση καθώς και στην εξοικονόμηση πόρων του συστήματος. Χρησιμοποιείται για τη μεταγωγή των δεδομένων του τρόπου μετάδοσης με αναγνώριση λήψης του RLC.
3. Κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση για τα επίπεδα χρήστη και ελέγχου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιεί έλεγχο της αυθεντικότητας των δεδομένων ελέγχου.

Το επίπεδο ελέγχου του ασύρματου διαύλου μορφοποιεί τα PDU's του PDCP (κατάτμηση, ένωση) έτσι ώστε αυτά να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που τίθενται από το MAC επίπεδο (οργάνωση σε Transport Blocks – TB). Το μέγεθος των TB εξαρτάται από τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και σε ισχύ, την απόσταση μετάδοσης, την τεχνική διαμόρφωσης και το είδος της εφαρμογής που αφορούν τα δεδομένα.

Υπάρχουν 3 τρόποι (modes) μετάδοσης δεδομένων από το RLC: ο διαφανής τρόπος (Transparent Mode – TM), ο τρόπος μετάδοσης χωρίς αναγνώριση λήψης (Unacknowledged Mode – UM) και ο τρόπος μετάδοσης με αναγνώριση λήψης (Acknowledged mode – AM).

- Σύμφωνα με τον TM, τα SDU's¹⁴ του RLC αντιστοιχίζονται στα PDU's και αντίστροφα χωρίς να παρεμβάλλεται κάποια διαδικασία μετασχηματισμού. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται σε συγκεκριμένες κατηγορίες σημάτων ελέγχου.
- Σύμφωνα με τον UM, πραγματοποιείται κατάτμηση και ένωση των SDU's όπου χρειάζεται και ανακατάταξη και ανίχνευση διπλών PDU's. Δεν υλοποιεί κάποιον αλγόριθμο ανίχνευσης λαθών. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων όπου η σημαντικότερη παράμετρος είναι η ταχύτητα της μετάδοσης, όπως στην περίπτωση του VoIP.
- Ο AM χρησιμοποιείται για την μετάδοση δεδομένων που είναι ευαίσθητα στα σφάλματα, αλλά που μπορούν να μεταδοθούν με μία αποδεκτή καθυστέρηση. Τέτοια δεδομένα αφορούν εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου, όπως είναι η περιήγηση στο διαδίκτυο. Επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων και προς τις 2 κατευθύνσεις, συνεπώς ο RLC μπορεί και να μεταδώσει αλλά και να λάβει δεδομένα. Υλοποιεί τον ARQ¹⁵ (Automatic Repeat reQuest) για την ανίχνευση πακέτων με σφάλματα μετάδοσης και την διόρθωση αυτών μέσω της επαναποστολής των πακέτων. Επιπλέον, πραγματοποιεί αναμετάδοση των RLC PDU's, ανακατάτμηση των αναμεταδιδόμενων PDU's καθώς και άλλες λειτουργίες.

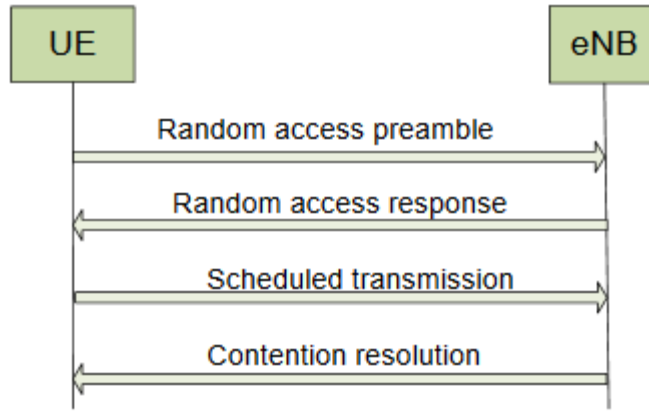
Το επίπεδο MAC επιτελεί κάποιες σημαντικές λειτουργίες. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

¹⁴ Το SDU (Service Data Unit) είναι μια μονάδα δεδομένων που μεταδίδεται από το πρωτόκολλο ανώτερου επιπέδου σε αυτό του χαμηλότερου επιπέδου, χωρίς να έχει ενσωματωθεί (μετατραπεί) ακόμα στα PDU's του τελευταίου [18].

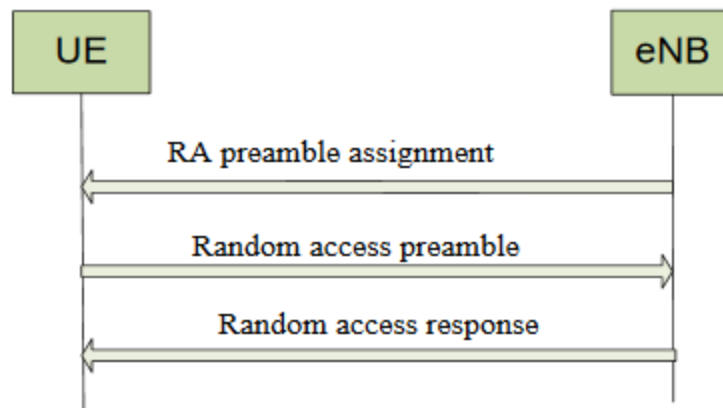
¹⁵ Ο ARQ είναι ένας μηχανισμός ελέγχου σφαλμάτων κατά τη μετάδοση ο οποίος χρησιμοποιεί αναγνωριστικά μηνύματα μετάδοσης και λήψης (acknowledgements – ACKs) καθώς και μηχανισμούς αναμετάδοσης λόγω υπέρβασης συγκεκριμένων χρονικών ορίων (timeout) [19]. Η χρήση των ACKs είναι που έδωσε στον AM το όνομά του.

- Η υλοποίηση του Προγραμματιστή ο οποίος αναφέρθηκε και στην προηγούμενη Ενότητα και φαίνεται στην Εικόνα 13. Ρόλος του προγραμματιστή είναι η ανάθεση των πόρων του συστήματος στους χρήστες του. Πιο συγκεκριμένα, ο Προγραμματιστής αναθέτει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του φυσικού διαύλου στους UE. Ο Προγραμματιστής είναι μία ξεχωριστή διάταξη και υπάρχουν διάφοροι κατασκευαστές που πουλούν τέτοιες διατάξεις, που σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου Προγραμματιστή μπορούν να διαφοροποιήσουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του LTE συστήματος.
- Ο έλεγχος της διαδικασίας τυχαίας προσπέλασης (random access procedure). Πρόκειται για έναν από τους πιο σημαντικούς αλγορίθμους του LTE, μιας και χρησιμοποιείται από τους UE's για την έναρξη και την αρχικοποίηση μια μεταφοράς δεδομένων (ανοδική ροή δεδομένων) [21]. Ο UE λαμβάνει επίσης την πληροφορία για τον χρόνο που θα διαρκέσει η μετάδοση. Η «τυχαία προσπέλαση» αναφέρεται στο ότι κάθε χρήστης που επιχειρεί να μεταδώσει δεδομένα επιλέγει μια από τις ακολουθίες προθέματος τυχαίας προσπέλασης (random access preambles) που υπάρχουν διαθέσιμες στην κυψέλη στην οποία πραγματοποιείται η μετάδοση και την μεταδίδουν στον σταθμό βάσης. Οι ακολουθίες αυτές είναι ορθογώνιες μεταξύ τους, που σημαίνει ότι μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα από διαφορετικούς χρήστες και να ληφθούν όλες από τον σταθμό βάσης. Το πλήθος των διαθέσιμων ακολουθιών έχει να κάνει με το πλήθος των χρονικών στιγμών διαθέσιμων για μετάδοση, που ταυτίζεται με το πλήθος των χρηστών που μπορούν να μεταδώσουν. Ο κάθε UE επιλέγει την ακολουθία αυτή με τυχαίο τρόπο, που σημαίνει πως υπάρχει περίπτωση 2 χρήστες που θέλουν να μεταδώσουν την ίδια στιγμή να έχουν επιλέξει την ίδια ακολουθία. Σε αυτή την περίπτωση, ο σταθμός βάσης δε λαμβάνει τη μετάδοση της ακολουθίας από έναν από τους 2 χρήστες, μιας και οι ίδιες ακολουθίες δεν είναι ορθογώνιες μεταξύ τους και παρεμβάλλονται μεταξύ τους κατά τη μετάδοση. Ο σταθμός βάσης, με το που λάβει την αποστολή του προθέματος, προβαίνει στην ανάθεση των πόρων στους χρήστες που θέλουν να μεταδώσουν και εκπέμπει το σχετικό σήμα (random access response). Οι χρήστες που θέλουν να μεταδώσουν λαμβάνουν το εκπεμπόμενο σήμα και, αν ένας χρήστης δεν βρει σε αυτό ανάθεση πόρων για να μεταδώσει, τότε πρέπει να επιλέξει εκ νέου μια ακολουθία και να την μεταδώσει. Ο αλγόριθμος τυχαίας προσπέλασης που βασίζεται στην παραπάνω διαδικασία ονομάζεται contention based, διότι επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μεταδίδουν στο ίδιο φυσικό μέσο την ίδια χρονική στιγμή και χωρίς προηγούμενη συνεννόηση ή συντονισμό και φαίνεται στην Εικόνα 14.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 14, υπάρχει ένα επιπλέον βήμα στη διαδικασία αυτή, που ονομάζεται επίλυση σύγκρουσης (contention resolution) κατά το οποίο ο σταθμός βάσης ανιχνεύει τη σύγκρουση και αναθέτει σε κάθε χρήστη μοναδικά ταυτοποιήσιμους πόρους. Η εναλλακτική του αλγορίθμου αυτού είναι να αναθέτει ο σταθμός βάσης ένα από τα διαθέσιμα προθέματα σε κάθε UE και να τον ενημερώνει για την ανάθεση αυτή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15.

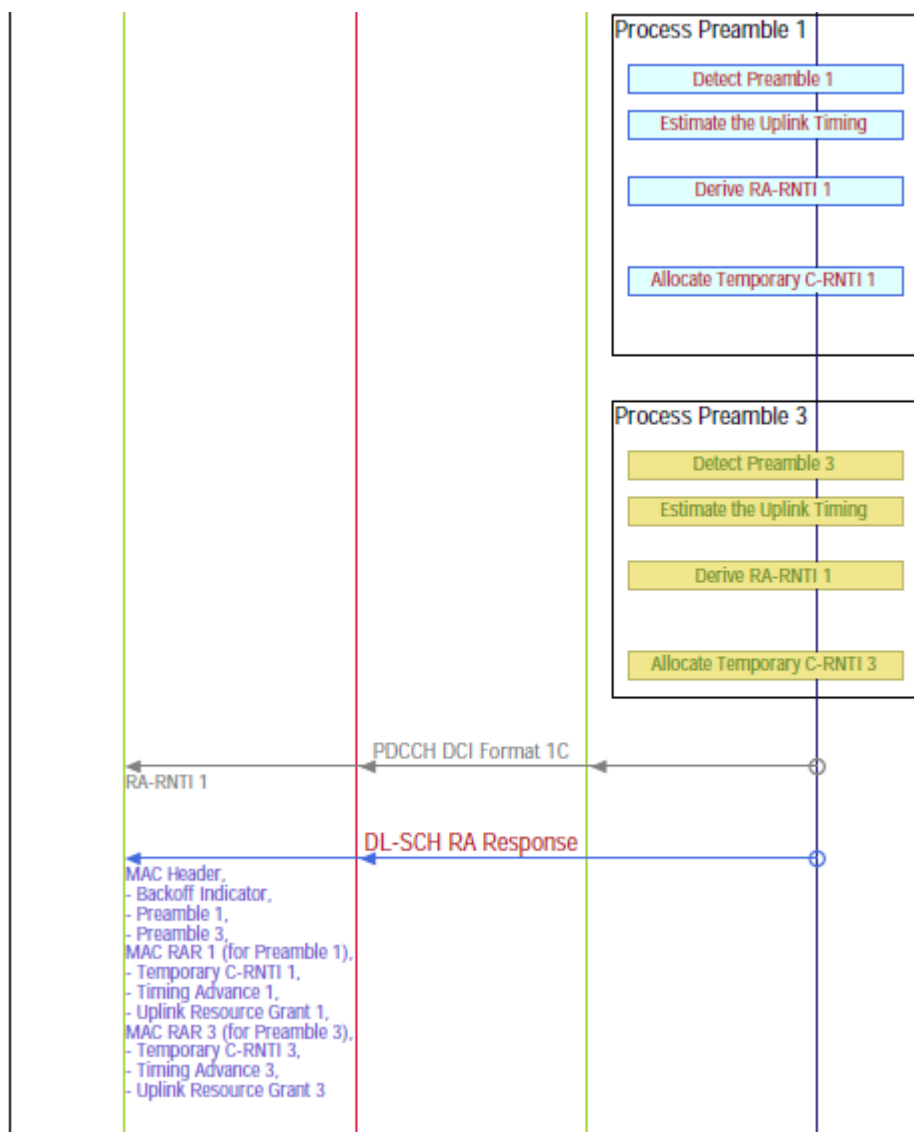


Εικόνα 15: Contention based διαδικασία τυχαίας προσπέλασης [22].



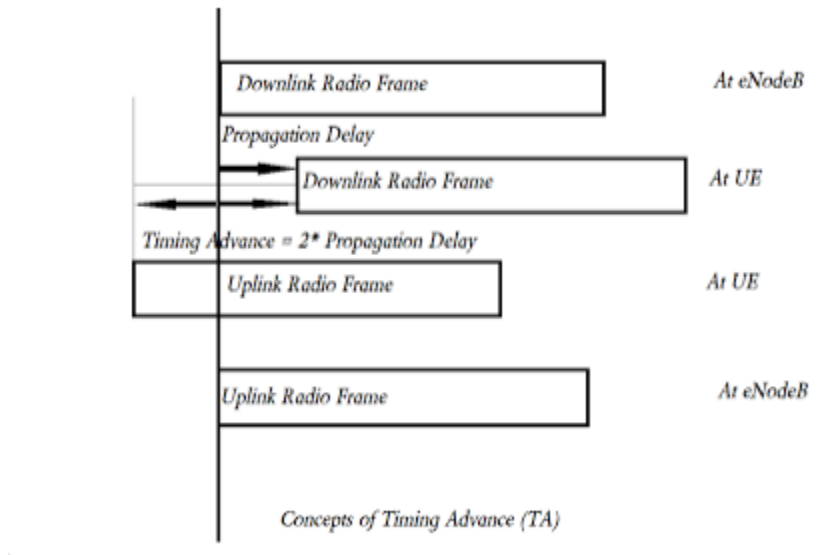
Εικόνα 16: non Contention based διαδικασία τυχαίας προσπέλασης [22].

- Η ευθυγράμμιση των ροών των δεδομένων που φτάνουν στον σταθμό βάσης. Η μετάδοση ανοδικής ροής στο LTE δεν είναι συγχρονισμένη, συνεπώς είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός συγχρονισμού των ανοδικών ροών, έτσι ώστε να λαμβάνονται συγχρονισμένες από τον σταθμό βάσης. Σε αντίθετη περίπτωση, θα υπάρχει αλληλεπικάλυψη των ανοδικών ροών. Ο συγχρονισμός γίνεται με την εισαγωγή ενός χρόνου που ονομάζεται εκ των προτέρων χρονισμός (timing advance). Πιο συγκεκριμένα, υποθέτουμε πως ο σταθμός βάσης μεταδίδει μια καδική ροή σε χρόνο T προς έναν συγκεκριμένο UE. Επειδή η μετάδοση που αφορά κάθε UE εξυπηρετείται από συγκεκριμένη χρονική σχισμή, θα πρέπει η μετάδοση της ανοδικής ροής που θα γίνει από τον χρήστη να φτάσει στον σταθμό βάσης την χρονική στιγμή T της επόμενης περιόδου (του επόμενου κύκλου μετάδοσης). Λόγω της καθυστέρησης μετάδοσης T_s , η καθοδική ροή που μεταδίδει ο σταθμός βάσης φτάνει στον UE τη χρονική στιγμή $T+T_s$. Αν ο δέκτης θεωρήσει τη χρονική στιγμή $T+T_s$ ως βάση του χρονισμού, σημαίνει πως θα μεταδώσει την ανοδική ροή τη στιγμή $T+T_s$ του επόμενου κύκλου, κάτι που θα έχει ως αποτέλεσμα αυτή να φτάσει στον σταθμό βάσης τη χρονική στιγμή $T+2*T_s$. Για να φτάσει η ανοδική ροή την επιθυμητή χρονική στιγμή, πρέπει να μεταδοθεί από τον UE τη χρονική στιγμή $T-T_s$. Συνεπώς, πρέπει να εισαχθεί στην πλευρά του UE ένας εκ των προτέρων χρονισμός ύψους $-2T_s$: αντί για τη χρονική στιγμή $T+T_s$, η ροή μεταδίδεται τη χρονική στιγμή $T-T_s$, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 17.

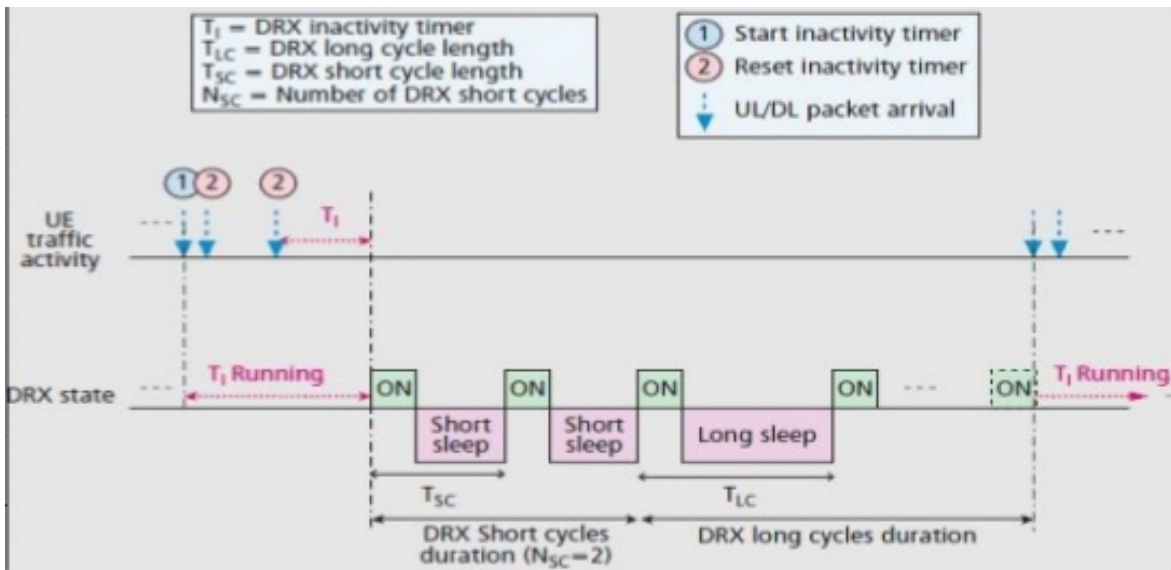


Εικόνα 17: Διαδικασία επεξεργασίας του προθέματος από τον σταθμό βάσης και εκπομπή της απάντησης [21].

- Η υλοποίηση της ασυνεχούς λήψης (Discontinuous Reception – DRX), η οποία οδηγεί στην εξοικονόμηση ενέργειας στην πλευρά του UE. Με την ασυνεχή λήψη, ο δέκτης παραμένει ανενεργός (δεν σαρώνει το κανάλι για να εντοπίσει σήματα που μεταδίδονται από τον σταθμό βάσης) τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες δεν είναι προγραμματισμένο/συμφωνημένο με τον σταθμό βάσης να λάβει σήματα από αυτόν. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην Εικόνα 18 και έχει το μειονέκτημα ότι εισάγει καθυστέρηση στη λήψη.



Εικόνα 18: Η λογική του εκ των προτέρων χρονισμού [23].

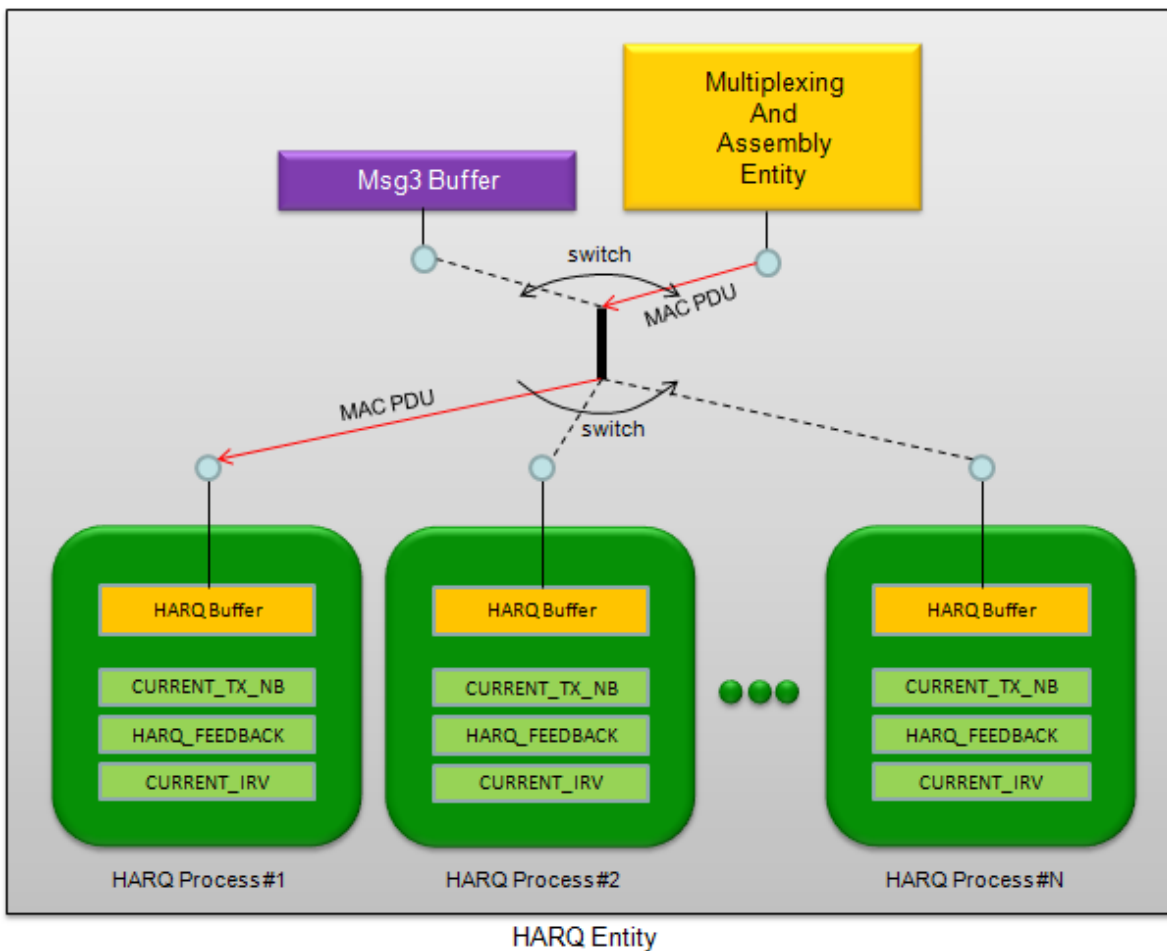


Εικόνα 19: Λογική του DRX [24].

- Υλοποιεί τη λειτουργικότητα του HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest). Ο HARQ είναι ο βασικός μηχανισμός ελέγχου και διόρθωσης λαθών του LTE (το ARQ που υλοποιείται στο RLC επίπεδο είναι ένας δευτερεύων μηχανισμός, που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση λαθών που δεν διορθώθηκαν από το HARQ). Υλοποιείται στο φυσικό επίπεδο και ελέγχεται από το MAC επίπεδο. Σε αντίθεση με το ARQ, που – σε περίπτωση λήψης πακέτου με σφάλματα – ζητά επαναποστολή του πακέτου απορρίπτοντας το αντίγραφο που έχει ήδη στη διάθεσή του, το HARQ – σε περίπτωση λήψης πακέτου με σφάλματα – αποθηκεύει το αντίγραφο που έχει σε μία μνήμη (buffer) και ζητά επαναποστολή των δεδομένων. Μόλις λάβει το καινούριο αντίγραφο, το συνδυάζει με αυτό που έχει αποθηκεύσει, για αποτελεσματικότερη ανάκτηση των δεδομένων. Το HARQ ενσωματώνει (και βασίζεται σε) τις SAW (Stop And Wait) διεργασίες [26]. Ο αριθμός των διεργασιών που ενσωματώνονται εξαρτάται από το αν

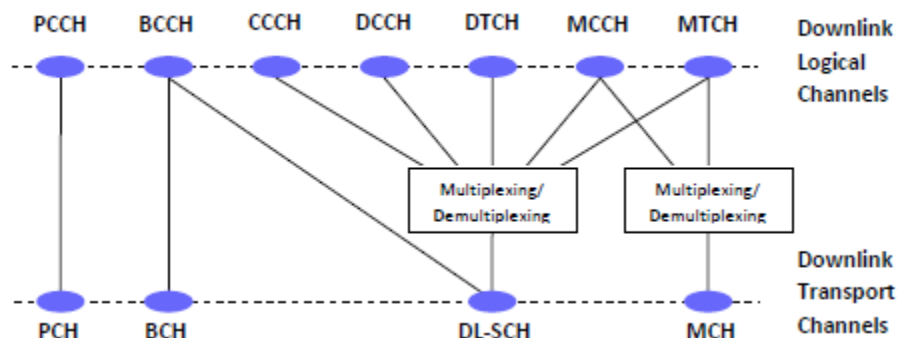
χρησιμοποιείται FDD ή TDD τεχνολογία μετάδοσης και αν πρόκειται για την ανοδική ή την καθοδική ροή (το HARQ υλοποιείται τόσο στον σταθμό βάσης όσο και στους UE's). Για παράδειγμα, στην καθοδική ροή του LTE FDD ενσωματώνονται 8 τέτοιες διεργασίες.

Οι διεργασίες SAW λειτουργούν ως εξής [26]: μόλις ένα πακέτο σταλεί από μια διεργασία, περιμένει να λάβει σήμα ACK ή NACK. Μέχρι να το λάβει, βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής και δεν επεξεργάζεται άλλα πακέτα. Αυτός είναι και ο λόγος που υλοποιούνται πολλαπλές διεργασίες: όσο η μία διεργασία βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, οι υπόλοιπες 7 μπορούν να μεταδώσουν από 1 πακέτο η καθεμιά. Ο λόγος που υπάρχει αυτή η κατάσταση αναμονής είναι ώστε, σε περίπτωση ενός σφάλματος, να μην έχουν μεταδοθεί πολλά πακέτα μέχρι αυτό ν' ανιχνευτεί, συνεπώς αποφεύγονται οι πολλαπλές επαναμεταδόσεις και αξιοποιούνται καλύτερα οι πόροι του φυσικού μέσου. Κάθε διεργασία SAW μεταδίδει στα πλαίσια μιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής του χρονικού πλαισίου του LTE.

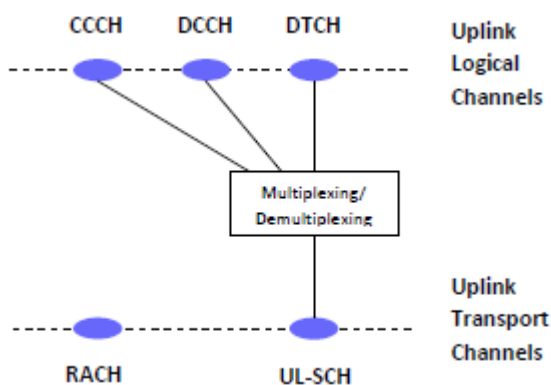


Εικόνα 20: Δομή του HARQ [25].

- Αντιστοιχίζει τα δεδομένα που λήφθηκαν από τα λογικά κανάλια (logical channels) του RLC σε κανάλια μετάδοσης δεδομένων του φυσικού επιπέδου (transport channels). Η αντιστοίχιση αυτή γίνεται με τη μέθοδο της πολύπλεξης/αποπολύπλεξης και φαίνεται στις Εικόνες 20 (καθοδική ροή) και 21 (ανοδική ροή). Επιπλέον, στον Πίνακα 3 καταγράφονται όλα τα κανάλια – λογικά και μετάδοσης δεδομένων – του LTE.



Εικόνα 21: Πολύπλεξη λογικών καναλιών καθοδικής ροής [13].



Εικόνα 22: Πολύπλεξη λογικών καναλιών ανοδικής ροής [13].

Πίνακας 3: Τα κανάλια του LTE [13].

Συντομογραφία	Ονομασία	Περιγραφή
Λογικά κανάλια ελέγχου		
BCCH	Κανάλι ελέγχου ευρείας εκπομπής (Broadcast Control CHannel)	Κανάλι καθοδικής ροής για την ευρεία εκπομπή πληροφοριών συστήματος
PCCH	Κανάλι ελέγχου σελιδοποίησης (Paging Control CHannel)	Κανάλι καθοδικής ροής για να ειδοποιείται ο UE για την ύπαρξη εισερχόμενης κλήσης ή για αλλαγές στις ρυθμίσεις του συστήματος
CCCH	Κοινό κανάλι ελέγχου (Common Control CHannel)	Κανάλι καθοδικής και ανοδικής ροής, χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφοριών ελέγχου κατά την εγκαθίδρυση σύνδεσης, όταν δεν έχει ήδη εγκαθιδρυθεί μια γνωστή εκ τν προτέρων σχέση μεταξύ του UE και του σταθμού βάσης
MCCH	Κανάλι ελέγχου πολλαπλής εκπομπής (Multicast Control CHannel)	Κανάλι καθοδικής ροής για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου MBMS ¹⁶ υπηρεσιών

DCCH	Κανάλι ελέγχου ειδικού σκοπού (Dedicated Control CHannel)	Κανάλι καθοδικής και ανοδικής ροής για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου ειδικού σκοπού από/προς συγκεκριμένο UE
Λογικά κανάλια μετάδοσης δεδομένων		
DTCH	Κανάλι μετάδοσης δεδομένου ειδικού σκοπού (Dedicated Traffic CHannel)	Κανάλι καθοδικής και ανοδικής ροής για τη μετάδοση δεδομένων ειδικού σκοπού
MTCH	Κανάλι μετάδοσης δεδομένων πολλαπλής εκπομπής (Multicast Traffic CHannel)	Κανάλι καθοδικής ροής για τη μετάδοση δεδομένων των MBMS υπηρεσιών
Κανάλια μετάδοσης δεδομένων καθοδικής ροής		
BCH	Κανάλι ευρείας εκπομπής (Broadcast CHannel)	Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση μέρους των πληροφοριών συστήματος που είναι απαραίτητες για το DL-SCH
DL-SCH	Κοινόχρηστο κανάλι καθοδικής ροής (DownLink – Shared CHannel)	Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων καθώς και των μηνυμάτων ελέγχου και των πληροφοριών συστήματος που δεν μεταδίδονται μέσω του BCH
PCH	Κανάλι σελιδοποίησης (Paging CHannel)	Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφοριών σελιδοποίησης
MCH	Κανάλι πολλαπλής εκπομπής (Multicast CHannel)	Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφορίας ή μηνυμάτων ελέγχου σε περίπτωση που απαιτείται συνδυασμός MBSFN ¹⁷
Κανάλια μετάδοσης δεδομένων ανοδικής ροής		
UL-SCH	Κοινόχρηστο κανάλι ανοδικής ροής (UpLink – Shared CHannel)	Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων καθώς και των μηνυμάτων ελέγχου
RACH	Κανάλι τυχαίας προσπέλασης (Random Access CHannel)	Χρησιμοποιείται στην περίπτωση που στον UE που θέλει να μεταδώσει δεν έχουν ανατεθεί πόροι του συστήματος

Περνώντας στο επίπεδο ελέγχου – που είναι αυτό που ελέγχει τη λειτουργικότητα του επιπέδου χρήστη – η λειτουργικότητά του εξαρτάται από την κατάσταση (state) στην οποία βρίσκεται ο UE. Υπάρχουν 2 πιθανές καταστάσεις: η αδράνεια και η σύνδεση.

Στην κατάσταση αδράνειας (idle mode), ο UE κατασκηνώνει (camps) σε μία συγκεκριμένη κυψέλη έπειτα από μια διαδικασία επιλογής ή επανεπιλογής κυψέλης, κατά την οποία καθορίστηκαν παράμετροι όπως η ποιότητα του ασύρματου διαύλου, η κατάσταση της κυψέλης και οι τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης. Όσο ο UE βρίσκεται στην κατάσταση αδράνειας, ελέγχει ένα κανάλι σελιδοποίησης μέσω του οποίου

¹⁶ Οι υπηρεσίες ευρείας εκπομπής και πολλαπλής εκπομπής πολυμέσων (Multimedia Broadcast Multicast Service – MBMS) είναι ένα σύνολο προδιαγραφών που διέπουν την μετάδοση ευρείας εκπομπής και πολλαπλής εκπομπής των πολυμέσων [27].

¹⁷ Το κανάλι MBSFN είναι ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι του LTE που χρησιμοποιείται για την αποδοτική μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων mobile-tv [28]. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στην Ενότητα 2.3.

λαμβάνει τις πληροφορίες συστήματος και ανιχνεύει εισερχόμενες κλήσεις. Σε αυτή την κατάσταση, το επίπεδο ελέγχου συνίσταται στην πραγματοποίηση των διαδικασιών επιλογής και επανεπιλογής κυψέλης.

Στην κατάσταση σύνδεσης (connected mode), ο UE παρέχει στο E-UTRAN δίκτυο πληροφορίες για την ποιότητα του καναλιού καθοδικής ροής, καθώς και πληροφορίες για την κατάσταση των γειτονικών κυψελών, με σκοπό να βοηθήσει το E-UTRAN να επιλέξει την καταλληλότερη κυψέλη για τη μετάδοση προς τον UE. Αυτές οι διεργασίες υλοποιούνται μέσω του πρωτοκόλλου ελέγχου πόρων του ασύρματου καναλιού (Radio Resource Control – RRC). Αυτό είναι το πρωτόκολλο επιπέδου ελέγχου που τρέχει στην κατάσταση σύνδεσης και καλύπτει τις ακόλουθες λειτουργικές περιοχές:

- Εκπομπή (broadcasting) των πληροφοριών του συστήματος, οι οποίες είναι διαφορετικές για καθεμιά από τις προαναφερθείσες καταστάσεις. Οι πληροφορίες του συστήματος βρίσκονται στα μπλοκ πληροφοριών συστήματος (System Information Block – SIB). Καθένα από τα SIB περιέχει διαφορετικές πληροφορίες του συστήματος. Στο LTE ορίζονται 8 διαφορετικά SIB επιπλέον του κυρίως μπλοκ πληροφοριών (Master Information Block – MIB). Στο MIB περιλαμβάνονται οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παράμετροι του συστήματος, απαραίτητες για την πρόσβαση του UE στο δίκτυο.
- Έλεγχος RRC συνδέσεων, που περιλαμβάνει τις απαιτούμενες διαδικασίες για την εγκαθίδρυση, τροποποίηση και αποδέσμευση RRC συνδέσεων για σελιδοποίηση, ενεργοποίηση ασφαλείας κ.ά.
- Έλεγχος της κινητικότητας (mobility)
- Πραγματοποίηση μετρήσεων και μετάδοση αναφορών μετρήσεων και ρυθμίσεων, διαδικασία που είναι απαραίτητη για την υλοποίηση της κινητικότητας.

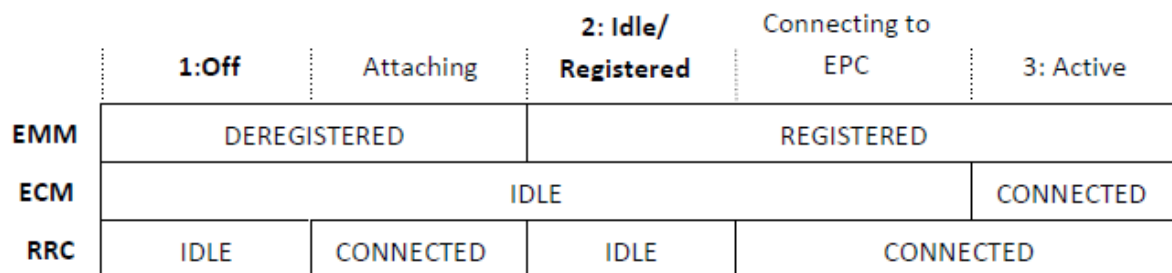
Καθώς εξετάζουμε το επίπεδο ελέγχου, είναι χρήσιμο να αναφερθούμε σε μια οντότητα που φαίνεται στις Εικόνες 12 και 13 και που ονομάζεται MME (Mobility Management Entity). Πρόκειται για τον βασικό κόμβο σηματοδότησης του LTE και είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση της σελιδοποίησης και τον έλεγχο ταυτότητας (authentication) των UE's [30].

Ο MME αποθηκεύει δεδομένα σχετικά με κάθε UE, τη θέση του στο δίκτυο και την κατάστασή του. Οι πληροφορίες αυτές μένουν αποθηκευμένες ώστε να μειωθεί το overhead που μεταδίδεται στο δίκτυο, αλλά και να εοικονομηθεί η μπαταρία του UE. Κατά τη μετάβαση του UE από την κατάσταση αναμονής σε αυτή της σύνδεσης και το αντίστροφο, υπάρχουν 2 μηχανισμοί του MME που πρέπει να αλλάξουν κατάσταση. Οι μηχανισμοί αυτοί δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους και είναι οι εξής [31]:

- Ο μηχανισμός διαχείρισης κινητικότητας του EPS (EPS Mobility Management – EMM), έχει 2 καταστάσεις, ανάλογα με το αν διαθέτει έγκυρες πληροφορίες για την τρέχουσα τοποθεσία του UE αλλά και για τη δρομολόγηση από/προς αυτόν. Σε περίπτωση που αυτές οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες, ο EMM βρίσκεται στην κατάσταση EMM-DEREGISTERED. Μόλις αποκτήσει τις απαιτούμενες πληροφορίες, μεταβαίνει στην κατάσταση EMM-REGISTERED.
- Ο μηχανισμός διαχείρισης σύνδεσης του EPS (EPS Connection Management – ECM) περιγράφει την κατάσταση συνδεσιμότητας (signaling connectivity) μεταξύ του UE και του δικτύου EPC. Ανάλογα με τη συνδεσιμότητα, παίρνει τις καταστάσεις ECM-IDLE ή ECM-CONNECTED.

Στην Εικόνα 23 φαίνονται οι μεταβάσεις που συμβαίνουν κατά τη μετάβαση ενός UE από την κατάσταση αναμονής στην κατάσταση συνδεσιμότητας. Μόλις ανιχνευτεί η προσπάθεια σύνδεσης του UE, το RRC αλλάζει κατάσταση και μεταβαίνει στην κατάσταση συνδεσιμότητας, ώστε να εκκινηθούν οι διαδικασίες αλλαγής κατάστασης του UE. Πρώτο βήμα είναι η καταχώριση του UE στο δίκτυο, με ανάκτηση των

πληροφοριών τοποθεσίας και δρομολόγησης. Μόλις αυτές οι πληροφορίες καταχωριστούν, ο EMM μεταβαίνει στην κατάσταση EMM-REGISTERED. Πλέον ο UE είναι καταχωρισμένος και μπορεί να επιχειρήσει να συνδεθεί στο EPC. Συνεπώς, ο ECM μεταβαίνει στην κατάσταση ECM-CONNECTED και ο UE είναι έτοιμος να μεταδώσει δεδομένα.



Εικόνα 23: Μετάβαση από την κατάσταση αναμονής στην κατάσταση συνδεσιμότητας [13].

2.3 LTE Release 9

Το LTE Release 9, που παγιώθηκε το 2009, αποτέλεσε την πρώτη βελτίωση του LTE έπειτα από την εισαγωγή του με το Release 8. Δεν επέφερε δραματικές αλλαγές, αλλά εισήγαγε επιπλέον λειτουργικότητες και επιμέρους αλλαγές σε ήδη υπάρχουσες λειτουργικότητες. Συνοπτικά, οι σημαντικότερες αλλαγές που επέφερε είναι οι εξής [33,34]:

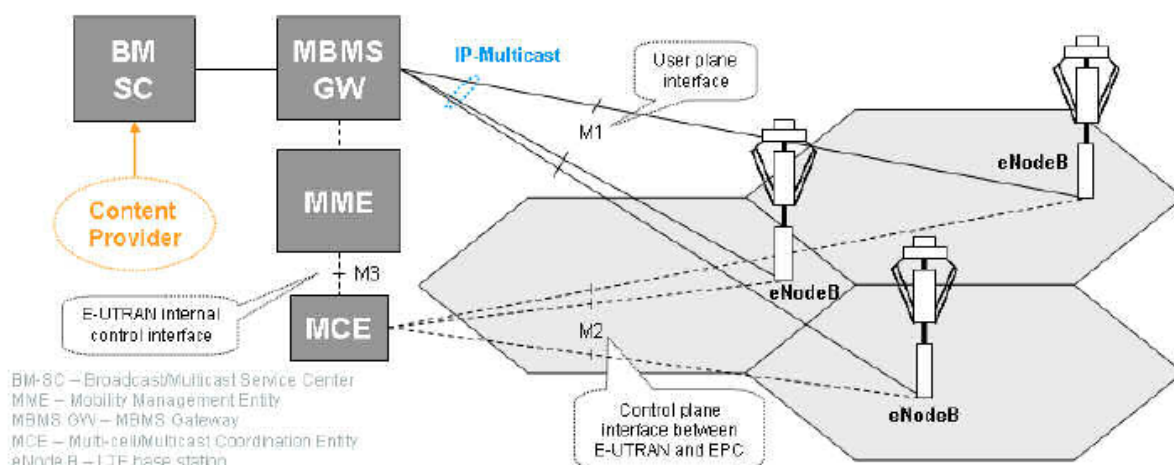
- Βελτίωση των MBMS υπηρεσιών του LTE (MBSFN)
- Εισαγωγή των LTE femtocells με τη μορφή του κόμβου Home eNodeB (HeNB)
- Χρήση beamforming δευτέρου επιπέδου
- Εισαγωγή των υπηρεσιών εύρεσης τοποθεσίας (positioning) για την εύρεση της τοποθεσίας του UE
- Χρήση του δημόσιου συστήματος προειδοποίησης (Public Warning System – PWS)
- Χρήση τεχνολογιών αυτο-οργάνωσης δικτύου (Self Organising Network – SON)
- Καταγραφή των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης για σταθμούς βάσης πολλαπλών φερουσών (multi-carrier) και πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (multi-Radio Access Technology, multi-RAT).

Οι MBMS υπηρεσίες του LTE δεν είναι κάτι καινούριο, καθώς εισήχθησαν με το Release 6. Πλεονεκτούν έναντι των άλλων τεχνολογιών ευρείας εκπομπής πολυμέσων ως προς τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποιείται η υπάρχουσα υποδομή με ελάχιστες τροποποιήσεις
- Δεν απαιτείται επιπλέον εύρος ζώνης
- Υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων και από τον χρήστη, μιας και προβλέπεται η ύπαρξη καναλιού ανοδικής ροής

Το eMBMS (evolved MBMS), που ορίστηκε με τα Releases 8 & 9, στοχεύει στην αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας στα επίπεδα του 1bps/Hz και προσφέρει 20

τηλεοπτικά κανάλια των 256kbps έκαστο σε ένα μοναδικό ασύρματο κανάλι των 5 MHz (Single Frequency Network – SFN). Για να επιτευχθεί αυτό, υιοθετήθηκε η αρχιτεκτονική δικτύου της Εικόνας 24 και που αποτελείται από τις ακόλουθες οντότητες:

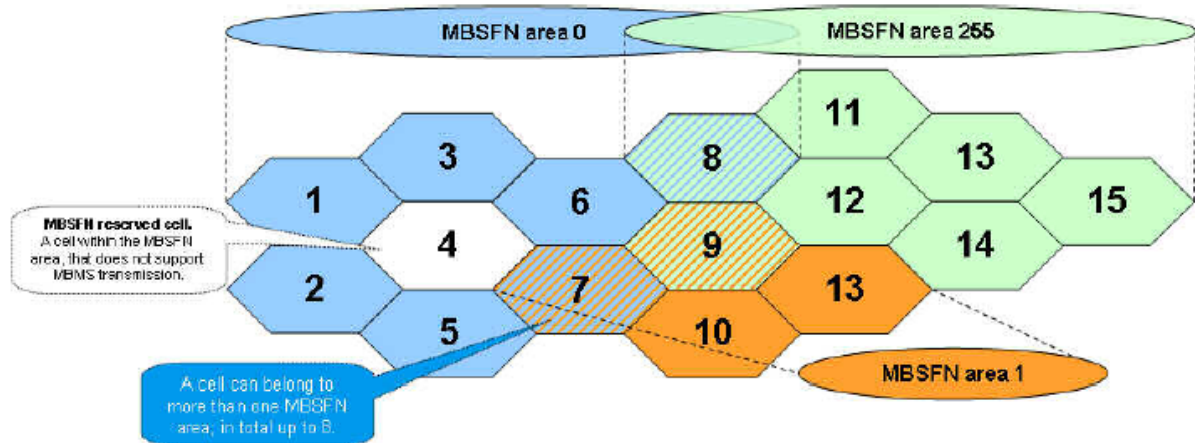


Εικόνα 24: Δικτυακή αρχιτεκτονική για το MBMS [32].

- Το BM-SC (Broadcast/Multicast Service Center) εισήχθη με το Release 6 και ασχολείται με την επαλήθευση ταυτότητας και την εξουσιοδότηση του παρόχου περιεχομένου, την χρέωση και την εποπτεία της όλης ροής δεδομένων.
- Η πύλη MBMS (MBMS Gateway – MBMS GW) είναι ο λογικός κόμβος που διαχειρίζεται την πολλαπλή εκπομπή των IP πακέτων από το BM-SC στους σταθμούς βάσης.
- Το MME αποτελεί μέρος της γενικότερης αρχιτεκτονικής του LTE και περιγράφηκε στην προηγούμενη Ενότητα
- Το MCE (Multi-cell/Multicast Coordination Entity) συντονίζει την χρήση των ίδιων πόρων και των ίδιων παραμέτρων εκπομπής από όλες τις κυψέλες που αποτελούν μία περιοχή MBSFN.

Σε επίπεδο κυψελών, οι κυψέλες οργανώνονται σε ομάδες. Καθεμιά από τις ομάδες αυτές ονομάζεται περιοχή MBSFN και οι κυψέλες που την αποτελούν μεταδίδουν το ίδιο περιεχόμενο με συντονισμένο/συγχρονισμένο τρόπο, έτσι ώστε η μετάδοσή τους να εμφανίζεται στην τερματική συσκευή σαν μία μετάδοση διαμέσου καναλιού χρονικής διασποράς (time dispersive). Αυτή είναι και η έννοια του MBSFN.

Μία περιοχή MBSFN αποτελείται από περισσότερες της 1 κυψέλες. Επίσης, κάθε κυψέλη μπορεί να συμμετέχει μέχρι και σε 8 διαφορετικές MBSFN περιοχές την ίδια χρονική στιγμή. Μπορούν να οριστούν μέχρι και 256 διαφορετικές περιοχές MBSFN, καθεμιά με την δική της διακριτή ταυτότητα. Άρα και οριστούν, οι περιοχές αυτές δεν αλλάζουν με δυναμικό τρόπο. Κάθε τερματική συσκευή μπορεί να λαμβάνει ταυτόχρονα πολλαπλές μεταδόσεις από διαφορετικές περιοχές MBSFN.



Εικόνα 25: Παράδειγμα οργάνωσης κυψελών σε περιοχές MBSFN [32].

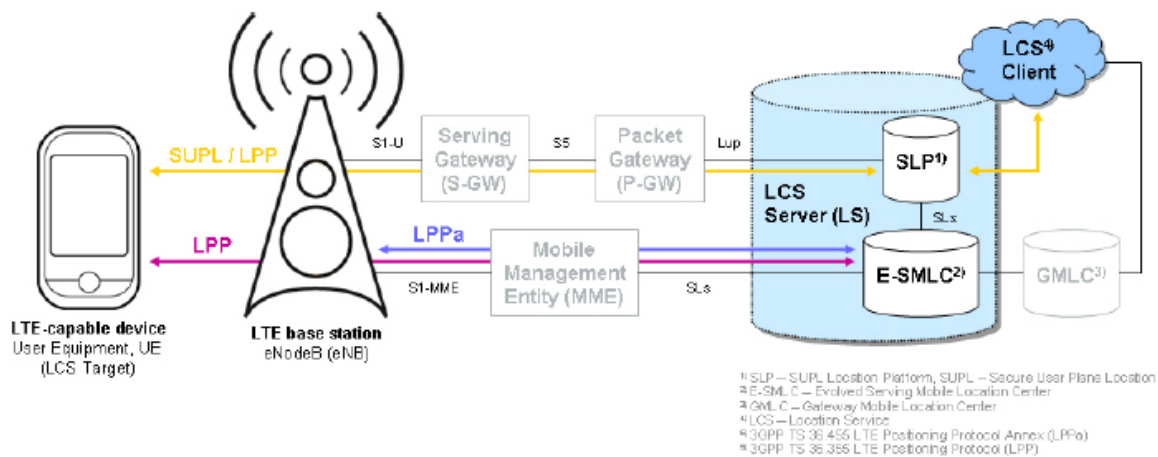
Η καινοτομία που εισήγαγε το Release 9 είναι το SIB τύπου 13. Αυτό περιλαμβάνει τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Ταυτότητα του MBSFN
- Μήκος των μη- MBSFN περιοχών (1, 2 OFDM σύμβολα)
- Ρυθμίσεις για το λογικό κανάλι MCCH

Το τελευταίο έλυσε και το πρόβλημα για το οποίο εισήχθη το SIB τύπου 13: μέχρι τότε και το καάλι ελέγχου (MCCH) και το κανάλι δεδομένων (MTCH) διοχετεύονταν μέσω του ίδιου καναλιού (MCH), με αποτέλεσμα να δημιουργείται σύγχυση μεταξύ των σημάτων ελέγχου και των δεδομένων. Μέσω των ρυθμίσεων για το MCCH, αποφεύγεται η σύγχυση και γίνεται ξεκάθαρο το τί αφορούν τα δεδομένα που μεταδίδονται μέσω του MTCH.

Ο εντοπισμός της τοποθεσίας ή/και της κίνησης των UE's είναι κεφαλαιώδους σημασίας, όχι μόνο για λόγους καλής λειτουργίας του δικτύου, αλλά και για λόγους ασφαλείας. Το LTE δεν επαφίεται μόνο στις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες GNS, A-GNSS (σχεδόν όλες οι σύγχρονες φορητές συσκευές είναι εφοδιασμένες με δέκτη GNSS), αλλά υλοποιεί και τις δικές του τεχνολογίες εντοπισμού της τοποθεσίας.

Στην Εικόνα 26 φαίνεται η αρχιτεκτονική του δικτύου εντοπισμού της τοποθεσίας του E-UTRA. Στόχος της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής – όπως και στόχος του LTE εν γένει, που έχει χτιστεί έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αποκεντρωμένο – είναι να είναι ανεξάρτητη από την δομή/τοπολογία του υποκείμενου δικτύου. Αποτελείται από 3 βασικές οντότητες: τον πελάτη LCS (Location Service – LCS), τον εξυπηρετητή LCS (LS) και τον στόχο LCS. Ο πελάτης – όρος που χρησιμοποιείται κυρίως για να δηλώσει την ζητούμενη υπηρεσία – βρίσκεται συνήθως εγκατεστημένος στον στόχο, που είναι η φορητή συσκευή του χρήστη. Ο πελάτης λαμβάνει την πληροφορία σχετικά με την τοποθεσία στέλνοντας ένα αίτημα στον εξυπηρετητή. Ο εξυπηρετητής μπορεί να είναι είτε μια φυσική είτε μια λογική οντότητα, η οποία συγκεντρώνει μετρήσεις και άλλες πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία από τις φορητές συσκευές και τους σταθμούς βάσης και προμηθεύει τις φορητές συσκευές με μια εκτίμηση της τρέχουσας τοποθεσίας τους. Δηλαδή, ο εκυπηρετητής λαμβάνει το αίτημα από τον πελάτη και το επεξεργάζεται, προμηθεύοντάς τον στην συνέχεια με τη ζητούμενη πληροφορία.



Εικόνα 26: Αρχιτεκτονική του δικτύου εντοπισμού της τοποθεσίας του E-UTRA [32].

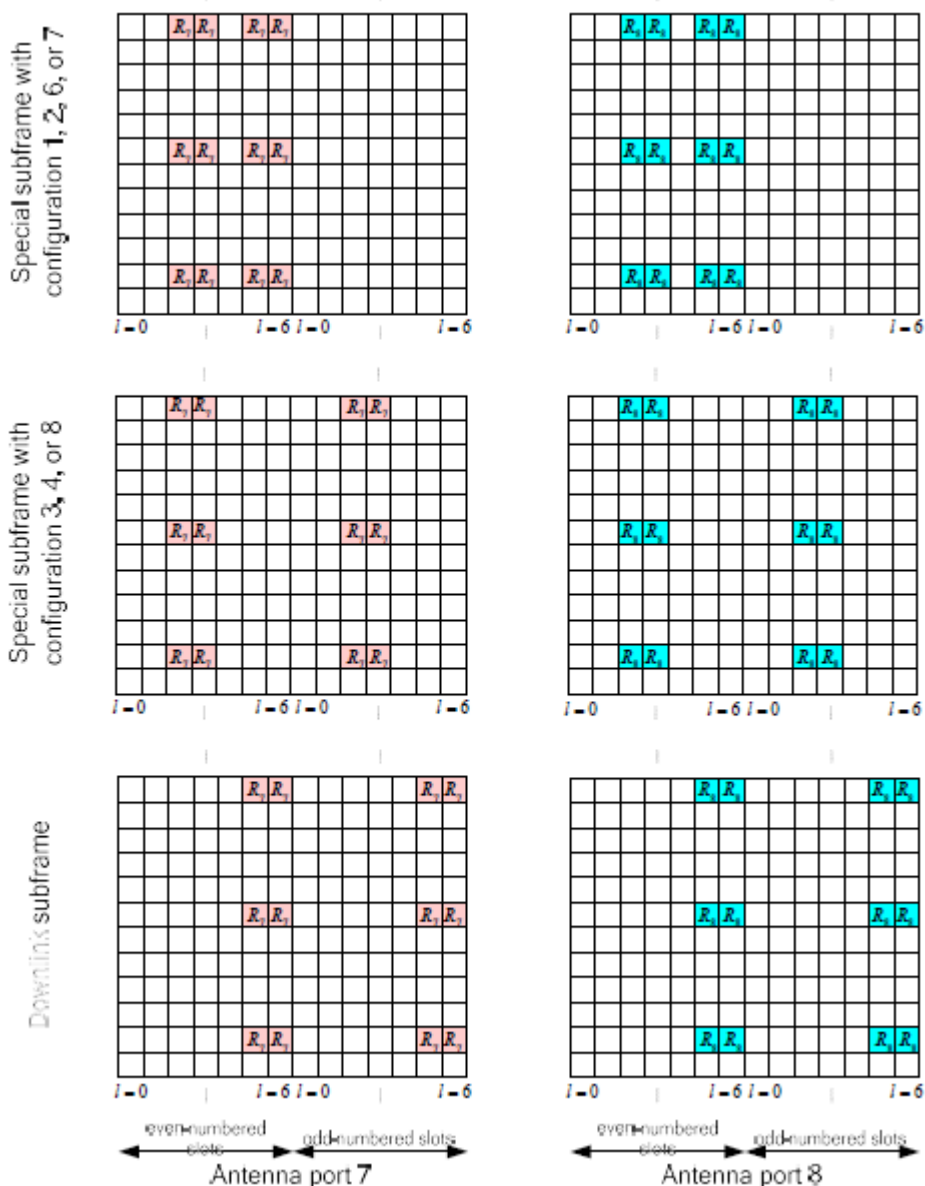
Η επικοινωνία μεταξύ πελάτη και εξυπηρετητή μπορεί να γίνει είτε μέσω του επιπέδου χρήστη (οι πληροφορίες τοποθεσίας ενσωματώνονται στα δεδομένα) είτε μέσω του επιπέδου ελέγχου, με εκπομπή ξεχωριστών σημάτων. Επίσης, υπάρχουν 2 διαφορετικά πρωτόκολλα LTE που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή των πληροφοριών τοποθεσίας, το LTE πρωτόκολλο εύρεσης τοποθεσίας (LTE Positioning Protocol – LPP) και το LTE πρωτόκολλο εύρεσης τοποθεσίας – παράρτημα (LTE Positioning Protocol Annex – LPPa).¹⁸

Με το Release 9, εισήχθησαν 2 καινούριες μέθοδοι εντοπισμού της τοποθεσίας επιπλέον του A-GNSS, που είναι η πιο διαδεδομένη – προ LTE – μέθοδος εντοπισμού της τοποθεσίας στα κινητά δίκτυα και που επίσης ορίστηκε για το LTE με το Release 9. Οι 2 μέθοδοι αυτές είναι οι OTDOA (Observed Time Difference of Arrival) και Enhanced Cell ID. Η πρώτη λειτουργεί σε φορητές συσκευές που φέρουν δέκτη A-GNSS και υπερέχει του A-GNSS στην ακρίβεια προσδιορισμού της τοποθεσίας της φορητής συσκευής σε αστικές περιοχές και όταν η συσκευή βρίσκεται εντός κτηρίου. Η δεύτερη έχει μικρότερη ακρίβεια προσδιορισμού της τοποθεσίας (ακρίβεια επιπέδου κυψέλης) και χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που η φορητή συσκευή δεν διαθέτει δέκτη A-GNSS.

Η τεχνολογία του beamforming (BF) είναι μια τεχνολογία επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιείται για το χωρικό φιλτράρισμα και για την επίτευξη χωρικής επιλεκτικότητας (spatial selectivity). Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να ορίσουμε το BF ως μια διαδικασία κατά την οποία ο σταθμός βάσης επικεντρώνει την εκπομπή του (διοχετεύει τη διαθέσιμη ενέργεια) προς την κατεύθυνση στην οποία βρίσκεται ο UE, επιτυγχάνοντας μεταξύ άλλων έτσι εξοικονόμηση ενέργειας, καλύτερη ισχύ σήματος στο δέκτη, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.

Στο Release 8 έχει οριστεί ήδη το BF ενός επιπέδου (single-layer), το οποίο βασίζεται στην εκπομπή συμβόλων αναφοράς ανάλογα με τον χρήστη (user-specific). Η κεραία του σταθμού βάσης προσανατολίζεται προς την εκτιμώμενη κατεύθυνση του UE (είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας μηχανισμός προσδιορισμού της τοποθεσίας του UE), δημιουργεί τη δέσμη του σήματος εκπομπής (beam) και χρησιμοποιεί την ίδια προ-κωδικοποίηση (precoding) τόσο στα δεδομένα όσο και στο σήμα αναφοράς για τον συγκεκριμένο UE (UE specific).

¹⁸ Η ανάλυση των συγκεκριμένων πρωτοκόλλων καθώς και των συγκεκριμένων τρόπων επικοινωνίας είναι πέραν των σκοπών της παρούσας εργασίας.



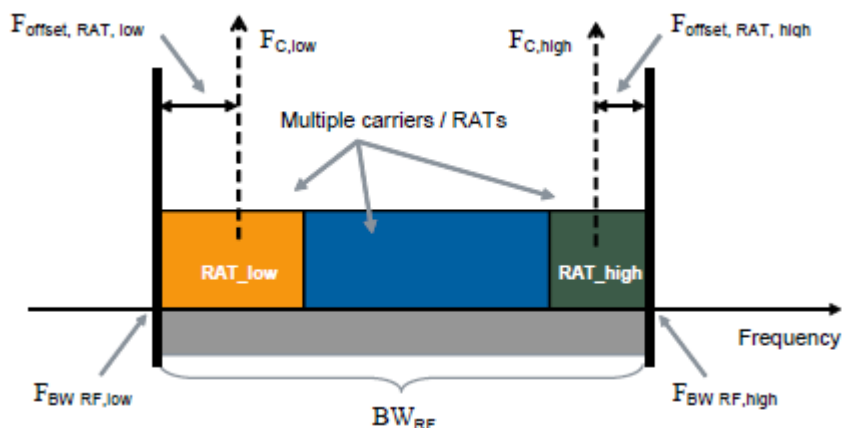
Εικόνα 27: Θέση των συμβόλων αναφοράς στην περίπτωση BF 2 επιπέδων και μετάδοσης από 2 κεραιές, με χρήση κανονικού κυκλικού προθέματος [32].

Το επίπεδο (layer) του BF καθορίζεται από το πλήθος των διαφορετικών κωδικών λέξεων που χρησιμοποιούνται (οι οποίες και ταυτίζονται με το πλήθος των TB). Συνεπώς, στο Release 9, στο οποίο προδιαγράφεται BF 2 επιπέδων, χρησιμοποιούνται 2 διακριτές κωδικές λέξεις.

Η χρήση συστημάτων προειδοποίησης μέσω των δικτύων/συστημάτων κινητής τηλεφωνίας για περιπτώσεις φυσικών καταστροφών (σεισμοί, τσουνάμι κτλ) αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Το LTE προέβλεψε μία τέτοια λειτουργικότητα και την ενσωμάτωσε στο Release 8. Η λειτουργικότητα αυτή ονομάστηκε ETWS (Earthquake and Tsunami Warning Systems). Το Release 9 εισήγαγε το PWS, το οποίο αντικατέστησε το ETWS εισάγοντας επιπλέον λειτουργικότητα. Πιο συγκεκριμένα, το PWS περιλαμβάνει:

- Υποστήριξη παράλληλης αποστολής πολλαπλών μηνυμάτων προειδοποίησης
- Υποστήριξη αντικατάστασης ή/και ακύρωσης μιας ειδοποίησης

- Υποστήριξη περιοδικής επανάληψης μιας ειδοποίησης με ελάχιστη περίοδο τα 2 δευτερόλεπτα και μέγιστη τις 24 ώρες
- Υποστήριξη γενικότερων PWS ενδείξεων στην σελιδοποίηση.



Εικόνα 28: Συχνοτικές προδιαγραφές για το MSR [32].

Οι σταθμοί βάσης της κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκαν χωρίς συγκεκριμένες γενικές προδιαγραφές και με σκοπό να εξυπηρετήσουν τις τεχνολογίες εκείνες για τις ανάγκες των οποίων αναπτύχθηκαν. Με την πάροδο των χρόνων και με την εισαγωγή διαφορετικών τεχνολογιών, αλλά και με τη συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών και την ανάγκη υποστήριξής τους από τον ίδιο σταθμό βάσης, χρειάστηκε η καθιέρωση συγκεκριμένων προδιαγραφών που θα έπρεπε να τους διέπουν. Η 3GPP εισήγαγε στο Release 9 τις προδιαγραφές που πρέπει να διέπουν τους σταθμούς βάσης πολλαπλών φερουσών και πολλαπλών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, χαρακτηρίζοντας αυτούς τους σταθμούς βάσης ως πολλαπλών ασύρματων προτύπων (Multi Standard Radio – MSR). Οι προδιαγραφές καλύπτουν τις τεχνολογίες GSM, UMTS/HSPA & LTE και χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Γενικές προδιαγραφές MSR, που είναι η πιο γενική κατηγορία προδιαγραφών και καλύπτουν κάθε διαφορετικό RAT που υποστηρίζεται από τους σταθμούς βάσης
- Γενικές προδιαγραφές MSR με επιπρόσθετες προδιαγραφές single-RAT, που περιλαμβάνουν επιπλέον κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές για συγκεκριμένα RAT
- Προδιαγραφές single-RAT μόνο, όπου δεν ορίζονται γενικές προδιαγραφές, αλλά συγκεκριμένες προδιαγραφές για καθένα από τα διαφορετικά RAT

Στην Εικόνα 28 φαίνονται οι συχνοτικές προδιαγραφές για τους MSR σταθμούς βάσης.

Στο Release 9 καταγράφονται οι προδιαγραφές για τα LTE femtocells (HeNB). Οι femtocells είναι μικροί σε μέγεθος, μικρής ισχύος σταθμοί βάσης, τοποθετημένοι εντός οικιακών ή επιχειρησιακών εγκαταστάσεων, που λειτουργούν ως σημείο πρόσβασης (access point) των φορητών συσκευών που βρίσκονται στο κτήριο.

Οι τεχνολογίες αυτό-οργάνωσης δικτύου (SON) εισήχθησαν με το Release 8. Το SON είναι ένας τύπος δικτύου όπου, μετά από το αρχικό στήσιμό του, το δίκτυο είναι σε θέση από μόνο του:

- να εκτιμήσει τις αρχικές παραμέτρους (self-configuration)

- να τις βελτιστοποιήσει στην πορεία (self-optimization)
- και να προχωρήσει σε διόρθωση προβλημάτων που προκύπτουν (self-healing).



Εικόνα 29: Λειτουργικές διεργασίες στο SON

Πίνακας 4: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R8

Rel-8 LTE Feature Summary
<p>GENERIC DEPLOYMENT RELATED</p> <p><u>Basic LTE system:</u> Specification of common FDD and TDD features and support for following channel bandwidths(1.4/3/5/10/15/20 MHz).</p> <p><u>MIMO and Transmit diversity support in downlink:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Up to 4 transmit(4Tx) antenna support in the Base Station • UE required to provide 2 Receive antenna performance-but need not actually have 2Rx antennas <p><u>Mobility:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Simplified, “Absolute Priority” call re-selection mechanism allows prioritization of Radio Access Technologies(2G/3G/LTE) and frequency layers. • Packet Switched handover for intra-RAT and inter-RAT. • Release message can push device to specific RAT/frequency. <p><u>Self-Organizing Network(SON):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Full cell ID report from device generates/maintains neighbor cell relations in Enb. • Dynamic setup of X2 interface between eNodeBs: very useful for “small cells”. • X2/S1 interface exchange of device’s list of previously visited cells enables self-optimization to avoid the device ping-ponging between eNBs and RATs. No UE impact. • X2 interface exchange of radio resource and processing load and interference information enables inter-cell load balancing and interference coordination.
<p>HOME E-NODE B SPECIFIC</p> <p><u>Architecture fir Home eNode Bs and “CDG(Closed Subscriber Group) support” features completed in initial design</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Allows smooth idle mode mobility and admission control on “Closed Subscriber Group” (CSG) cells. All mobiles required to be able to ignore Home cells belonging to other people. The search mechanism of your own Home cells is proprietary to the advice. • The HeNB Gateway is optional (but useful).

<p>SERVICE SPECIFIC <u>CS FallBack for voice calls</u> Allows an LTE network not supporting PS voice to re-direct the UE via IDLE to UMTS (CS domain) or GSM. <u>Single-Radio Voice Call Continuity:</u> Allows handover of LTE PS voice calls to UMTS (CS domain) or GSM.</p>
<p>Intra-Enb ENERGY SAVING Up to 6 special “MBSFN” subframes with fewer “Common Reference Signals” can be configured for energy saving of 30% to 50%.</p>

Πίνακας 5: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R9

<p>Rel-9 LTE Feature Summary</p>
<p>GENERIC DEPLOYMENT RELATED <u>Open Loop Dual Layer Beam-forming in downlink(also combined with Multi-User(MU)-MIMO):</u> This feature relies on reciprocity of UL and DL channel conditions. This is known to be feasible for TDD. Whether it is accurate enough for FDD is still being debated. <u>Service based radio link failure timer:</u> Allows the “radio link failure” timer to be different for different QCI values (e.g. short for voice and time charged sessions, longer for TCP traffic). <u>Mobility:</u> RSRQ (signal quality) added to inter RAT/frequency call reselection criteria. Avoids reselection of LTE cell with high interference level. <u>Service-specific access barring:</u> cell based, IMS/CSFB specific access control <u>Device type indication:</u> Device (UE) can indicate whether it is battery limited to allow network to decide when/whether to use DRX state. <u>SON improvements:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Mobility Load Balancing (MLB): automatic adjustment of handover / reselection parameters (under O&M control) to move UEs to less loaded cells. • Inter-RAT load balancing • Intra-LTE Mobility Robustness Optimization(MRO): handover parameter optimizations to reduce call drops during handover • RACH configuration optimizations <u>Energy Saving:</u> Ability to switch off LTE “capacity” cells during off peak periods and inform neighbor eNBs of the switch off.</p>
<p>HOME E-NODE B SPECIFIC <u>Hybrid cells:</u> permit a femto (CSG) cell to be used by any mobile while still providing a differentiated service to the femto’s owner and member of the CSG. <u>Inbound handover</u> from marco to CSG/hybrid cell. Enables handover to previously unknown cells.</p>

SERVICE SPECIFIC

CS FallBack for voice calls:

Made faster (especially GSM) by supply of target System Information from eNodeB.

IMS Voice:

- Vocoder rate adaption at start of call
- Emergency calls for SIMless/ unauthenticated mobiles. Regulatory.

Multicast/Broadcast:

eMBMS introduced. Reception possible in Idle and Connected states.

Location Services:

UE based and eNB assisted solutions.

3. 3GPP Releases 10 & 11: LTE-Advanced

Το Release 10 (R10) σήμανε την πρώτη μεγάλη αναβάθμιση του LTE. Σε αντίθεση με το Release 9, που αφορούσε επιμέρους λειτουργικότητες, το R10 επεμβαίνει στον πηρύνα του LTE, φέρνοντας αλλαγές – μεταξύ άλλων – στη φασματική αποδοτικότητα, στο εύρος ζώνης και στον ρυθμό μετάδοσης. Γι' αυτό τον λόγο, η εκδοχή του LTE που εισήχθη με το R10 και συμπληρώθηκε με το Release 11 (R11) ονομάζεται LTE-Advanced.

Συνοπτικά, το R10 επέφερε τις εξής βελτιώσεις:

- Αύξηση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης (peak data rate) στα 3Gbps για την καθοδική ροή και στο 1.5 Gbps για την ανοδική ροή
- Αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας, από ένα μέγιστο των 16bps/Hz σε 30bps/Hz
- Προσθήκη φερουσών και αύξηση του αριθμού των υπο-φερουσών που μπορούν να είναι ενεργές ταυτόχρονα
- Αύξηση της απόδοσης στα όρια της κυψέλης (cell edge, στα σημεία όπου μια κυψέλη συνορεύει με τις γειτονικές της)

Οι παραπάνω στόχοι επιτεύχθηκαν κυρίως με την εισαγωγή των εξής τεχνολογιών και λειτουργικοτήτων:

- Προσθήκη φέρουσας (Carrier Aggregation – CA)
- Μεγαλύτερη χρήση των τεχνικών MIMO (πολλαπλές κεραιές μετάδοσης/πολλαπλές κεραιές λήψης)
- Υποστήριξη της χρήσης ενδιάμεσων κόμβων (relay nodes)

Πίνακας 6: Σύγκριση φασματικής αποδοτικότητας LTE R8 & LTE R10 για διαθέσιμο εύρος ζώνης 10MHz [35].

	Διαθέσιμες κεραιές	LTE R8 bps/Hz	LTE R10 bps/Hz
Ανοδική ροή	1x2	0.8	1.2
	2x4	Μη διαθέσιμο	2.0
Καθοδική ροή	2x2	1.6	2.4
	4x2	1.7	2.6
	4x4	2.7	3.7

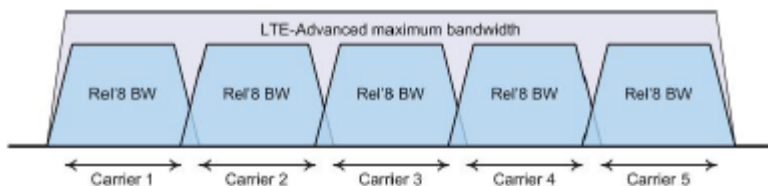
Προσθήκη Φέρουσας

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της αύξησης του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης, μια αύξηση του εύρους ζώνης είναι απαραίτητη. Για αυτό τον λόγο, το μέγιστο εύρος ζώνης αυξάνεται από τα 20MHz του R8 στα 100MHz. Πάνω από τα 20 MHz, ο επιτυγχανόμενος ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του

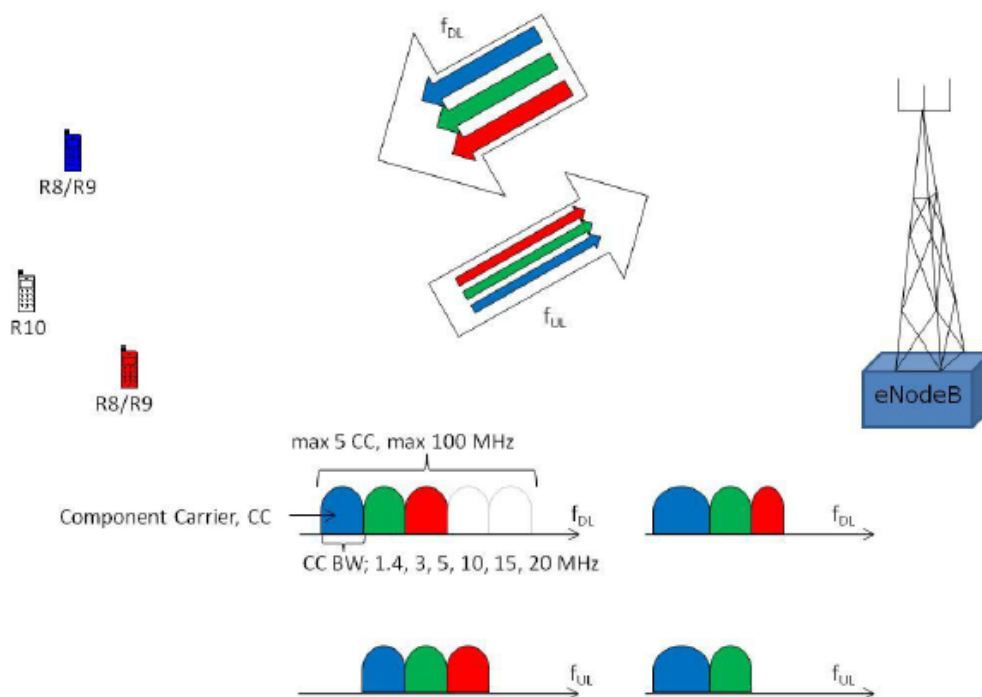
εύρους ζώνης, μιας και η αύξηση του τελευταίου πάνω από τα 20MHz δεν επιφέρει ωφέλη λόγω διαφορικότητας στη συχνότητα (frequency diversity) [35].

Για να εκπληρωθεί τόσο ο στόχος της αύξησης του εύρους ζώνης υπό τον περιορισμό αυτή να γίνει με όσο το δυνατόν μικρότερες παρεμβάσεις στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική και διασφαλίζοντας την συμβατότητα με τα προηγούμενα Releases, επιλέχθηκε η μέθοδος της προσθήκης φερουσών. Μιας και το R8 αποτελείται από 1 φέρουσα μέγιστου εύρους ζώνης 20MHz, το R10 εισάγει την προσθήκη 4 επιπλέον φερουσών (5 στο σύνολο, μαζί με την αρχική) εύρους ζώνης που μπορεί να πάρει μια από τις εξής τιμές: 1.4, 3, 5, 10, 15 ή 20 MHz. Συνεπώς, αν προστεθούν 4 επιπλέον φέρουσες των 20MHz η καθεμιά, τότε προσεγγίζεται το μέγιστο εύρος ζώνης των 100 MHz. Οι φέρουσες που συνθέτουν το εύρος ζώνης ονομάζονται φέρουσες-συνιστώσες (Component Carriers – CC).

Οι φέρουσες μπορούν να προστεθούν τόσο στην περίπτωση του FDD όσο και σε αυτή του TDD, τόσο για την καθοδική ροή όσο και για την ανοδική. Οι CC μπορεί να είναι διαφορετικού εύρους ζώνης μεταξύ τους και είναι δυνατό να υπάρχει διαφορετικό πλήθος CC για την καθοδική και για την ανοδική ροή, με τον περιορισμό πως το πλήθος των CC της καθοδικής ροής πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του πλήθους των CC της ανοδικής ροής.

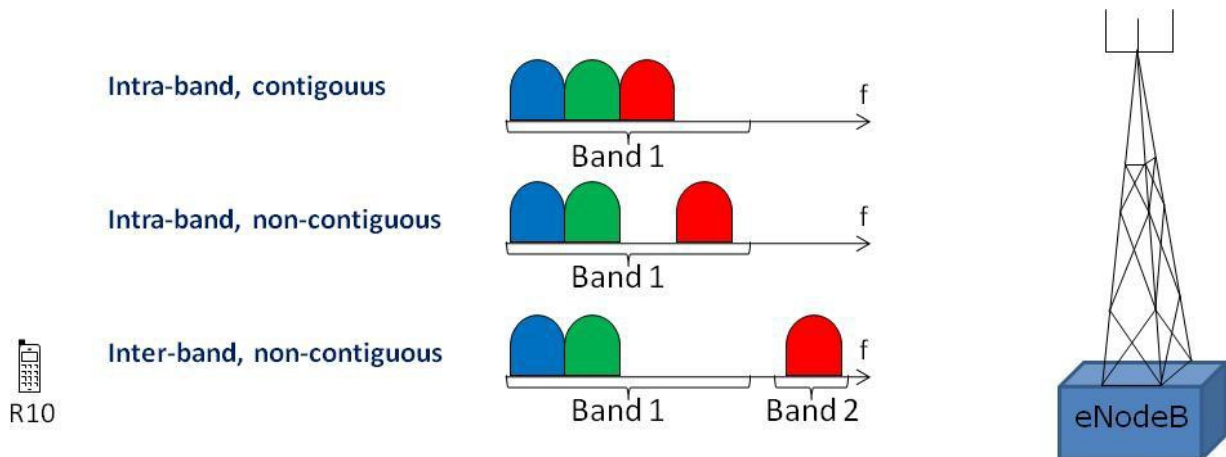


Εικόνα 30: Η λογική της προσθήκης φέρουσας στο R10 [35].



Εικόνα 31: Παράδειγμα προσθήκης φερουσών μεταβλητού εύρους ζώνης [36].

Από άποψη υλοποίησης, η προσθήκη CC στην καθοδική ροή είναι απλούστερη της προσθήκης στην ανοδική ροή: μιας και στην πρώτη χρησιμοποιείται η τεχνική OFDM και τα σύμβολα προκύπτουν από τον FFT, η προσθήκη CC είναι μια απλή επέκταση του FFT. Στην περίπτωση της ανοδικής ροής, όμως, η διαμόρφωση FDMA 1 φορέα (όπου τα σύμβολα προκύπτουν από τον DFT) δεν επιτρέπει την επέκταση για πολλαπλούς CC. Συνεπώς, προκρίνεται η λύση της υλοποίησης ξεχωριστού DFT για καθένα από τους CC [35].

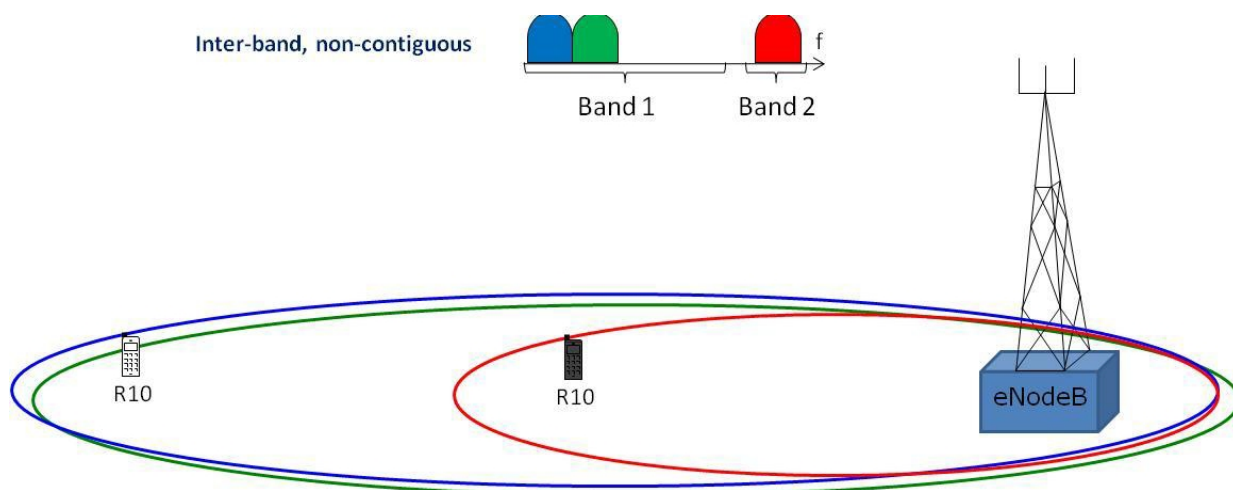


Εικόνα 32: Οι 3 τρόποι προσθήκης φέρουσας [36].

Υπάρχουν 3 τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η προσθήκη φέρουσας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32:

- Ο πρώτος τρόπος είναι οι επιπλέον CC να προστεθούν η μία δίπλα στην άλλη, χωρίς συχνοτικά κενά μεταξύ τους και να ανήκουν όλες στην ίδια ζώνη συχνοτήτων (band). Σε αυτή την περίπτωση, η προσθήκη CC ονομάζεται ενδο-ζωνική και συνεχής (intra-band, contiguous)
- Ο δεύτερος τρόπος είναι οι επιπλέον CC να προστεθούν μεν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με το αρχικό CC, αλλά χωρίς να είναι συνεχόμενες, υπάρχουν συχνοτικά κενά μεταξύ τους. Αυτού του είδους η προσθήκη ονομάζεται ενδο-ζωνική και ασυνεχής (intra-band, non-contiguous).
- Ο τρίτος τρόπος είναι οι CC να μην είναι συνεχόμενες στο πεδίο της συχνότητας και να μην ανήκουν όλες στην ίδια λειτουργική ζώνη συχνοτήτων. Αυτού του είδους η προσθήκη ονομάζεται διαζωνική και ασυνεχής (inter-band, non-contiguous)

Για καθένα από τα CC ορίζεται μια ξεχωριστή κυψέλη εξυπηρέτησης (serving cell). Η ακτίνα των κυψελών αυτών δεν είναι συνήθως η ίδια για κάθε CC, τόσο λόγω των διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων – υψηλότερες συχνότητες αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη απόσβεση σε περίπτωση διαζωνικής προσθήκης CC για αυτό και η ακτίνα κάλυψης μικραίνει όταν αυξάνεται η συχνότητα – όσο και λόγω της ανάθεσης διαφορετικής ενέργειας μετάδοσης για κάθε CC. Τη σηματοδosis (επίπεδο ελέγχου, πρωτόκολλο RRC) την χειρίζεται η κυψέλη που εξυπηρετεί το πρώτο CC και που ονομάζεται πρωτεύουσα κυψέλη εξυπηρέτησης (Primary Serving Cell – PSC). Οι κυψέλες που εξυπηρετούν τα υπόλοιπα CC ονομάζονται δευτερεύουσες κυψέλες εξυπηρέτησης (Secondary Serving Cells – SSC).

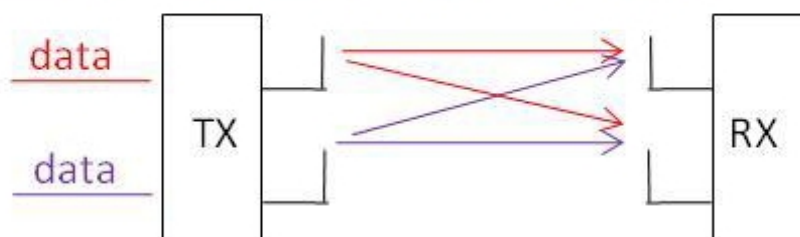


Εικόνα 33: Παράδειγμα κυψελών εξυπηρέτησης [36].

3.1 MIMO

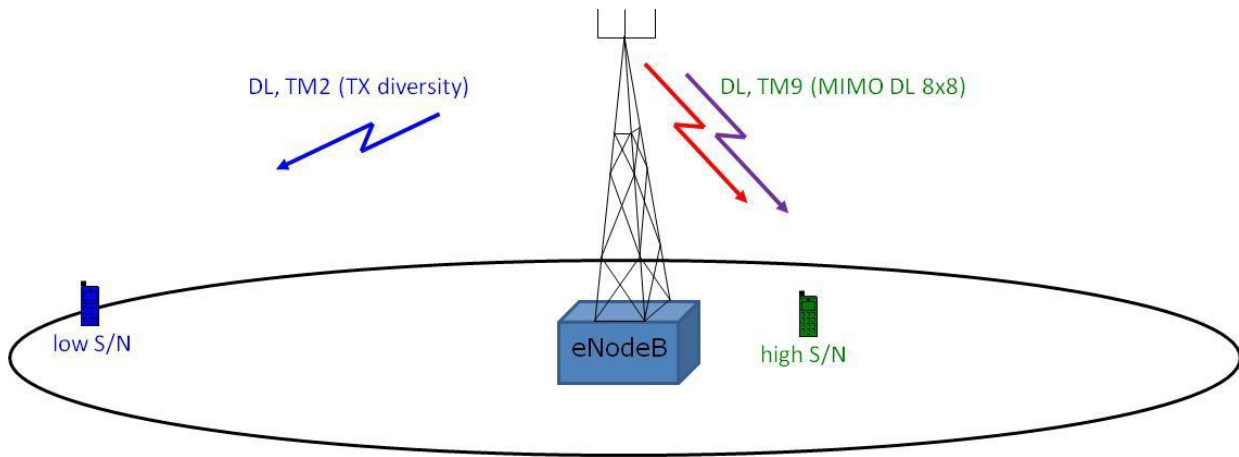
Η τεχνολογία MIMO (Multiple Input Multiple Output) είναι ένας τρόπος επίτευξης χωρικής πολύπλεξης, χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές για εκπομπή του σήματος και πολλαπλές κεραιές για λήψη του σήματος. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε την περίπτωση ενός συστήματος MIMO 2x2,¹⁹ όπως φαίνεται και στην Εικόνα 34. Καθεμιά από τις 2 κεραιές εκπομπής χρησιμοποιείται για τη μετάδοση διαφορετικής ροής δεδομένων. Οι ροές δεδομένων μεταδίδονται ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τους ήδη υπάρχοντες πόρους του συστήματος (εύρος ζώνης, χρονικές σχισμές) και οι 2 ροές διαχωρίζονται μόνο με την ύπαρξη διαφορετικών συμβόλων αναφοράς για καθεμιά από αυτές. Συνεπώς, με το MIMO επιτυγχάνεται χωρική πολύπλεξη του σήματος.

MIMO – Spatial Multiplexing (2x2)



Εικόνα 34: Παράδειγμα συστήματος MIMO 2x2 [36].

¹⁹ Το «2x2» σημαίνει πως χρησιμοποιούνται 2 κεραιές για την εκπομπή του σήματος και 2 κεραιές για τη λήψη του σήματος.



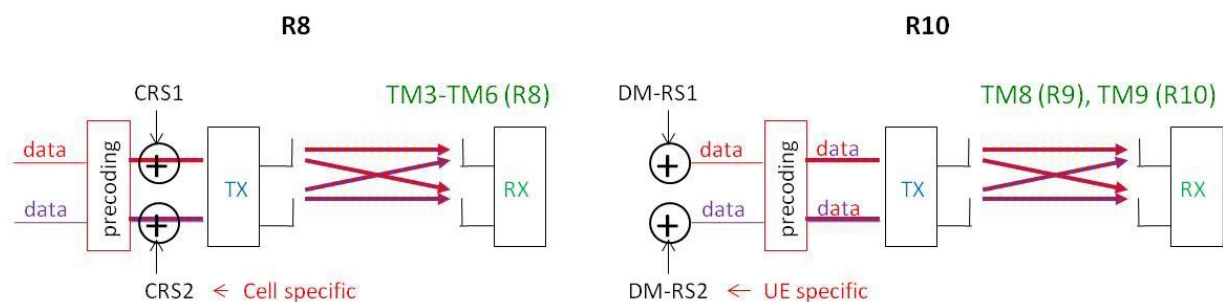
Εικόνα 35: Παράδειγμα χρήσης MIMO ή άλλης μεθόδου χωρικής πολύπλεξης, ανάλογα με το λόγο σήματος προς θόρυβο [36].

Η τεχνική MIMO περιλαμβάνεται ήδη στο R8. Στο R10, όμως, το μέγιστο MIMO επεκτείνεται από το 4x4 στο 8x8.

Σημειώνεται πως η τεχνική MIMO χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις υψηλού λόγου στην πλευρά του δέκτη. Σε αντίθετη περίπτωση, χρησιμοποιούνται εναλλακτικές τεχνικές πολλαπλών κεραιών, οι οποίες βελτιώνουν το λόγο αυτό. Γίνεται ξεκάθαρο, λοιπόν, πως το LTE περιλαμβάνει ένα σύνολο διαφορετικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την κατάσταση του ασύρματου μέσου. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται τρόποι μετάδοσης (Transmission Modes). Μέσω του επιπέδου ελέγχου, ο UE ενημερώνεται κάθε φορά για τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν 9 διαφορετικοί τρόποι για την καθοδική ροή (οι TM1-7 ορίστηκαν στο R8, ο T8 στο R9 και ο T9 στο R10), ενώ για την ανοδική ροή υπάρχουν 2, ο TM1 (R8) και ο TM2 (R10). Συγκεκριμένα, ο TM9 της καθοδικής ροής εισήγαγε το MIMO 8x8 και ο TM2 της ανοδικής ροής το MIMO 4x4.

Σε τεχνικές μετάδοσης πολλαπλών κεραιών χρησιμοποιείται η τεχνική της προκωδικοποίησης (precoding) που αφορά στην αντιστοίχιση των συμβόλων της τεχνικής διαμόρφωσης στις διάφορες κεραιές. Αυτό γίνεται με σκοπό η αντιστοίχιση συμβόλων στις κεραιές να γίνει με τρόπο ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία λήψης από τον δέκτη.

Στο R8, η προκωδικοποίηση γίνεται πριν από την προσθήκη στα δεδομένα των σημάτων αναφοράς (Cell-Specific Reference Signals – CRS). Τα σήματα αναφοράς είναι διαφορετικά για καθεμιά από τις κυψέλες στις οποίες θα κατευθυνθεί η μετάδοση πολλαπλών κεραιών. Χρησιμοποιώντας αυτά τα σήματα, ο δέκτης μπορεί να εκτιμήσει την παραμόρφωση που εισήγαγε κάθε κανάλι και να αποκωδικοποιήσει το σήμα.

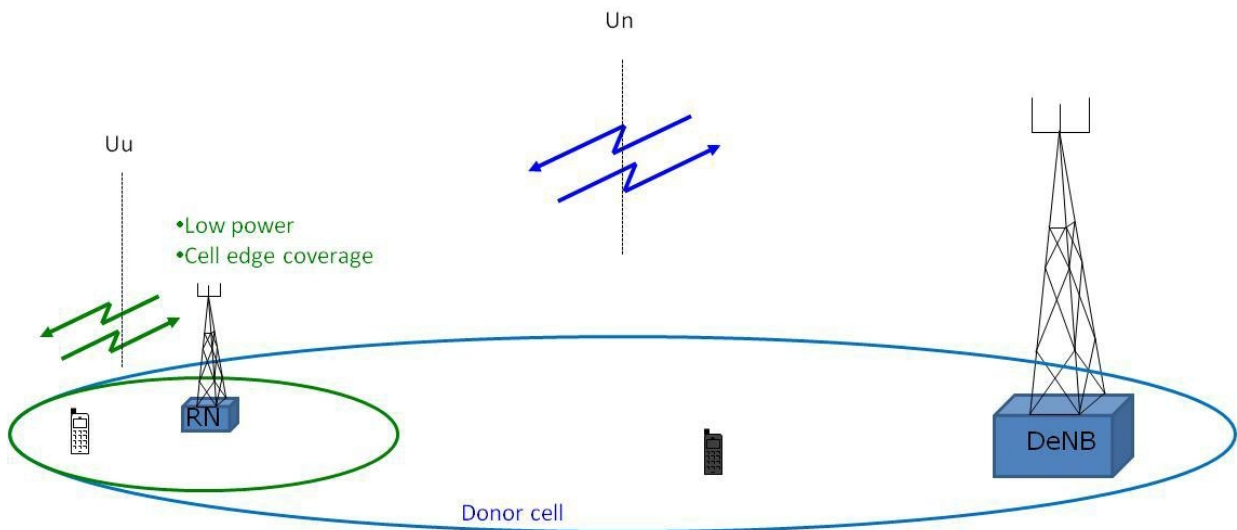


Εικόνα 36: Προκωδικοποίηση και MIMO μετάδοση στα R8 & R10 [36].

Αντιθέτως, στο R10 η προκωδικοποίηση λαμβάνει χώρα αφότου προστεθούν στα δεδομένα τα σήματα αναφοράς. Τα σήματα αναφοράς στο R10 είναι τόσα όσοι και οι διαφορετικοί UE στους οποίους κατευθύνεται η μετάδοση (DM-RS – Demodulation Reference Signals). Σε αυτή την περίπτωση, ο δέκτης δε χρειάζεται να γνωρίζει την προκωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για να αποδιαμορφώσει το σήμα και η αποδιαμόρφωση χαρακτηρίζεται ως ανεξάρτητη από βιβλίο κωδίκων (codebook).

Ενδιάμεσοι Κόμβοι

Οι ενδιάμεσοι κόμβοι είναι σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσοι σταθμοί/αναμεταδότες του σήματος καθώς αυτό ταξιδεύει από τον (αρχικό) σταθμό βάσης προς την τερματική συσκευή. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται επέκταση της περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης.



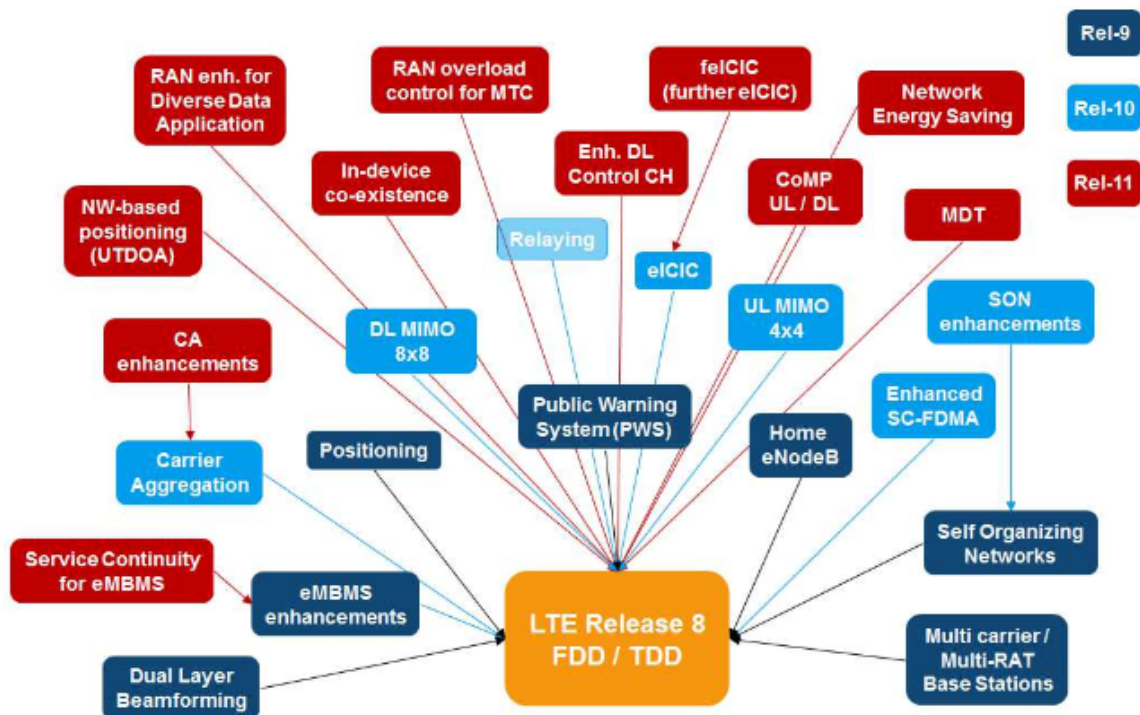
Εικόνα 37: Ενδιάμεσοι κόμβοι στο R10 [36].

Η δομή του LTE με ενδιάμεσους κόμβους φαίνεται στην Εικόνα 37. Ο ενδιάμεσος κόμβος (RN) συνδέεται με τον σταθμό βάσης (Donor eNodeB – DeNB) χρησιμοποιώντας μια ασύρματη διεπιφάνεια U_n , η οποία και είναι μια τροποποίηση της διεπιφάνειας του E-UTRAN. Συνήθως, η εκπομπή του RN (U_u) γίνεται σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων από αυτή του U_n , ειδάλως υπάρχει αυξημένος κίνδυνος παρεμβολών από την ισχυρότερη μετάδοση (U_n) στην ασθενέστερη (U_u). Με τη μετάδοση του RN επιτυγχάνεται καλύτερη κάλυψη των UE που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης του DeNB.

Release 11

Το Release 11 (R11) αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια ενίσχυσης των λειτουργικοτήτων που εισήγαγε το R10, συμπλήρωσης των τεχνολογιών του και προσθήκης καινούριων χαρακτηριστικών που θεωρούνται πλέον μέρος του LTE-

Advanced. Γι' αυτό το λόγο, το R11 θεωρείται ένα από τα 2 releases που περιέγραψαν το LTE-Advanced.



Εικόνα 38: Πορεία από το R8 στο R11 [38].

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 38, το R11 κύριο ρόλο έχει την ενίσχυση των χαρακτηριστικών του LTE-Advanced (LTE-Advanced Enhancements), πολλά από τα οποία είχαν εισαχθεί σε πρώιμη μορφή από το R8.

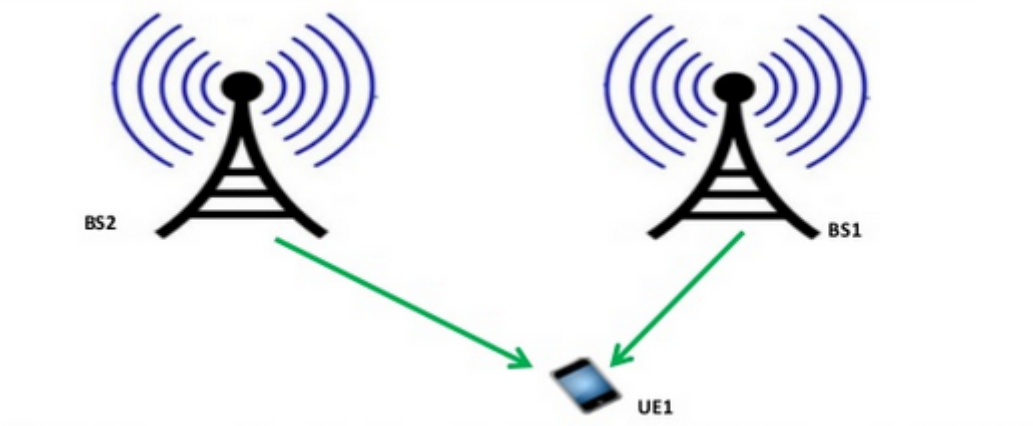
Συγκεντρωτικά, οι βασικές τεχνολογίες που εισήγαγε το R11 είναι οι ακόλουθες [37, 38]:

- Ενίσχυση της τεχνολογίας της προσθήκης φέρουσας
- Εισαγωγή της συνεργατικής μετάδοσης/λήψης πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi-Point (CoMP) transmission/reception)
- Βελτιώσεις στο SON
- Εισαγωγή νέου καναλιού ελέγχου
- eICIC μη βασισμένο σε προσθήκη φέρουσας (Non-carrier aggregation based eICIC – FeICIC)

Όσον αφορά την τεχνολογία προσθήκης φέρουσας, το R11 προσφέρει τις εξής βελτιώσεις [38]:

- Εισαγωγή πολλαπλών εκ των προτέρων χρονισμών (TA). Σύμφωνα με το R10, όλοι οι CC συγχρονίζονται με βάση ενιαίο χρονισμό TA.
- Συμπλήρωση των απαιτούμενων προδιαγραφών της ασυνεχούς προσθήκης φέρουσας.
- Προσθήκη επιπλέον προδιαγραφών για τους σταθμούς βάσης
- Τροποποίηση προδιαγραφών και προσθήκη νέων για τους UE

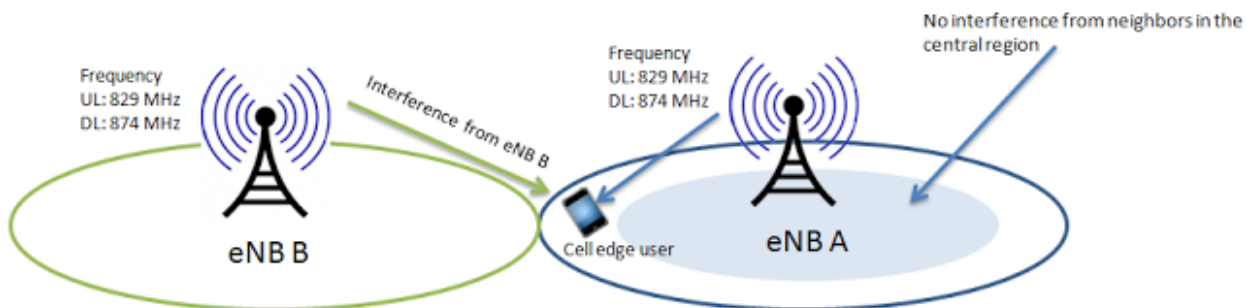
- Προσθήκη ρυθμίσεων για το TDD και υποστήριξης διαφορετικών ρυθμίσεων ανοδικής/καθοδικής ροής σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων



Εικόνα 39: Βασική δομή του CoMP [39].

Στην Εικόνα 39 βλέπουμε τη βασική λογική πίσω από το CoMP. Αυτό εκμεταλλεύεται την ύπαρξη παρεμβολών μεταξύ των μεταδόσεων σε διαφορετικές κυψέλες για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Συγκεκριμένα, είναι πολλές οι περιπτώσεις εκείνες όπου ένας UE είναι ορατός από περισσότερους από 1 σταθμούς βάσης. Αυτό συνεπάγεται ότι αυτοί οι σταθμοί βάσης μπορούν να μεταδώσουν προς τον UE και αντίστροφα. Αν, τώρα, η μετάδοση αυτή γίνει με συντονισμένο τρόπο, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Για την υποστήριξη αυτής της τεχνολογίας, το R11 εισήγαγε τον TM10.

Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε το ζήτημα του eICIC [42]. Το LTE είναι σχεδιασμένο για συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ίσο με 1, που σημαίνει πως γειτονικές κυψέλες μεταδίδουν στις ίδιες συχνότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ισχυρών παρεμβολών στα όρια των κυψελών, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 40. Οι παρεμβολές επηρεάζουν τόσο τα δεδομένα όσο και τα σήματα ελέγχου. Η παρεμβολή στα σήματα ελέγχου είναι πιο δύσκολα αντιμετωπίσιμη από ό,τι αυτή στα δεδομένα, μιας και για τα τελευταία υπάρχουν αποδοτικότεροι μηχανισμοί ανάκτησης της πληροφορίας.

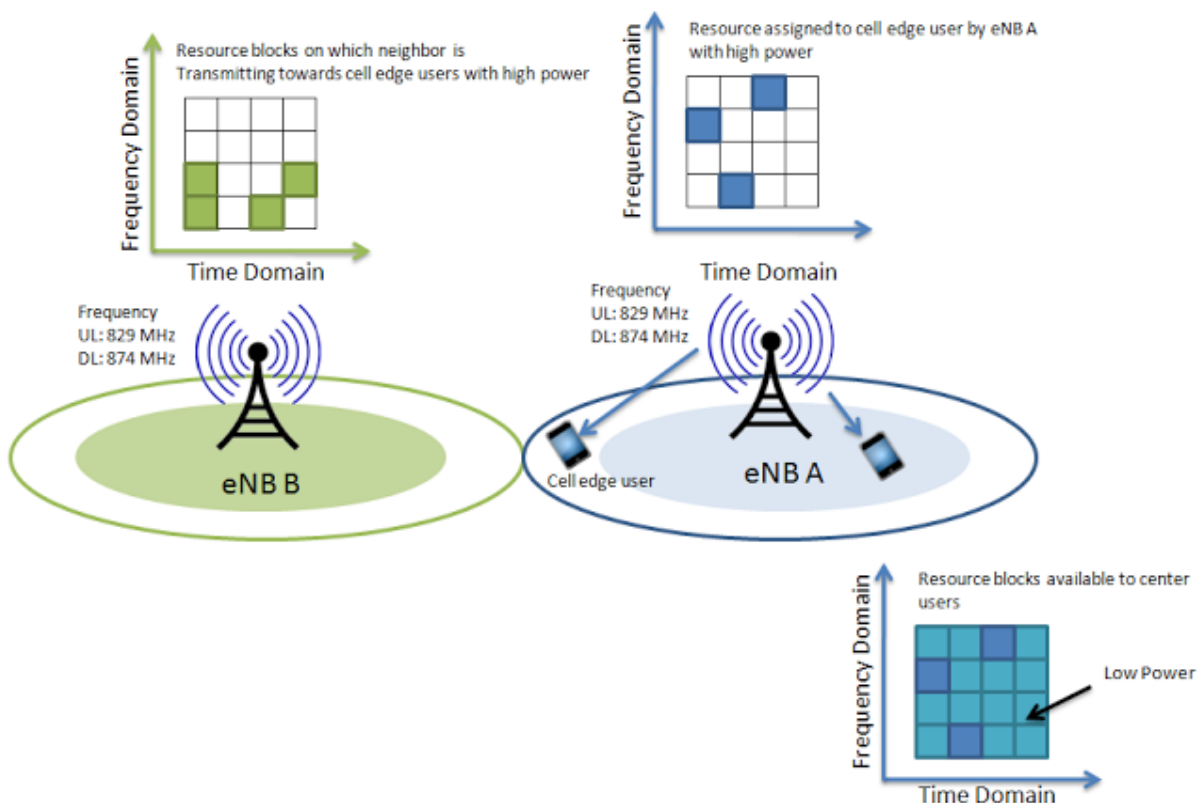


Εικόνα 40: Παράδειγμα παρεμβολών στα όρια των κυψελών λόγω της χρήσης των ίδιων συχνοτήτων από γειτονικές κυψέλες [42].

Για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα, το R8 εισήγαγε την τεχνολογία ICIC (Inter-Cell Interference Coordination), η οποία αφορούσε μόνο τη μετάδοση δεδομένων και όχι τη μετάδοση σημάτων ελέγχου. Αυτή η τεχνολογία προσπάθησε να αντιμετωπίσει την

προαναφερθείσα παρεμβολή με 3 διακριτούς τρόπους, που εφαρμόζονταν κατά μόνας (όχι σε συνδυασμό με τους άλλους 2):

- Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στο να χρησιμοποιούν οι γειτονικοί σταθμοί βάσης διαφορετικά σετ από RB, που σημαίνει ότι 2 γειτονικοί σταθμοί βάσης δεν μπορούν να αναθέσουν τους ίδιους πόρους στους UE που εξυπηρετούν. Αυτή η λύση αυξάνει το SINR²⁰ αλλά μειώνει τη διαπερατότητα, μιας και δεν χρησιμοποιούνται όλοι οι διαθέσιμοι πόροι.
- Η δεύτερη μέθοδος είναι παραλλαγή της πρώτης και ουσιαστικά πρόκειται για την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου μόνο για τους UE που βρίσκονται στα σύνορα της κυψέλης.
- Η Τρίτη μέθοδος συνίσταται στην χρήση διαφορετικών σχημάτων ανάθεσης ισχύος (power allocation scheme) κατά τη μετάδοση από γειτονικούς σταθμούς βάσης και φαίνεται στην Εικόνα 41. Συνεπώς, στις συχνότητες στις οποίες μεταδίδει ο ένας σταθμός βάσης με μεγάλη ισχύ, οι γειτονικοί του μεταδίδουν με χαμηλότερη ισχύ, έτσι ώστε να μειωθεί η παρεμβολή.



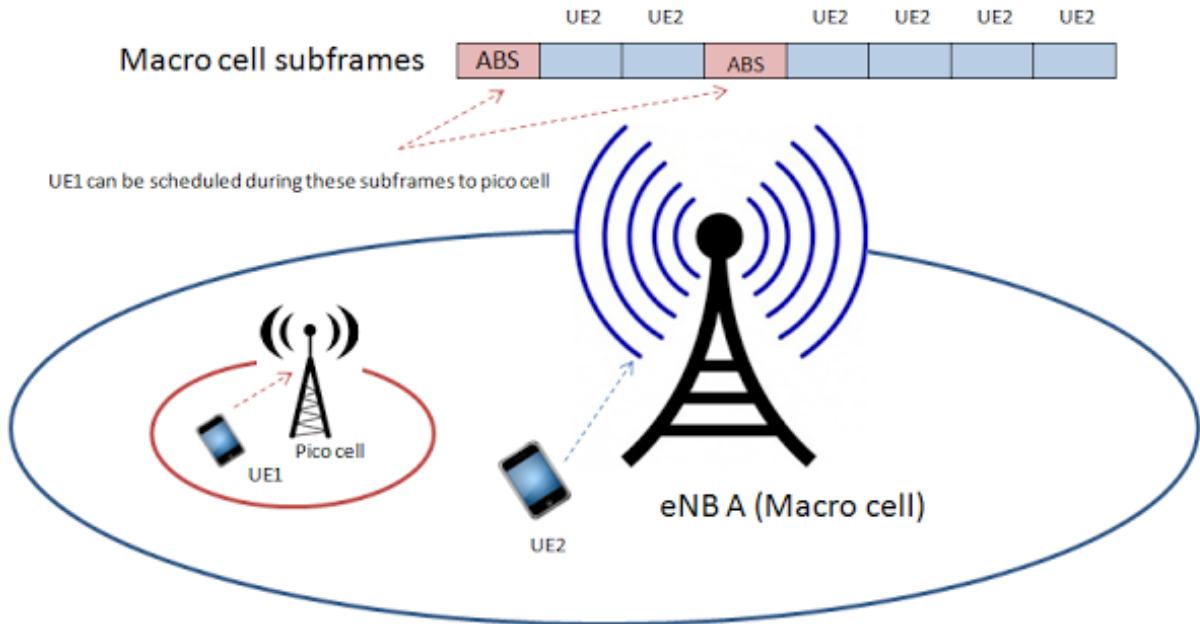
Εικόνα 41: ICIC με χρήση διαφορετικών σχημάτων ανάθεσης ισχύος ανά σταθμό βάσης [42].

Το R10 εισήγαγε το eICIC (enhanced ICIC), το οποίο περιλαμβάνει τις εξής καινοτομίες σε σχέση με τον προκάτοχό του:

- Αντιμετώπιση των παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα (Heterogenous Networks – HetNet)
- Αντιμετώπιση των παρεμβολών και στα κανάλια ελέγχου
- Ρύθμιση της μετάδοσης στα πεδία χρόνου, συχνότητας και ισχύος

²⁰ Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio: Λόγος σήματος προς θόρυβο συν παρεμβολή.

- Χρήση της έννοιας του σχεδόν κενού υποπλασίου (Almost Blank Subframe – ABS), που είναι υποπλαίσια μετάδοσης σημάτων ελέγχου πολύ χαμηλής ισχύος. Τα υποπλαίσια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων από femtocell σταθμούς βάσης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή από τα ισχυρότερα σήματα των άλλων σταθμών βάσης.



Εικόνα 42: eICIC & ABS [42].

Πίνακας 7: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R10

Rel-10 LTE Feature Summary
<p>GENERIC DEPLOYMENT RELATED</p> <p><u>Carrier aggregation:</u> Protocol design for aggregation of up to 5 carriers in DL and UL of any channel bandwidth for intra-band and inter-band combinations. Network architecture assumes all carriers on same eNodeB with common timing.</p> <p><u>Clustered DFT-S-OFDMA:</u> optional Uplink enhancement to get higher data rates (intra-band UL CA) and for frequency selective scheduling when UE is not power limited. Compared to Rel-8's "SC-FDMA", "clustering" requires a greater peak power reduction in the UE transmitter.</p> <p><u>Uplink SU-MIMO and Tx diversity:</u> 2 to 4 spatial layer Single User MIMO in uplink. In UE, requires one Tx antenna per spatial layer.</p> <p><u>Advanced Multi-User MIMO in downlink:</u> Improvements to downlink MU-MIMO to get better performance in cell with 4 or 8 Tx antenna.</p> <p><u>UL Tx diversity for Physical Uplink Control Channel:</u> for better UL coverage.</p> <p><u>8x8 MIMO in downlink:</u> 8 stream MIMO in downlink. Requires 8 Rx antennas at UE.</p>

Mainly paper study to compete with enhanced WiMAX (802.16m).

Minimizing Drive Tests: Reporting of measurement logs from UE.

- Logged MDT (logging of idle mode measurements with location information and report at next radio contact).
- Immediate MDT (reporting of measurements with location in connected mode).
- Reporting of Radio Link Failure (RLF) with location information (also used for SON).

SON improvements:

- Further Mobility Robustness Optimizations
- Event triggering to reduce “load balancing” signaling load.

HET-NET SPECIFIC

Improved interference management for heterogeneous deployments:

Solutions use time coordination (TDM) between data & control channels on different cells. Impacts X2 interface and requires time synchronization of eNBs.

Relays: LTE as wireless backhaul from pico eNode B to macro eNode B. Pico cell can be on same or different carrier frequency as macro cell.

HOME E-NODE B SPECIFIC

Direct X2 connectivity between HeNBs: Reduces handover signaling load on MME.

Local IP Access support at HeNB: Consider Lawful Interception implications of home network breakout.

SERVICE SPECIFIC

M2M: Core network overload control:

Mechanism to prevent “delay tolerant” M2M traffic from overloading core network.

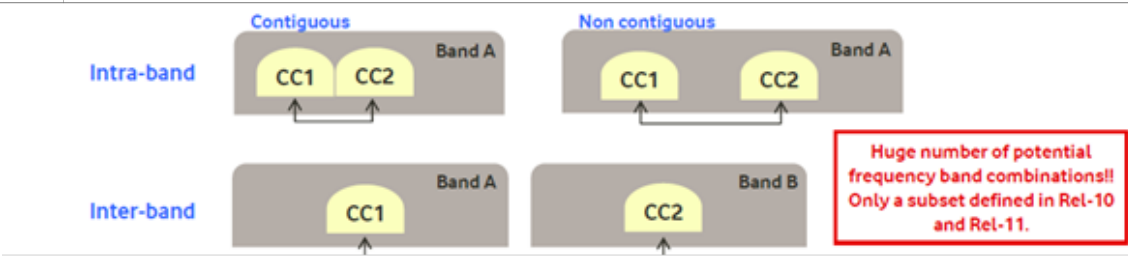
Multicast/Broadcast(eMBMS):

Addition of counting and service-interest indication from UE in connected mode. Improves UE handling and usage of multicast channel.

Πίνακας 8: Ανακεφαλαίωση χαρακτηριστικών του R11

Rel-11 LTE Feature Summary
<p>GENERIC DEPLOYMENT RELATED</p> <p><u>Inter-cell interference rejection</u>: improved mobile receiver performance (Type A) using LMMSE-based Interference Rejection Combining (IRC).</p> <p><u>Uplink and Downlink CoMP</u>: Improved cell edge performance and cell capacity for Intra-eNode B cases. Further uplink enhancements in Rel-12.</p> <p><u>Enhanced PDCCH</u>: improves downlink capacity and coverage for control channel.</p> <p><u>Carrier aggregation protocol enhancements</u>: permits use with widely separated bands and/or non-collocated Remote Radio Heads that may require different timing advance settings.</p> <p><u>Smartphones</u>: “Power Preference Indication” sent by device to help network decide when to put device in long(er) ‘sleep cycle’ (DRX).</p> <p><u>In-device coexistence</u>: avoid Bluetooth/Wifi to LTE@ 2.6GHz interference.</p> <p><u>UE antenna performance testing</u>: Simple TRP/TRS test method introduced as interim before full MIMO Over The Air test spec. is completed in Rel-12.</p> <p><u>Minimization of Drive Tests</u>: Quality of Experience and accessibility reports:</p> <ul style="list-style-type: none"> • eNB logging of data rate/volume coupled with UE reported location • eNB measurements for uplink coverage optimization • UE reporting of previous RRC connection establishment attempt failures. <p><u>Self-Optimizing Network</u>:</p> <p>Inter-RAT mobility optimization and ping-pong prevention.</p> <p><u>Base Station energy-saving mechanisms</u>: switch off of LTE ‘capacity’ cell with GSM/UMTS ‘coverage’ RNC/BSC able to reactivate dormant LTE cell.</p>
<p>GENERIC DEPLOYMENT RELATED (MOBILITY)</p> <p><u>Cell reselection from UMTS CELL FACH to LTE</u>: avoids device being ‘locked’ to UMTS</p>
<p>HET-NET SPECIFIC</p> <p><u>Further enhanced inter-cell interference coordination</u>:</p> <p>Co-ordination of control and data channel interference with power reduction and/or network assistance to UE in mixed macro/micro environments.</p>
<p>HOME E-NODE B SPECIFIC</p> <p>Handover to closed/hybrid HeNB over X2 with CSG membership verification.</p> <p>Verification of HeNB Identity</p>
<p>SERVICE SPECIFIC</p> <p><u>M2M</u>: overload control via “Extended Access Barring”</p> <p><u>Voice</u>: “reverse” Single-Radio Voice Call Continuity from GSM/UMTS MSC to Voice over IMS over LTE/UMTS</p> <p><u>eMBMS</u>: Inter-frequency service awareness and mobility.</p>

Πίνακας 9: Προσθήκη φέρουσας [15].

LTE – Carrier Aggregation and Switching: protocol aspects	
Rel-10	<ul style="list-style-type: none"> • Layer 1/2/3 radio protocols support aggregation of up to 5 CC's (Component Carriers) in DL and 5 CC's in UL. However, the number is limited in practice. • Each aggregated CC can be for ANY frequency band and ANY existing channel bandwidth within the band. • Cross-carrier scheduling (optional feature in both UE and eNB) allows for fast carrier switching (load balancing) and interference coordination on control channel. • CANNOT configure more UL CC's than DL CC's for same UE (But can configure more DL CC's than UL CC's, including support of DL only CA). • ALL aggregated CC's must be served by the SAME eNode B (i.e. the same BaseBand Unit) • For UL CA, transmissions from UE on different CC's should arrive at eNB within 30us. Otherwise, Rel-11 "Multiple Timing Advance" is needed. <p>-Misalignment of >30us can occur in scenarios where different carriers are served by different Remote Radio Heads which are not co-located but share the same Base Band Unit, or, when frequency selective repeaters are in use.</p>
Rel-11	<ul style="list-style-type: none"> • Multiple Timing Advance(TA): Resolves the constraint of propagation delay differences from Rel-10 by allowing different UL Tx timing offsets per TA group. One of more CC's can be linked to a TA group by the eNB. • Aggregation of TDD carriers with different UL/DL configuration
	

Πίνακας 10: Εξελικτική πορεία καναλιών καθοδικής ροής.

Physical Downlink Shared CHannel (PDSCH) (notation: Tx antennas in Downlink)	
Rel-8	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Mode 1: single Tx ◦ Mode 2: (multi Tx) Open Loop Tx diversity (no Precoding Matrix Indicator feedback)-Robust for High Speed UE ◦ Mode 3: (multi Tx) Open Loop spatial multiplexing with Cyclic Delay Diversity. Signal supplied to each antenna with a delay and fixed precoding. – For UE in same scenario as mode 2 but with higher available throughput and reduced feedback overhead vs mode 4. ◦ Mode 4: (multi Tx) Closed loop spatial multiplexing – up to 4 layers. Optimal throughput

	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Mode 5: (multi Tx) MU-MIMO- up to 1 layer and max of 4 UEs – Increased capacity ◦ Mode 6: (multi Tx) Closed loop spatial multiplexing with 1 layer precoding – Coverage improvement due to precoding ◦ Mode 7: (multi Tx) Open loop beam-forming – 1 stream(channel reciprocity and dedicated RS in DL)- Coverage improvement due to antenna virtualization
Rel-9	◦ Mode 8: 2-layer open loop beam-forming (enhancement to Mode 7)- Simultaneous coverage improvement to 2 users, OR throughput and coverage improvement to 1 user
Rel-10	◦ Mode 9: Advanced MU-MIMO and dynamic switching between SU and MU for up to 8 layers in downlink – Higher throughput for one or more users, or capacity improvement
Rel-11	◦ Mode 10: CoMP: new Downlink Control information (format 2D) for dynamic indication of Quasi-colocation for various CoMP techniques – Cell edge and cell-average user throughput improvement

4. 3GPP Releases 12 & 13: LTE-Advance Pro

Τα Releases που ακολούθησαν το LTE-advanced κινήθηκαν και αυτά σε κατεύθυνση παρόμοια με αυτή του R11, στην κατεύθυνση της ολοκλήρωσης διαδικασιών και προσθηκών που έμειναν ημιτελείς, της διευκρίνισης λεπτομερειών, της διόρθωσης παιδικών ασθενειών και της προσθήκης επιπλέον λειτουργικότητας.

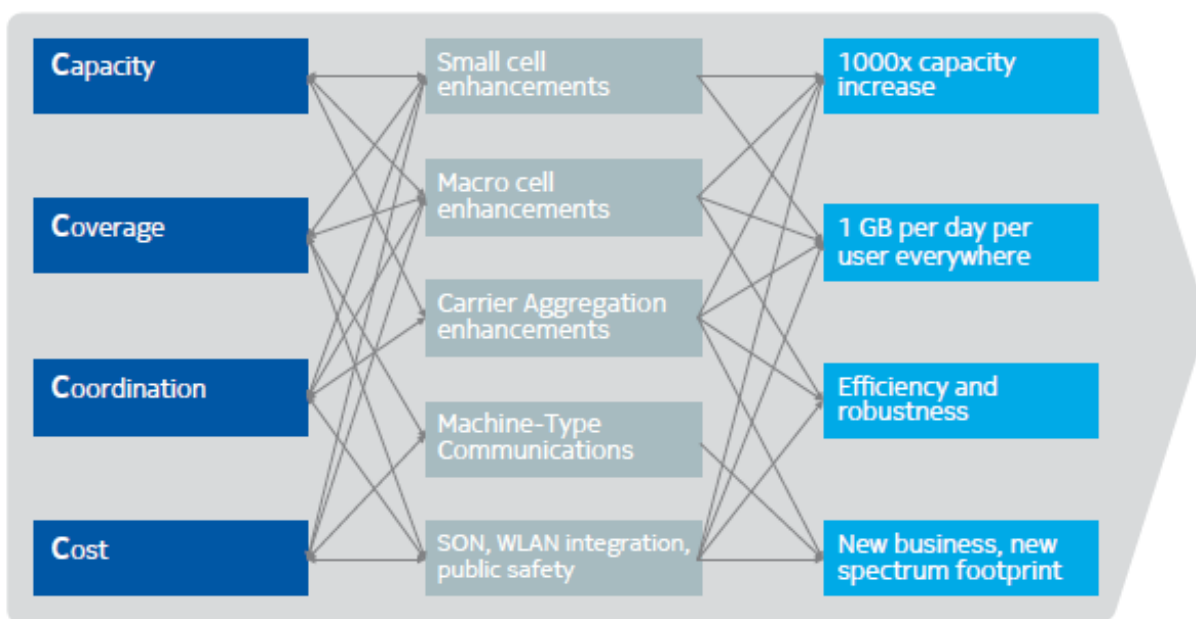
4.1 Release 12

Η διαδικασία εξέλιξης του LTE είναι συνεχής και η παραγωγή κανινούριων προτύπων αρχίζει με το που πραγματοποιηθεί η δημοσίευση του προηγούμενου. Έτσι, οι εργασίες για το Release 12 (R12) άρχισαν αμέσως μόλις το R11 παγιώθηκε.

Το R12 εισήγαγε βελτιώσεις αλλά και νέες λειτουργικότητες, οι οποίες θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως εξής [40, 41, 44]:

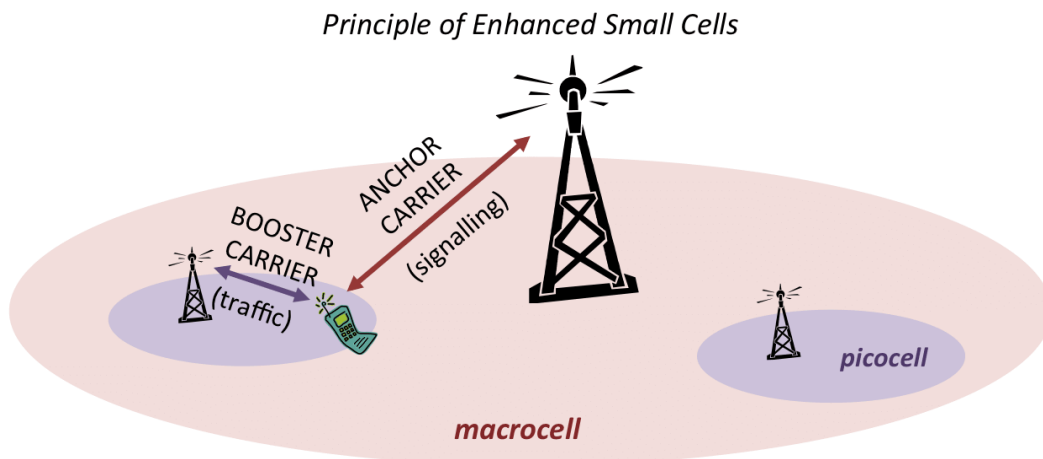
- Βελτιώσεις στις μικρές κυψέλες (enhanced small cells)
- Τεχνικές πολλαπλών κεραιών (MIMO, BF)
- Proximity services
- Προσθήκη φερουσών
- Διαδικασίες για την υποστήριξη πολλαπλών τύπων κίνησης (traffic)
- Νέες υπηρεσίες και βελτιώσεις προηγούμενων υπηρεσιών

Ας δούμε τα παραπάνω λίγο πιο αναλυτικά (όπου χρειάζεται).



Εικόνα 43: Καινούρια στοιχεία που έφερε το R12, σε συνδυασμό με τί οδήγησε σε αυτά καθώς και με τα οφέλη που έχουν [44].

Η έννοια της βελτιωμένης μικρής κυψέλης φαίνεται στην Εικόνα 44. Πρόκειται για μια μικρή κυψέλη που λειτουργεί ως ενισχυτής του σήματος της μακροκυψέλης και βοηθά στην επίτευξη υψηλότερων λόγων σήματος προς θόρυβο στον UE. Η βελτιωμένη μικρή κυψέλη εισήχθη με το R12 και φέρει επιπλέον (επιπλέον της μικρής κυψέλης) το ακόλουθο χαρακτηριστικό: Ο UE μπορεί να λαμβάνει σήματα τόσο από τον σταθμό βάσης της μακροκυψέλης (anchor carrier, που περιέχει τη σηματοδοσία) όσο και από τον σταθμό βάσης της μικρής κυψέλης (booster carrier, που περιέχει τα δεδομένα). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται δυαδική συνδεσιμότητα (dual connectivity) και διασφαλίζει τον διαχωρισμό των δεδομένων από τη σηματοδοσία, που – με τη σειρά της – διασφαλίζει τη δυνατότητα ευκολότερης ανάπτυξης των μικρών κυψελών [41, 42].



Εικόνα 44: Βελτιωμένη μικρή κυψέλη [43].

Ως προς την προσθήκη φέρουσας, το R12 έκανε δυνατή την προσθήκη TDD & FDD φερουσών (και όχι μόνο TDD ή μόνο FDD, όπως και ίσχυε μέχρι τότε) καθώς και την προσθήκη φερουσών intrasite (για παράδειγμα, μεταξύ μακροκυψέλης και μικρής κυψέλης).

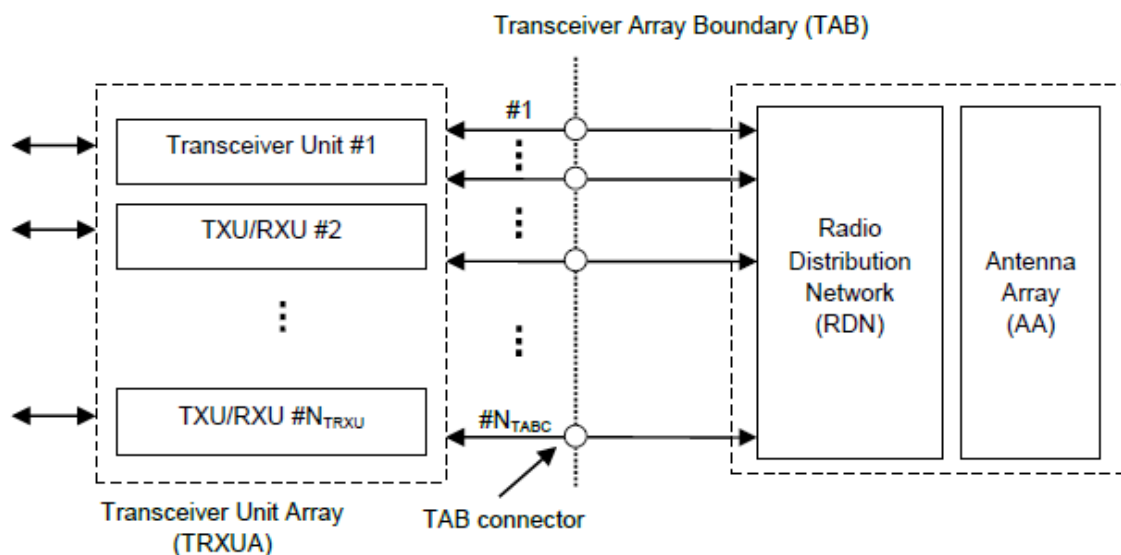
Μιλώντας για επικοινωνίες Proximity service (ProSe) αναφερόμαστε στην περιπτώσεις κατά τις οποίες UEs που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας, χωρίς να κάνουν χρήση του κυψελωτού δικτύου. Το R12 επικεντρώνεται στην παροχή της δυνατότητας απευθείας επικοινωνίας ευρείας εκπομπής μεταξύ του προσωπικού δημοσίων υπηρεσιών σε περίπτωση που το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας καθίσταται μη διαθέσιμο (περιπτώσεις φυσικών καταστροφών).

Μια επιπλέον καινοτομία του R12 είναι η εισαγωγή μεθόδων προσαρμογής στην κίνηση δεδομένων. Αυτό γίνεται (αναφερόμαστε στην περίπτωση του TDD) εισάγοντας 2 ξεχωριστές ρυθμίσεις (αντί της 1 καθολικής ρύθμισης που υπήρχε ως τότε και που έδινε βάρος στην καθοδική ροή), μία για την ανοδική ροή και μία για την καθοδική ροή. Τα υποπλάισια που χρησιμοποιούνται για καθενιά από τις 2 μεταδόσεις επιλέγονται δυναμικά, ανάλογα με την κίνηση που υπάρχει σε κάθε κατεύθυνση.

4.2 Release 13

Το Release 13 (R13) συμπληρώνει πολλές από τις λειτουργικότητες που εισήγαγε το R12, ενώ προσθέτει και καινούριες. Πιο αναλυτικά [46]:

- Εισάγει τις προϋποθέσεις για την χρήση στο LTE των AAS (Active Antenna Systems). Ως AAS σταθμός βάσης ορίζεται ο σταθμός βάσης εκείνος που συνδυάζει μια συστοιχία κεραιών με μια συστοιχία πομποδεκτών αλλά και με ένα δίκτυο κατανομής (Radio Distribution Network – RDN), το οποίο καλύπτει τις περιπτώσεις χρήσης μιας ή περισσότερων τεχνικών ασύρματης πρόσβασης αλλά και περιπτώσεις κάλυψης μικρής ή ευρείας περιοχής. Ένας τέτοιος σταθμός βάσης φαίνεται στην Εικόνα 45.

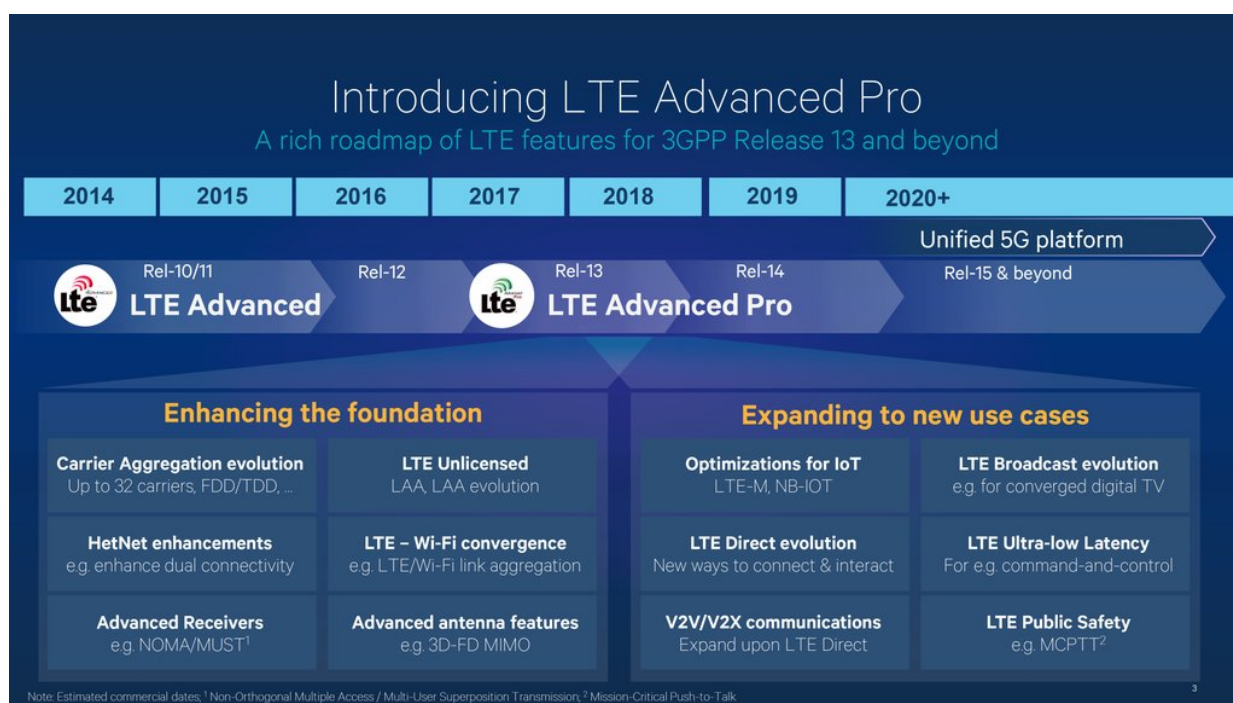


Εικόνα 45: AAS σταθμός βάσης [46].

- Εισάγει τις προδιαγραφές του SON για την περιπτώσεις που χρησιμοποιείται η τεχνολογία AAS
- Εισάγει νέα σχήματα MIMO μετάδοσης
- Χρησιμοποιεί καινούριους μηχανισμούς για τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών
- Βελτιώνει τις παραμέτρους για την επικοινωνία MTC (Machine Type Communication)²¹
- Βελτιώνει την ακρίβεια εντοπισμού της τοποθεσίας εντός κτηρίων
- Αποτελεί ένα ακόμα βήμα προς την ολοκλήρωση (integration) LTE-WLAN
- Διευκρινίζει πτυχές του κυψελωτού IoT δικτύου (Cellular Internet of Thing) καθώς και το IoT στενής ζώνης (narrowband IoT)
- Βελτιώνει τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της εισαγωγής βελτιωμένης εκδοχής του DRX
- Βελτιώνει τη δυαδική συνδεσιμότητα
- Εισάγει βελτιωμένα proximity services

²¹ Με τον όρο MTC περιγράφεται η επικοινωνία που γίνεται μεταξύ UEs με αυτόματο τρόπο, χωρίς να έχει παρεμβληθεί ενέργεια ή αίτημα του χρήστη.

Όπως έχουμε ήδη επισημάνει πολλές φορές, η εξέλιξη του LTE δεν σταμάτησε στο R12. Στην πραγματικότητα, άλλα 2 Releases έχουν ήδη δημοσιευτεί μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της παρούσας εργασίας, τα Releases 13 & 14, που βελτιώνουν το LTE ενώ προετοιμάζουν την έλευση του 5G. Εξαιτίας του ρόλου τους αυτού ως βελτιωτές του LTE που το οδηγούν στην πιο εξελιγμένη του μορφή – πριν από τον ριζικό μετασχηματισμό που ονομάζεται 5G – τα Releases 13 & 14 θεωρείται πως εισάγουν το LTE Advanced Pro, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1. Πρόκειται για μια ενίσχυση των θεμελίων του LTE αλλά και μία επέκτασή του προς νέες κατευθύνσεις και νέες περιπτώσεις χρήσης του που δεν ήταν δυνατό να προβλεφθούν πρωτύτερα. Επιπλέον, το LTE Advanced Pro θέτει τα θεμέλια για το 5G, με τις νέες προδιαγραφές ως προς τον ρυθμό μετάδοσης και την χωρητικότητα, αλλά και με την υιοθέτηση εξελιγμένων τεχνολογιών.



Εικόνα 46: LTE Advanced Pro [4].

Το Release 13 (R13) κινείται στην κατεύθυνση της ενίσχυσης και βελτίωσης του LTE ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές του. Επιπλέον, ενισχύει τη δυνατότητά του να λειτουργήσει ως πλατφόρμα για την δικτυωμένη κοινωνία (networked society²²). Αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας την χωρητικότητα του δικτύου και ενισχύοντας την εμπειρία του χρήστη μέσα από τα ακόλουθα:

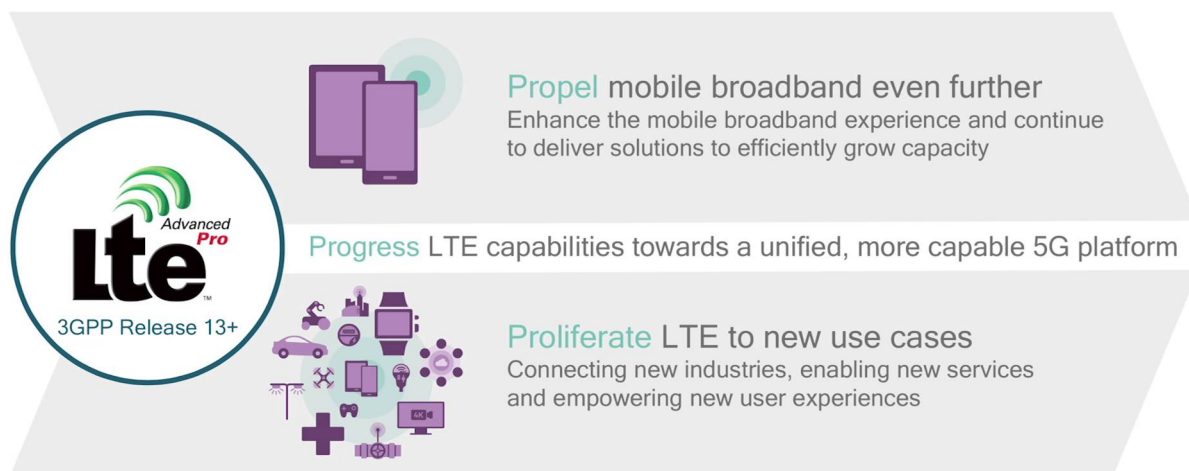
- Εισαγωγή του Licensed Assisted Access (LAA)
- Ενίσχυση της τεχνολογίας της προσθήκης φέρουσας
- Ενίσχυση της τεχνικής πολλαπλών κεραιών
- Μείωση της καθυστέρησης

Ο όρος networked society εισήχθη από την εταιρεία Ericsson για να περιγράψει ενός νέου τύπου κοινωνία που διαμορφώνεται και καθορίζεται από τη δυνατότητα των μελών της – τόσο ανθρώπων όσο και συσκευών – να είναι συνδεδεμένοι και να επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες, οπουδήποτε και αν βρίσκονται [2,3]. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στο [1], πρόκειται «για τη δυνατότητα πρόσβασης σε δίκτυα δεδομένων από οποιονδήποτε και διαμοιρασμού για ο,τιδήποτε, από οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή,

- Ενίσχυση των προδιαγραφών του LTE για επικοινωνία μεταξύ συσκευών (MTC, IoT)

Introducing LTE Advanced Pro

A rich roadmap of technologies that will progress LTE capabilities towards 5G

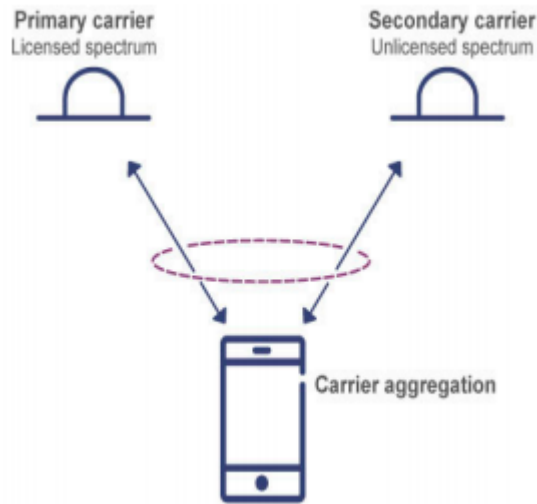


Εικόνα 47: Κατευθύνσεις του LTE Advanced Pro, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στο R13 [6].

Για να κατανοήσουμε την έννοια του Licensed Assisted Access (LAA), είναι πρέπει να σημειώσουμε καταρχάς πως υπάρχουν 2 μέθοδοι ανάθεσης φάσματος με κριτήριο την ύπαρξη ή μη αδειοδότησης (licensing). Η πρώτη μέθοδος είναι το αδειοδοτημένο φάσμα (licensed spectrum), όπου ένα συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων ανατίθεται σε έναν συγκεκριμένο πάροχο ή λειτουργό του δικτύου και μόνο σε αυτόν. Συνεπώς, αυτός είναι σε θέση να το χρησιμοποιήσει κατ' αποκλειστικότητα και να προσφέρει στους πελάτες του επικοινωνίες διασφαλισμένου QoS. Το αρνητικό της συγκεκριμένης μεθόδου είναι πως, την πλειοψηφία του χρόνου, μέρος του φάσματος αυτού μένει αχρησιμοποίητο.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχει το μη αδειοδοτημένο φάσμα (unlicensed spectrum), όπου το φάσμα είναι διαθέσιμο σε οποιονδήποτε κάθε χρονική στιγμή. Αυτή η μέθοδος οδηγεί σε αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αλλά είναι επιρρεπής σε παρεμβολές και σε συγκρούσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η διασφάλιση συγκεκριμένου QoS.

Το R13 έρχεται να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των 2 αυτών μεθόδων εισάγοντας το LAA, που συνδυάζει – χρησιμοποιώντας την τεχνική της προσθήκης φέρουσας – μία βασική φέρουσα (primary carrier) αδειοδοτημένου φάσματος με μία δευτερεύουσα (secondary carrier) μη αδειοδοτημένου φάσματος. Η πρώτη χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σηματοδοσίας και δεδομένων που απαιτούν υψηλό QoS ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται συμπληρωματικά, για τη μετάδοση δεδομένων με μικρότερες απαιτήσεις σε καθυστέρηση και QoS.



Εικόνα 48: Η έννοια του LAA [1].

Η τεχνική του LAA στοχεύει κυρίως σε κυψέλες αστικών περιοχών και μικρής διαμέτρου (δίκτυα αστικών περιοχών, δίκτυα εντός πολυκαταστημάτων) που λειτουργούν στα 5GHz. Αρχικά, υποστηρίζεται μόνο για την καθοδική ροή, αλλά υπάρχει η πρόβλεψη για επέκταση της υποστήριξης και στην ανοδική ροή.

Ένα ζήτημα που ανακύπτει είναι η κοινή χρήση του μη αδειοδοτημένου φάσματος με άλλες τεχνολογίες, όπως είναι το Wi-Fi. Το R13 περιλαμβάνει διάφορους μηχανισμούς που διασφαλίζουν ότι το LTE δεν θα δρα εις βάρος των τεχνολογιών αυτών.

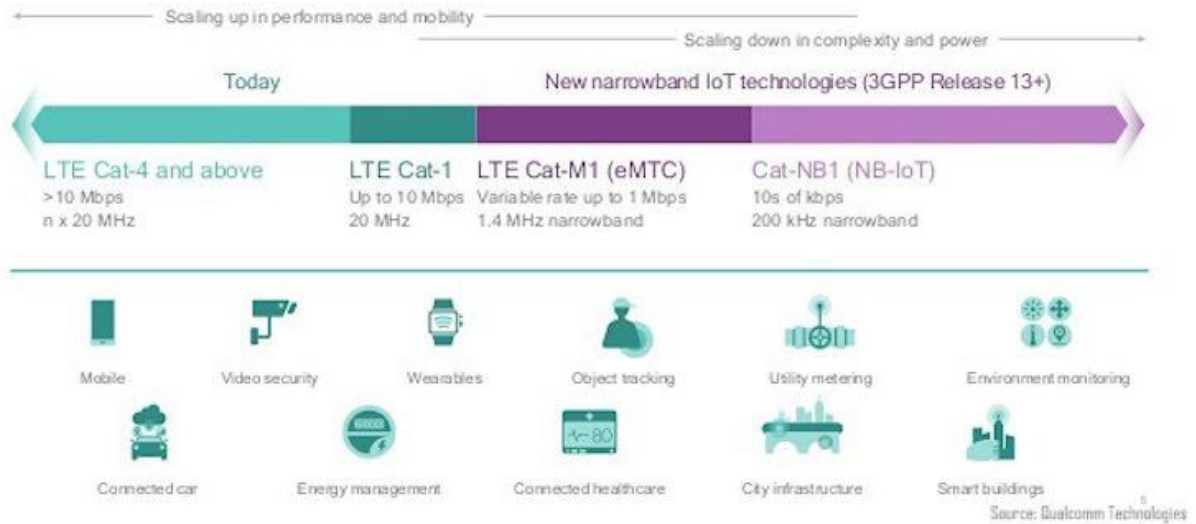
Όσον αφορά την τεχνική της προσθήκης φέρουσας, μιας και – όπως αναφέραμε ήδη – με την τεχνική του LAA χρησιμοποιούνται ζώνες συχνοτήτων των 5 GHz, δημιουργείται η ανάγκη επέκτασης της προσθήκης φέρουσας πάνω από τα 100 MHz (R10). Για τον σκοπό αυτό, το R13 προβλέπει την προσθήκη μέχρι 32 φερουσών συνολικά (ανοδική και καθοδική ροή).

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στις κινητές επικοινωνίες είναι η καθυστέρηση μετάδοσης. Για να έχει νόημα η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, πρέπει να συνοδεύεται και από χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης. Επιπρόσθετα, υπάρχουν ειδικές κατηγορίες επικοινωνιών (πχ μετάδοση σημάτων ελέγχου), όπου η χαμηλή καθυστέρηση είναι ζωτικής σημασίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το R13 λαμβάνει ειδική μέριμνα για τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης, υιοθετώντας σειρά δράσεων, όπως είναι η μείωση του χρόνου επεξεργασίας του σήματος στους τερματικούς σταθμούς και τους σταθμούς βάσης αλλά και η μείωση του χρονικού διαστήματος (interval) μεταξύ μεταδόσεων.

Κλείνοντας, το R13 φέρνει σημαντικές αλλαγές στο IoT με την εισαγωγή τεχνολογιών στενής ζώνης (narrowband), στα 1.4MHz με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 1Mbps. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση της πολυπλοκότητας και η εξοικονόμηση πόρων των συσκευών (κυρίως ενέργειας, που είναι και ο πόρος που εισάγει τους περισσότερους περιορισμούς), κάτι που ενισχύει την απόδοση και την κινητικότητα

We are evolving LTE for the Internet of Things

New narrowband technologies to more efficiently support IoT use cases



Εικόνα 49: Τεχνολογίες στενής ζώνης για το IoT [5].

5. 3GPP RELEASE 14: Ο ΔΡΟΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ 5G

Το Release 14 (R14) είναι ένα έργο ακόμα ανοιχτό, η τελική του μορφή δεν έχει δημοσιευτεί [7]. Περιλαμβάνει πάνω από 30 θέματα προς συζήτηση και είναι το τελευταίο βήμα πριν από το 5G: σε αυτό τελειοποιούνται τεχνολογίες που εισήχθησαν με το R13 και συζητιούνται αρκετά από τα θέματα που θα οριστικοποιηθούν στο Release 15.

Σύμφωνα με την 3GPP, τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του R14 είναι τα εξής [7, 8]:

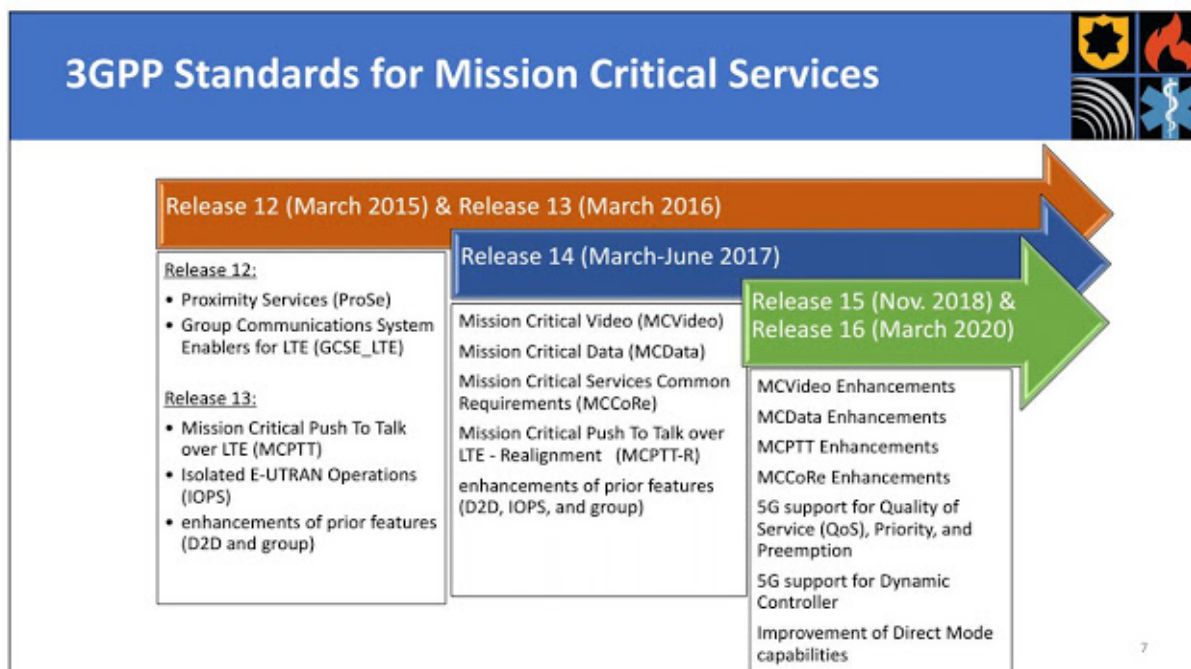
- Ενίσχυση των παραγόντων ύψιστης σημασίας (Mission Critical Enhancements)
- Υποστήριξη της V2x επικοινωνίας
- Επιπλέον βελτίωση της τεχνολογίας MIMO
- Επιπλέον μείωση της καθυστέρησης (γενικά) αλλά και στην πλευρά του χρήστη ειδικότερα
- LAA για την ανοδική ροή
- Μείωση της απαιτούμενης σηματοδοσίας

Με τον όρο παράγοντες ύψιστης σημασίας, εννοούμε τους παράγοντες αυτούς που είναι θεμελιώδεις για τη λειτουργία του LTE και που πιθανή αποτυχία των οποίων θα σήμαινε την κατάρρευση του συστήματος. Στο LTE οι παράγοντες αυτοί άρχισαν να ορίζονται και να προτυποποιούνται με το R13 και η διαδικασία συνεχίζεται στο R14, με τον ορισμό των MC (Mission Critical) δεδομένων, του MC βίντεο, καθώς και με την παροχή ενός γενικού πλαισίου για την προτυποποίηση των MC υπηρεσιών, καθιστώντας δυνατή τη μελλοντική προσθήκη τέτοιων υπηρεσιών.

Ως V2X (Vehicle-to-Everything) επικοινωνία ορίζεται η επικοινωνία μεταξύ ενός οχήματος και:

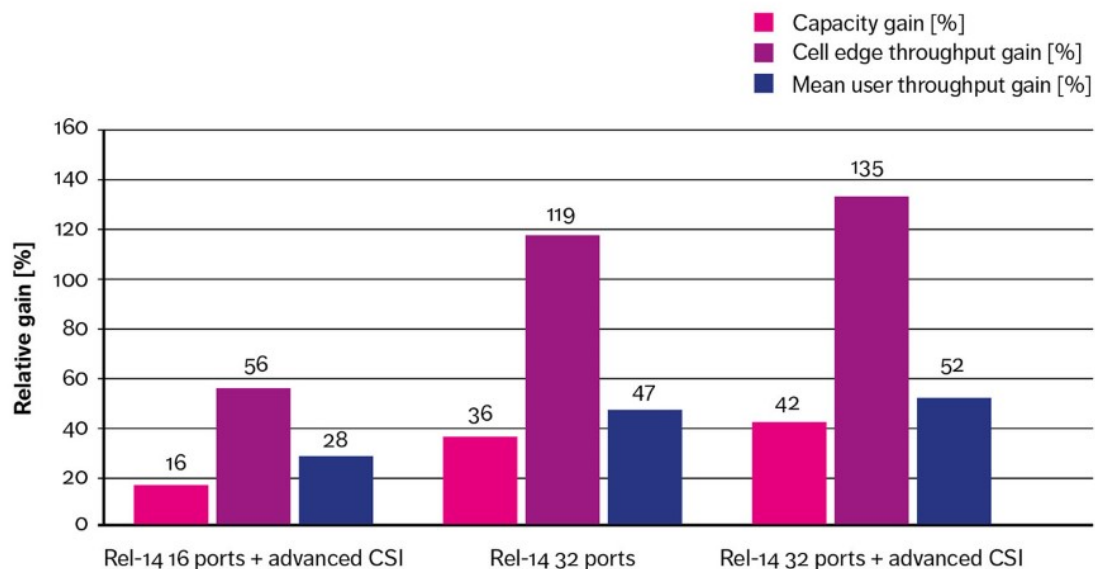
- Ενός άλλου οχήματος (V2V)
- Μιας τηλεπικοινωνιακής υποδομής (V2I)
- Ενός πεζού (V2P)

Αυτού του είδους οι επικοινωνίες είναι χρήσιμες για την αποφυγή συγκρούσεων (συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων, μεταξύ οχήματος και πεζού), για την ενημέρωση για προβλήματα υγείας, καταστάσεις που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης κ.ά. Με το R14, το LTE κινείται προς την κατεύθυνση της υποστήριξης επικοινωνιών αυτού του τύπου, με την ενοποίηση της χρήσης τόσο του απευθείας καναλιού του LTE (sidelink, κανάλι που χρησιμοποιείται για επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης και παρακάμπτει το κυψελωτό δίκτυο) όσο και του κυψελωτού δικτύου.

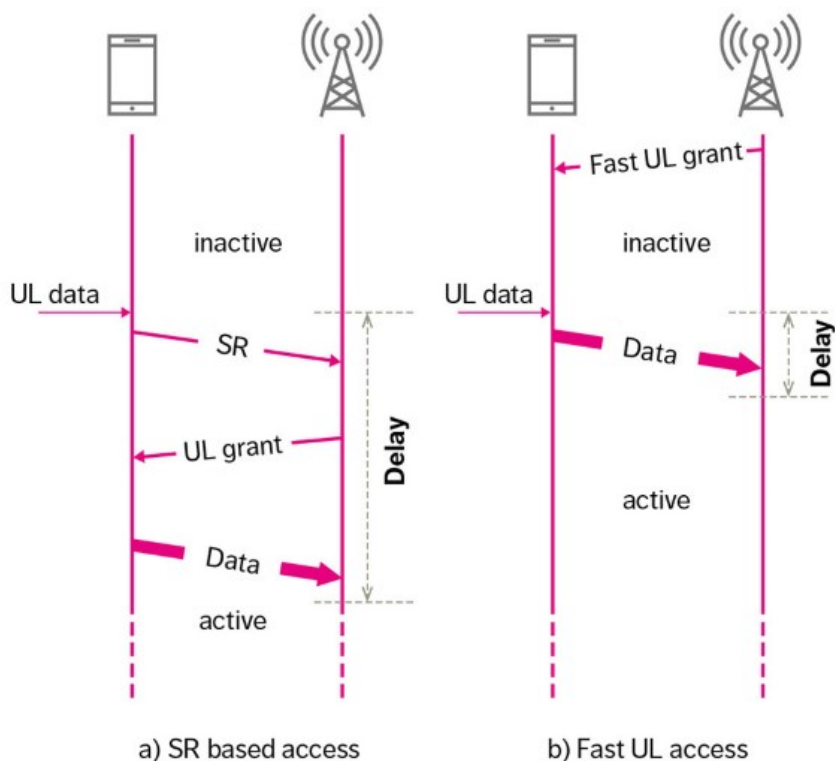


Εικόνα 50: Πορεία της προτυποποίησης των MC υπηρεσιών του LTE [10].

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στη συζήτηση για το R13, η μείωση της καθυστέρησης είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση του 5G. Η μείωση αυτή δε συμβάλλει μόνο στην κατεύθυνση της αύξησης του ρυθμού μετάδοσης, αλλά καθιστά δυνατή και την παροχή υπηρεσιών όπως οι V2X επικοινωνίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το R14 συνεχίζει τις προσπάθειες που άρχισαν στο R13, εισάγοντας την τεχνολογία της γρήγορης πρόσβασης ανοδικής ροής (fast uplink access). Σε αυτή, ο σταθμός βάσης παρέχει άδεια στον UE για μετάδοση κάθε ms και όχι κατόπιν αιτήματος του UE, όπως συνέβαινε μέχρι τώρα. Ο UE χρησιμοποιεί την άδεια αυτή μόνο όταν έχει κάτι να μεταδώσει και την αγνοεί τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές. Με αυτό τον τρόπο, εξαλείφεται η καθυστέρηση που σχετίζεται με την αποστολή αιτήματος για μετάδοση και την αναμονή λήψης της σχετικής άδειας.



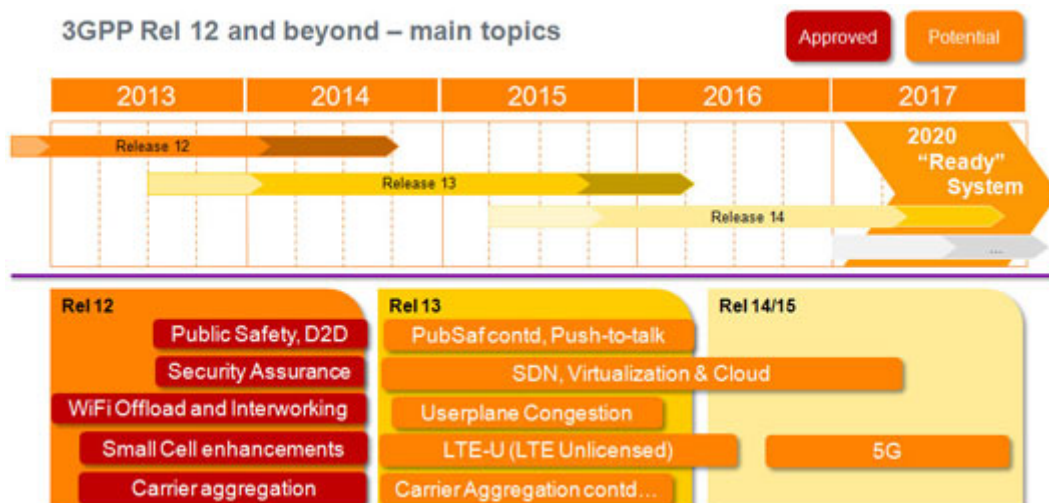
Εικόνα 51: Βελτίωση απόδοσης συστημάτων MIMO του R14 σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα του R13 [8].



Εικόνα 52: Τεχνολογία γρήγορης πρόσβασης [8].

5. Επίλογος

Μπορεί το LTE να έχει χαρακτηριστεί ως η πιο ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας στην ιστορία [47], όμως οι άνθρωποι πίσω από την επιτυχία δεν επαναπαύονται. Επόμενος στόχος είναι η δημιουργία των «2020 ready» συστημάτων, δηλαδή η ανάπτυξη των 5G δικτύων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53: Προγραμματισμένη εξέλιξη των Releases στην πορεία προς το 5G [45].

Το 5G αναπτύσσεται ώστε να εκπληρώνει τους ακόλουθους στόχους, όπως περιγράφονται και στην Εικόνα 54 [48]:

- Υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης
- Πολύ χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης
- Υψηλή αξιοπιστία
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Mainly for Mobile Internet

<p style="text-align: center;">Seamless Wide-Area Coverage</p>  <ul style="list-style-type: none">• User experienced data rate: 100 Mbps	<p style="text-align: center;">High-Capacity Hot-Spot</p>  <ul style="list-style-type: none">• User experienced data rate: 1 Gbps• Peak data rate: Tens of Gbps• Traffic volume density: Tens of Tbps/km²
--	---

Mainly for IoT (new scenarios)

<p style="text-align: center;">Low-Latency High-Reliability</p>  <ul style="list-style-type: none">• Air interface latency: 1 ms• Reliability: nearly 100%	<p style="text-align: center;">Low-Power Massive-Connections</p>  <ul style="list-style-type: none">• Connection density: 10⁶ / km²• Ultra-low power consumption/Ultra-low cost
---	---

Εικόνα 54: Στόχοι-Προδιαγραφές του 5G [48].

Στη συγκεκριμένη εργασία, καταγράφηκε ο δρόμος που διανύθηκε από την εισαγωγή του 4G (R8) μέχρι και ένα βήμα πριν από το 5G. Ουσιαστικά, καλύφθηκε η όλη διαδρομή του 4G, μια διαδρομή γεμάτη συνεχείς προσπάθειες, βελτιώσεις, αναθεωρήσεις, προβλέψεις και καινοτομίες.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μας δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσουμε μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες αιχμής του καιρού μας. Γνωρίζοντάς την και ταξιδεύοντας στο παρελθόν της, συνειδητοποιήσαμε το ότι, για να είναι μια τεχνολογική λύση επιτυχημένη, πρέπει να συνδυάζει την καινοτομία με την συμβατότητα με παλαιότερες λύσεις, την ικανοποίηση νέων αναγκών, την υψηλή τεχνολογία με την ευκολία υλοποίησης από τους παρόχους αλλά και τους τελικούς χρήστες, τα άλματα προς τα εμπρός με τη συνέχεια στον χρόνο. Επιπλέον, μας έγινε ξεκάθαρο πως, για την παραγωγή καινοτομίας απαιτούνται χρόνια συντονισμένων και επίπονων προσπαθειών και αφοσίωσης στον στόχο. Επιπρόσθετα, η προσπάθεια πρέπει να είναι συνεχής: ποτέ η πρώτη προσπάθεια δεν είναι ολοκληρωμένη, αλλά χρειάζονται συνεχείς βελτιώσεις, οι οποίες προκύπτουν από την εμπειρία, την καλύτερη γνώση, την πρόοδο της τεχνολογίας και τις καινούριες ανάγκες. Μην ξεχνάμε πως η ανάγκη για νέες τεχνολογίες είναι αυτοτροφοδοτούμενη: κάθε νέα τεχνολογία δημιουργεί καινούριες απαιτήσεις και πυροδοτεί καινούριες ανάγκες, που κανένας δεν είχε σκεφτεί ως τότε. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι και η ανάγκη για καλή προετοιμασία και για πρόβλεψη των αναγκών του μέλλοντος. Παρόλο που το 4G μπήκε στα σκαριά στις αρχές του αιώνα, δεν έχει γνωρίσει ακόμα την πλήρη άνθησή του, ενώ η επόμενη γενιά (5G) είναι εδώ και χρόνια αντικείμενο μελέτης.

Συνεπώς, το μέλλον είναι πάντα μία πρόκληση: μπορεί το LTE να έχει φέρει την επανάσταση στις κινητές επικοινωνίες, αλλά η επανάσταση θα πρέπει να είναι διαρκής, για να έχει μέλλον.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Reliability	Αξιοπιστία
Editor	Επιμελητής
Recommendations	Υποδείξεις
Release	Έκδοση
Frozen	Παγιώθηκε
Capacity	Χωρητικότητα
Operator	Χειριστής
3G Systems	Συστήματα 3ης Γενιάς
4G Systems	Συστήματα 4ης Γενιάς
Mobile Broadband Systems	Συστήματα κινητής τηλεφωνίας ευρείας ζώνης
Spectral efficiency	Φασματική αποδοτικότητα
Multicast	Πολυεκπομπή
Little cell enhancement	Βελτιώσεις σε επίπεδο μικρών κελιών
Standardization	Προτυποποίησης
Requirements	Απαιτήσεις
Architecture	Αρχιτεκτονική
Detailed specification	Λεπτομερή χαρακτηριστικά
Testing and verification	Δοκιμή και επαλήθευση
Physical layer	Φυσικό επίπεδο
Link layer	Επίπεδο διαύλου
System architecture	Αρχιτεκτονική συστήματος
Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ορθογώνια Πολύπλεξη στη Συχνότητα
Downstream	Καθοδική ροή
Upstream	Ανοδική ροή
Flat fading	Επίπεδη απόσβεση
InterSymbol Interference	Διασυμβολική παρεμβολή
Inverse Fast Fourier Transform	Αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier
Guard Interval	Χρόνος φύλαξης
Robustness to multipath	Εύρωση μετάδοσης μέσω πολλαπλών διαδρομών
Cell	Κυψέλη
Frequency offset	Μετατόπιση συχνότητας
Peak-to-average power ratio	Λόγος μέγιστης προς μέσης ισχύος
Single Carrier – Frequency Division Multiplexing Access	Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με πολύπλεξη στη συχνότητα και χρήση ενός φορέα
Frames	Πλαίσια
Slots	Σχισμές
Extended cyclic prefix	Εκτεταμένου κυκλικού προθέματος
Normal cyclic prefix	Κανονικού κυκλικού προθέματος
Sub-carrier spacing	Απόστασης μεταξύ των υπο-φερουσών
Coherence bandwidth	Εύρος ζώνης συνοχής
Resource Block	Μπλόκ πόρων
Resource Element	Στοιχείο πόρων
Channel estimation	Εκτίμηση καναλιού
Reference symbols	Σύμβολα αναφοράς
Access network	Δίκτυο πρόσβασης
Core network	Πυρήνας δικτύου

User plane protocol stack	Πρωτόκολλο σε επίπεδο χρήστη
Control plane protocol stack	Πρωτόκολλο σε επίπεδο ελέγχου
Protocol stack	Σωρός πρωτοκόλλων
User Interface	Τερματικές συσκευές
Handover	Διαχείριση μεταγωγής
Seamless handover	Απρόσκοπτη μεταγωγή
Lossless handover	Αναπωλειακή μεταγωγή
Transparent Mode	Διαφανής τρόπος
Unacknowledged Mode	Τρόπος μετάδοσης χωρίς αναγνώριση λήψης
Acknowledged mode	Τρόπος μετάδοσης με αναγνώριση λήψης
Random access procedure	Διαδικασία τυχαίας προσπέλασης
Random access preambles	Ακολουθίες προθέματος τυχαίας προσπέλασης
Contention resolution	Επίλυση σύγκρουσης
Timing advance	Εκ των προτέρων χρονισμός
Discontinuous Reception	Ασυνεχούς λήψης
Buffer	Μνήμη
Logical channels	Λογικά κανάλια
Transport channels	Κανάλια μετάδοσης δεδομένων του φυσικού επιπέδου
State	Κατάσταση
Idle mode	Κατάσταση αδράνειας
Connected mode	Κατάσταση σύνδεσης
Broadcasting	Εκπομπή
Mobility	Κινητικότητας
Authentication	Έλεγχο ταυτότητας
Signaling connectivity	Κατάσταση συνδεσιμότητας
Positioning	Εύρεσης τοποθεσίας
Multi-carrier	Πολλαπλών φερουσών
Time dispersive	Χρονικής διασποράς
Spatial selectivity	Χωρικής επιλεκτικότητας
Single-layer	Ενός επιπέδου
User-specific	Ανάλογα με τον χρήστη
Beam	Δέσμη του σήματος εκπομπής
Precoding	Προ-κωδικοποίηση
UE specific	Για τον συγκεκριμένο UE
Access point	Σημείο πρόσβασης
Cell edge	Όρια της κυψέλης
Relay nodes	Ενδιάμεσοι κόμβοι
Frequency diversity	Διαφορικότητα στη συχνότητα
Band	Ζώνη συχνοτήτων
Intra-band	Ενδο-ζωνική
Non-contiguous	Ασυνεχής
Serving cell	Κυψέλη εξυπηρέτησης
Transmission Modes	Τρόποι μετάδοσης
Codebook	Βιβλίο κωδικών
Non-carrier aggregation based	Μη βασιζόμενο σε προσθήκη φέρουσας
Power allocation scheme	Σχήματα ανάθεσης ισχύος
Enhanced small cells	Βελτιώσεις στις μικρές κυψέλες
Traffic	Κίνηση
Dual connectivity	Διαδική συνδεσιμότητα
Integration	Ολοκλήρωση

Narrowband	Στενής ζώνης
Networked society	Δικτυωμένη κοινωνία
Licensing	Αδειοδότησης
Licensed spectrum	Αδειοδοτημένο φάσμα
Unlicensed spectrum	Μη αδειοδοτημένο φάσμα
Primary carrier	Βασική φέρουσα
Secondary carrier	Δευτερεύουσα φέρουσα
Interval	Χρονικού διαστήματος
Mission Critical Enhancements	Ενίσχυση των παραγόντων ύψιστης σημασίας
Fast uplink access	Γρήγορης πρόσβασης ανοδικής ροής

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
3GPP	3rd Generation Partnership Project
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network
3G	Third generation
4G	Fourth Generation
ITU	International Telecommunication Union
IMT	
Mbps	Megabits per second
ms	Millisecond
TDD	Time Division Duplex
FDD	Frequency Division Duplex
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ISI	InterSymbol Interference
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
SC – FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiplexing Access
RB	Resource Block
RE	Resource Element
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
PDCP	Packet Data Convergence Protocol Layer
RLC	Radio Link Control Layer
MAC	Medium Access Control Layer
ROHC	Robust Header Compression
TB	Transport Blocks
TM	Transparent Mode
UM	Unacknowledged Mode
AM	Acknowledged mode
SDU	Service Data Unit
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ACKs	acknowledgements
DRX	Discontinooous Reception
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
SAW	Stop And Wait

MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
RRC	Radio Resource Control
SIB	System Information Block
MIB	Master Information Block
MME	Mobility Management Entity
EMM	EPS Mobility Management
ECM	EPS Connection Management
HeNB	Home eNodeB
PWS	Public Warning System
SON	Self Organising Network
multi-RAT	multi-Radio Access Technology
SFN	Single Frequency Network
BM-SC	Broadcast/Multicast Service Center
MBMS GW	MBMS Gateway
MCE	Multi-cell/Multicast Coordination Entity
LCS	Location Service
LPP	LTE Positioning Protocol
LPPa	LTE Positioning Protocol Annex
OTDOA	Observed Time Difference of Arrival
BF	beamforming
ETWS	Earthquake and Tsunami Warning Systems
MSR	Multi Standard Radio
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carriers
PSC	Primary Serving Cell
SSC	Secondary Serving Cells
MIMO	Multiple Input Multiple Output
CRS	Cell-Specific Reference Signals
DM-RS	Demodulation Reference Signals
DeNB	Donor eNodeB
CoMP	Coordinated Multi-Point
FeICIC	Non-carrier aggregation based eICIC
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio
eICIC	enhanced ICIC

HetNet	Heterogenous Networks
ABS	Almost Blank Subframe
PDSCH	Physical Downlink Shared CHannel
ProSe	Proximity service
AAS	Active Antenna Systems
RDN	Radio Distribution Network
MTC	Machine Type Communication
LAA	Licensed Assisted Access
QoS	Quality of Service
MC	Mission Critical
V2X	Vehicle-to-Everything

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] E. Dahlman et al., 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, 2nd edition, Academic Press, 2008.
- [2] A. Larmo et al., “ The LTE Link Layer Design,” IEEE Communications Magazine, April 2009
- [3] D. Astely et al., “LTE: The Evolution of Mobile Broadband”, IEEE Communications Magazine, April 2009.
- [4] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte> [Προσπελάστηκε 22/04/2017].
- [5] <http://www.3gpp.org/about-3gpp> [Προσπελάστηκε 22/04/2017].
- [6] Dr Stefan Parkvall, *3G Evolution – HSPA and LTE for Mobile Broadband Part I*, Ericsson Internal, 2009; <http://www.cs.csubak.edu/~hmehr/Mobile%20Broadband%20-%20Part%20I.pdf>
- [7] E. Dahlman et al., 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, 2nd edition, Academic Press, 2014
- [8] C. Hoymann et al., “A Lean Carrier for LTE”, IEEE Communications Magazine, February 2013
- [9] A. Khandekar et al., “LTE-Advanced: Heterogeneous Networks”, 2010 european Wireless Conference proceedings, pp 978-982
- [10] 4G Americas, *Mobile Broadband Evolution Towards 5G: Rel-12 & Rel-13 and Beyond*, June 2015; http://www.5gamericas.org/files/6214/3569/1603/4G_Americas_Mobile_Broadband_Evolution_Toward_5G-Rel-12_Rel-13_June_2015.pdf
- [11] Preben E. Mogensen et al., “LTE-Advanced: The Path towards Gigabit/s in Wireless Mobile Communications”, Wireless VITAE'09, pp 147-151
- [12] Telesystem Innovations, *LTE in a Nutshell: System Overview*, 2010
- [13] Telesystem Innovations, *LTE in a Nutshell: Protocol Architecture*, 2010
- [14] Telesystem Innovations, *LTE in a Nutshell: The Physical Layer*, 2010
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_bandwidth [Προσπελάστηκε 07/06/2017].
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Protocol_data_unit [Προσπελάστηκε 07/06/2017].
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Service_data_unit [Προσπελάστηκε 07/06/2017].
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_repeat_request [Προσπελάστηκε 07/06/2017].
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/User_equipment [Προσπελάστηκε 07/06/2017].
- [20] <https://www.eventhelix.com/lte/random-access-procedure/lte-random-access-procedure.pdf>
- [21] Mohamed Sami M. Yousef et al., “Design and Simulation of Random Access Procedure in LTE”, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Volume 110 – No. 16, January 2015.
- [22] <http://allabtite.blogspot.gr/2013/12/all-about-timing-advanceta.html>
- [23] <https://image.slidesharecdn.com/energymanagementissuesinlte-150422015350-conversion-gate02/95/energy-management-issues-in-ltepptx-14-638.jpg?cb=1429668565> [Προσπελάστηκε 16/06/2017].
- [24] http://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_HARQ.html [Προσπελάστηκε 13/06/2017].
- [25] <http://lteinwireless.blogspot.gr/2012/03/harq-in-lte.html> [Προσπελάστηκε 13/06/2017].
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Multimedia_Broadcast_Multicast_Service [Προσπελάστηκε 17/06/2017].
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Multicast-broadcast_single-frequency_network [Προσπελάστηκε 17/06/2017].
- [28] <https://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA> [Προσπελάστηκε 17/06/2017].
- [29] <http://www.rcrwireless.com/20140509/diameter-signaling-controller-dsc/lte-mme-epc> [Προσπελάστηκε 25/06/2017].
- [30] <http://www.lteandbeyond.com/2012/12/EMM-ECM-eps-mobility-management-and-connection-management.html> [Προσπελάστηκε 25/06/2017].
- [31] Rohde & Schwarz, *LTE Release 9 Technology Introduction*, White Paper, 1MA191, December 2011
- [32] <http://www.unwiredinsight.com/2012/3gpp-lte-releases> [Προσπελάστηκε 25/06/2017].
- [33] Rohde & Schwarz, *Testing LTE Release 9 Features*, Application Note, 1MA210, April 2013

- [34] Preben E. Mogensen et al., "LTE-Advanced: The Path towards Gigabit/s in Wireless Mobile Communications", Wireless VITAE'09, 978-1-4244-4067, pp 147-151, 2009
- [35] Jeanette Wannstrom, *LTE-Advanced*, 3GPP, May 2012
- [36] 4G Americas, *3GPP Release 11: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements*, August 2013
- [37] Rohde & Schwarz, *LTE - Advanced (3GPP Rel.11) Technology Introduction*, White Paper, 1MA232, July 2013
- [38] https://www.slideshare.net/SCU_ECE_Staff/mohamed-mimo-comp [Προσπελάστηκε 03/07/2017].
- [39] 4G Americas, *Understanding 3GPP Release 12 Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements*, 3GPP Release 12 Executive Summary, February 2015
- [40] <http://www.unwiredinsight.com/2014/highlights-of-3gpp-release-12> [Προσπελάστηκε 03/07/2017].
- [41] <http://www.simpletechpost.com/2012/06/icic-and-eicic.html> [Προσπελάστηκε 03/07/2017].
- [42] <http://www.unwiredinsight.com/2013/enhanced-small-cells> [Προσπελάστηκε 03/07/2017].
- [43] NOKIA, *LTE Release 12 and Beyond*, Nokia Networks white paper
- [44] http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1614-sa_5g [Προσπελάστηκε 12/07/2017].
- [45] 4G Americas, *Inside 3GPP Release 13: Understanding the Standards for LTE-Advanced Enhancements 2016 Update*, EXECUTIVE SUMMARY, 2016
- [46] 4G Americas, *Mobile Broadband Evolution Towards 5G: 3GPP Rel-12 & Rel-13 and Beyond*, June 2015
- [47] Shin-Lin Shieh, *Introduction to Multi-User Superposition Transmission (MUST) in 3GPP LTE-A*, Department of Communication Engineering, National Taipei University
- [48] Ericsson White paper, *LTE Release 13*, Uen 284 23-8267, April 2015
- [49] <https://www.ericsson.com/en/networked-society> [Προσπελάστηκε 21/07/2017].
- [50] https://en.wikipedia.org/wiki/Networked_Society [Προσπελάστηκε 21/07/2017].
- [51] <http://blog.3g4g.co.uk/search/label/Release%2013> [Προσπελάστηκε 21/07/2017].
- [52] <https://www.iotaustralia.org.au/2016/11/04/iotnewanz/ericsson-readies-telstra-iot-cat-m1-demo/> [Προσπελάστηκε 23/07/2017].
- [53] <https://i.ytimg.com/vi/WYLL0jeUp94/maxresdefault.jpg> [Προσπελάστηκε 23/07/2017].
- [54] <http://www.3gpp.org/release-14> [Προσπελάστηκε 23/07/2017].
- [55] <https://www.ericsson.com/en/publications/ericsson-technology-review/archive/2017/evolving-lte-to-fit-the-5g-future> [Προσπελάστηκε 23/07/2017].
- [56] <https://www.ericsson.com/research-blog/release-14-the-start-of-5g-standardization/> [Προσπελάστηκε 27/07/2017].
- [57] <http://blog.3g4g.co.uk/search/label/Release%2014> [Προσπελάστηκε 27/07/2017].
- [58] <https://www.slideshare.net/yihshuehsai/lte-release-13-and-smarter-road-towards-5g> [Προσπελάστηκε 28/07/2017].