



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιολόγηση ποιότητας εμπειρίας VoIP κλήσεων
σε LTE δίκτυα δύο επιπέδων**

Κωνσταντίνα Ε. Χουρδάκη

Επιβλέπων: **Λάζαρος Μεράκος**, Καθηγητής Τμήματος Πληροφορικής και
Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αξιολόγηση ποιότητας εμπειρίας VoIP κλήσεων σε LTE δίκτυα δύο επιπέδων

Κωνσταντίνα Ε. Χουρδάκη

A.M.: ΜΟΠ292

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: **Λάζαρος Μεράκος**, Καθηγητής Τμήματος Πληροφορικής και
Τηλεπικοινωνιών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Οκτώβριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα 2ης και 3ης Γενιάς έχουν πλέον γίνει αρκετά δημοφιλή παγκοσμίως, γεγονός που συνεπάγεται την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών. Το πρότυπο LTE-Advanced αναμένεται να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις εν λόγω ανάγκες εισάγοντας πολλές καινοτομίες που την διαφοροποιούν από τις προηγούμενες. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE-Advanced είναι η υποστήριξη Ετερογενών Δικτύων η οποία σηματοδοτεί μια αλλαγή παραδείγματος από την παραδοσιακή αντίληψη του ομογενούς δικτύου που βασίζεται στις μακροκυψέλες (macrocells) σε πιο ευέλικτες υλοποιήσεις με τη συμμετοχή κόμβων χαμηλής ισχύος όπως οι φεμτοκυψέλες (femtocells).

Τα femtocells αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση που θα επιτρέψει τη βελτίωση της κάλυψης του δικτύου, ιδιαίτερα στο εσωτερικό των σπιτιών και των κτιρίων και την παροχή υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη των femtocells έχει να αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις όπως τη διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells ή μεταξύ femtocell και macrocell.

Η ποιότητα ομιλίας που απολαμβάνει ο χρήστης της υπηρεσίας φωνής μπορεί να υποβαθμιστεί σημαντικά από τις παρεμβολές και γι' αυτό οι πάροχοι εστιάζουν στη συνεχή βελτίωσή της. Είναι συνεπώς απαραίτητη η αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας που αντιπροσωπεύεται από τη μέση γνωμοβαθμολογία, είτε με υποκειμενικές είτε με αντικειμενικές μεθόδους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο τη μελέτη των επιπτώσεων που έχει η ανάπτυξη των femtocells στην ποιότητα εμπειρίας των χρηστών τηλεφωνίας μέσω IP (VoIP). Για το σκοπό της εργασίας διεξάγεται προσομοίωση ενός δικτύου LTE με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab και μελετάται η συσχέτιση της εκτιμώμενης ποιότητας εμπειρίας της υπηρεσίας VoIP με παράγοντες όπως το πλήθος, η ταχύτητα και το φορτίο των χρηστών. Επίσης, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση ποιότητας ομιλίας VoIP μεταξύ σεναρίων με αλλά και χωρίς τη συμμετοχή femtocells. Τέλος, εξάγονται γενικά συμπεράσματα για τον αντίκτυπο που έχει η εισαγωγή femtocells στο δίκτυο στην εκτιμώμενη ποιότητα εμπειρίας, ενώ προτείνονται πεδία για μελλοντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Κυψελωτά Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ποιότητα υπηρεσίας, ποιότητα εμπειρίας, φεμτοκυψέλες, τηλεφωνία μέσω IP, μέση γνωμοβαθμολογία

ABSTRACT

2nd and 3rd Generation wireless cellular networks have become very popular worldwide, which implies an increasing need for higher data rates and improved service quality. The LTE-Advanced standard is expected to effectively address these needs by introducing innovations which distinguish it from its predecessors. One of the key features of LTE-Advanced is the support for Heterogeneous Networks, which is considered as a paradigm shift from the traditional approach of a homogeneous network based on macrocells to more flexible implementations including low power nodes such as femtocells.

Femtocells are a promising solution which will improve the network coverage, especially in the interiors of houses and buildings and will provide high-speed data rates. However, femtocells deployment faces major challenges such as interference management between neighboring femtocells or between femtocell and macrocell.

Voice quality as perceived by the user can be severely degraded due to interference and therefore operators focus on continuous quality improvement. Consequently it is crucial to evaluate speech quality in terms of mean opinion score (MOS), either by subjective or objective methods.

The purpose of this Master thesis is to study the impact of femtocells deployment on quality of experience of a VoIP user. In order to achieve this goal, we conduct an LTE network simulation using the Matlab software and study the relationship between the estimated VoIP quality and factors like the number of users, the speed and the traffic load. Furthermore, we develop a comparative analysis in VoIP speech quality between scenarios which do or do not include femtocells. Finally, we draw general conclusions regarding the impact of introducing femtocells on the estimated quality of experience, and provide possible areas for future work.

SUBJECT AREA: Mobile Cellular Networks

KEYWORDS: Quality of Service (QoS), Quality of Experience (QoE), femtocells, Voice over IP (VoIP), Mean Opinion Score (MOS)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Λάζαρο Μεράκο, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον αντικείμενο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νίκο Πασσά, διδάκτορα του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για τη σημαντική βοήθεια που μου παρείχε στο στάδιο επιλογής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Δημήτρη Τσόλκα για την πολύτιμη βοήθεια, την επιστημονική υποστήριξη και τη συμβουλευτική καθοδήγησή του.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς και τον αδελφό μου για την αμέριστη ψυχολογική στήριξη που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	19
1.1 Κυψελωτά συστήματα 1 ^{ης} , 2 ^{ης} και 3 ^{ης} γενιάς.....	19
1.2 Το LTE-Advanced ως τεχνολογία 4 ^{ης} γενιάς	20
1.2.1 Συνάθροιση Φερουσών (Carrier Aggregation)	22
1.2.2 Συντονισμένη Εκπομπή και Λήψη Πολλαπλών Σημείων (CoMP)	23
2. ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ (HETNETS)	25
2.1 Η παραδοσιακή προσέγγιση στην ανάπτυξη δικτύου.....	25
2.2 Η προσέγγιση των Ετερογενών Δικτύων (HetNets).....	25
2.3 Κρίσιμα θέματα στην ανάπτυξη των HetNets	27
2.3.1 Αυτο-Οργάνωση (Self-Organization)	28
2.3.2 Οπισθόζευξη (Backhaul)	28
2.3.3 Μεταπομπές (Handovers).....	28
2.3.4 Παρεμβολές (Interference).....	29
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ FEMTOCELLS ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE/LTE-ADVANCED	31
3.1 Επισκόπηση των femtocells	31
3.2 Οφέλη από τη χρήση των femtocells	32
3.3 Προκλήσεις στην ανάπτυξη των femtocells	33
3.3.1 Προβλήματα παρεμβολών σε δίκτυα femtocells	33
3.3.1.1 Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών (ICIC)	35
3.3.1.2 Ενισχυμένος Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών (eICIC)	36
3.3.1.3 Προσεγγίσεις για τη διαχείριση των παρεμβολών	39
3.3.2 Προκλήσεις σε τεχνικό, οικονομικό και θεσμικό επίπεδο.....	42
4. ΥΠΗΡΕΣΙΑ VOIP ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE/LTE-ADVANCED	45
4.1 Αλγόριθμοι κωδικοποίησης φωνής για VoIP	45
4.2 Απαιτήσεις VoIP.....	46
4.3 Επιλογές για την παροχή VoIP μέσω LTE	48

4.3.1	Φωνή μέσω LTE (VoLTE)	49
4.4	Κρίσιμα ζητήματα για την υπηρεσία VoIP μέσω LTE	50
5.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	53
5.1	Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)	53
5.2	Ποιότητα Εμπειρίας (QoE)	54
5.3	Σχέση μεταξύ ποιότητας υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας	56
5.4	Υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας με χρήση της Μέσης Γνωμοβαθμολογίας (MOS)	59
5.5	Αντικειμενικές μέθοδοι αξιολόγησης της ποιότητας ομιλίας	60
5.5.1	Μοντέλο E	61
6.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ VOIP ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE	67
6.1	Υλοποίηση δικτύου χωρίς τη συμμετοχή femtocells	69
6.2	Υλοποίηση δικτύου με τη συμμετοχή femtocells	71
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	75
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	77
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	81
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Πρόβλεψη femtocell χρηστών [26]	32
Σχήμα 2. Απαιτήσεις καθυστέρησης από στόμα προς αυτί [33]	46
Σχήμα 3. Ιεράρχηση των συνιστωσών ποιότητας υπηρεσίας	53
Σχήμα 4. Χρηστοκεντρικές κατηγορίες QoS	54
Σχήμα 5. Οι διαστάσεις της ποιότητας εμπειρίας	55
Σχήμα 6. Γενική αλληλεξάρτηση μεταξύ QoE και QoS	58
Σχήμα 7. Εκθετική εκτίμηση της εξάρτησης της QoE από την P_{loss}	58
Σχήμα 8. Η MOS συναρτήσει του παράγοντα R	64
Σχήμα 9. Οι κλάσεις ικανοποίησης χρηστών και οι σχετικές κλίμακες των παραγόντων R και MOS	64
Σχήμα 10. Η MOS συναρτήσει της καθυστέρησης	69
Σχήμα 11. Η MOS συναρτήσει του ρυθμού απώλειας πακέτων	69
Σχήμα 12. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells	70
Σχήμα 13. Η MOS συναρτήσει της ταχύτητας χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells	71
Σχήμα 14. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP και μιας best effort εφαρμογής στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells	71
Σχήμα 15. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP (50% HUEs) στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells	72
Σχήμα 16. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP (100% HUEs) στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells	72
Σχήμα 17. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells για διαφορετικές πυκνότητες femtocells	73
Σχήμα 18. Συγκριτική απεικόνιση της MOS για διάφορα ποσοστά διείσδυσης femtocells	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Συνάθροιση φερουσών [22]	23
Εικόνα 2. Τεχνολογίες CoMP κάτω ζεύξης [21]	24
Εικόνα 3. Τεχνολογία CoMP άνω ζεύξης [21]	24
Εικόνα 4. Οι κόμβοι και οι διεπαφές ενός ετερογενούς δικτύου [4]	26
Εικόνα 5. Σενάρια παρεμβολών σε OFDMA δίκτυα femtocells	34
Εικόνα 6. Τεχνικές συντονισμού διακυψελικών παρεμβολών	37
Εικόνα 7. Προσεγγίσεις ελέγχου ισχύος [5]	41
Εικόνα 8. Πηγές υποβάθμισης της ποιότητας φωνής	56
Εικόνα 9. Σύνδεση αναφοράς του μοντέλου E	62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύγκριση ρυθμών μετάδοσης μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών 2 ^{ης} και 3 ^{ης} γενιάς.....	20
Πίνακας 2. Τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE-Advanced και οι απαιτήσεις του IMT-Advanced.....	21
Πίνακας 3. Προδιαγραφές διαφόρων στοιχείων σε ένα HetNet	27
Πίνακας 4. Στόχοι επίδοσης για εφαρμογές ήχου	54
Πίνακας 5. Κλίμακα υποκειμενικής αξιολόγησης ACR.....	60
Πίνακας 6. Παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του μοντέλου E	65
Πίνακας 7. Ρυθμίσεις παραμέτρων προσομοίωσης.....	68

1. ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 Κυψελωτά συστήματα 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς

Τα ασύρματα συστήματα κινητών επικοινωνιών αναπτύσσονται από τα μέσα της δεκαετίας 1940 [31]. Τα αναλογικά κυψελωτά συστήματα, γνωστά και ως συστήματα 1^{ης} γενιάς (π.χ. NMT, AMPS, TACS), παρείχαν μόνο υπηρεσίες φωνής και η εκμετάλλευσή τους άρχισε στο τέλος της δεκαετίας του '70 και στις αρχές του '80. Τα 1G συστήματα βασίζονταν στην αναλογική διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation-FM) και στην τεχνική διαίρεσης συχνότητας FDD (Frequency Division Duplex).

Τα βήματα εξέλιξης που ακολουθήθηκαν στα κυψελωτά συστήματα είναι η μετάβαση σε ψηφιακή μετάδοση και η βελτίωση των διαδικασιών ελέγχου ώστε η εγκατάσταση των κλήσεων και οι μεταπομπές να γίνονται με πιο αποτελεσματικό τρόπο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση των κυψελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς (2G), τα οποία βασίζονται όλα σε ψηφιακές τεχνικές.

Ο σημαντικότερος εκπρόσωπος των 2G, που αποτελεί και το πλέον επιτυχημένο κυψελωτό σύστημα παγκοσμίως, είναι το σύστημα GSM (Global System for Mobile Communications). Σχεδιάστηκε από τον ευρωπαϊκό οργανισμό προτυποποίησης ETSI και υλοποιήθηκε εξολοκλήρου στην Ευρώπη. Η σχεδιάσή του ξεκίνησε το 1982 ως πανευρωπαϊκή προδιαγραφή και λειτούργησε το 1992 ως το πρώτο ψηφιακό κυψελωτό σύστημα. Υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής (13 kbps) και δεδομένων έως 9.6 kbps με τη χρήση της τεχνολογίας TDMA (Time Division Multiple Access).

Παρά την καλή ποιότητα φωνής, η υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων είναι περιορισμένη στα 2G συστήματα. Γι' αυτό αναπτύχθηκαν τα συστήματα 2.5G, αναβαθμίζοντας τις δυνατότητες των 2G και επιτυγχάνοντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το GPRS (General Packet Radio System), το οποίο υποστηρίζει υπηρεσίες δεδομένων με τεχνολογία μεταγωγής πακέτων και το EDGE (Enhanced Data for Global Evolution), το οποίο θεωρείται μετεξέλιξη του GPRS.

Η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και βίντεο πραγματικού χρόνου (εφαρμογές πολυμέσων) ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες οδήγησε στα συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G). Ο σπουδαιότερος εκπρόσωπος είναι το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), που χρησιμοποιεί τεχνολογία WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) και έχει εξαπλωθεί παγκοσμίως.

Τα εξελιγμένα συστήματα για το UMTS, όπως το HSPA (High Speed Packet Access) και το HSPA+ που ορίστηκαν στις Εκδόσεις 5, 6 και 7 του 3GPP (3rd Generation Partnership Project), εισάγουν ορισμένες βελτιώσεις στις υπηρεσίες δεδομένων όπως η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, η αύξηση της χωρητικότητας και η μείωση της καθυστέρησης [22].

Το 3GPP περιγράφει στην Έκδοση 8 την τεχνολογία LTE (Long Term Evolution), η οποία θα επιτρέψει την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερου ρυθμού μετάδοσης σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Για το σκοπό αυτό, το LTE χρησιμοποιεί την ευέλικτη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA) στην κάτω ζεύξη και μια παραλλαγή της στην άνω ζεύξη.

Η βασική αρχή της ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) είναι η διαίρεση μιας ροής δεδομένων υψηλού ρυθμού σε έναν αριθμό παράλληλων ροών χαμηλού ρυθμού, όπου κάθε ροή είναι σήμα στενής ζώνης που μεταδίδεται από ένα υπο-φέρον. Οι διαφορετικές αυτές ροές

παράγονται στο πεδίο της συχνότητας και στη συνέχεια συνδυάζονται για να σχηματίσουν μια ευρυζωνική ροή, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που ονομάζεται αντίστροφος ταχύς μετασχηματισμός Fourier (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT). Στο LTE, τα υπο-φέροντα έχουν απόσταση 15 kHz μεταξύ τους, ανεξάρτητα από το συνολικό εύρος ζώνης του καναλιού. Ο αριθμός των υπο-φερόντων κυμαίνεται από 72 σε ένα κανάλι 1.4 MHz μέχρι 1200 σε ένα κανάλι 20 MHz.

Το σύνθετο σήμα που ελήφθη μετά τον IFFT επεκτείνεται, με την επανάληψη του αρχικού τμήματος του σήματος που αποτελεί ένα διάστημα φύλαξης (Κυκλικό Πρόθεμα [Cyclic Prefix-CP]). Το αποτέλεσμα είναι σχεδόν πλήρης εξάλειψη της διασυμβολικής παρεμβολής, η οποία διαφορετικά καθιστά προβληματικές τις υψηλού ρυθμού μεταδόσεις δεδομένων. Το σύστημα ονομάζεται ορθογώνιο, επειδή τα υπο-φέροντα παράγονται στο πεδίο της συχνότητας (που τα καθιστά εγγενώς ορθογώνια) και ο IFFT διατηρεί αυτό το χαρακτηριστικό. Τα OFDM συστήματα μπορεί να χάσουν την ορθογώνια φύση τους, ως αποτέλεσμα της ολίσθησης Doppler που προκαλείται από την ταχύτητα του πομπού ή του δέκτη.

Η ιδιότητα της πολλαπλής πρόσβασης του OFDMA προέρχεται από τη δυνατότητα να αναθέσει σε διαφορετικούς χρήστες διαφορετικά υπο-φέροντα με την πάροδο του χρόνου. Ένα ελάχιστο μπλοκ πόρων (Resource Block-RB), που το σύστημα μπορεί να αποδώσει σε μια μετάδοση χρήστη, αποτελείται από 12 υπο-φέροντα και 14 σύμβολα σε 1 ms. Ελέγχοντας ποια υπο-φέροντα θα αποδοθούν σε ποιους τομείς (sectors), το LTE μπορεί να ελέγχει εύκολα την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας.

Πίνακας 1. Σύγκριση ρυθμών μετάδοσης μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς

Τεχνολογία	Τύπος πολλαπλής πρόσβασης	Τυπικός ρυθμός δεδομένων κάτω ζεύξης	Τυπικός ρυθμός δεδομένων άνω ζεύξης
GSM	TDMA	9.6 kbps	9.6 kbps
EDGE	TDMA	70-130 kbps	70-130 kbps
Evolved EDGE	TDMA	150-500 kbps	100-500 kbps
UMTS	WCDMA	200-300 kbps	200-300 kbps
HSPA	WCDMA	1-4 Mbps	0.5-2 Mbps
HSPA+	WCDMA	>5 Mbps	>3 Mbps
LTE	OFDMA	>10 Mbps	>5 Mbps

1.2 Το LTE-Advanced ως τεχνολογία 4^{ης} γενιάς

Το LTE-Advanced είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για την έκδοση του LTE που απευθύνεται στις απαιτήσεις του IMT-Advanced, όπως ορίζονται στην Έκδοση 10 [22]. Η ITU επικύρωσε το LTE-Advanced ως IMT-Advanced το Νοέμβριο του 2010 καθώς πληρούσε τις προδιαγραφές. Το LTE-Advanced είναι συμβατό προς τα πίσω και προς τα εμπρός με το LTE, δηλαδή οι LTE συσκευές θα λειτουργούν σε νεότερα LTE-Advanced δίκτυα και οι LTE-Advanced συσκευές θα λειτουργούν σε παλαιότερα δίκτυα LTE.

Το LTE-Advanced υπόσχεται υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (1Gbps για κάτω ζεύξη και 500Mbps για άνω ζεύξη) καθώς και μια πληθώρα άλλων καινοτόμων χαρακτηριστικών όπως:

- Υποστήριξη μεγαλύτερου εύρους ζώνης μέσω συνάθροισης φερουσών (carrier aggregation)

- Χωρική πολυπλεξία κάτω ζεύξης χρησιμοποιώντας έως και οχτώ επίπεδα πολλαπλής εισόδου - πολλαπλής εξόδου (Multiple Input Multiple Output-MIMO 8x8)
- Χωρική πολυπλεξία άνω ζεύξης χρησιμοποιώντας έως και τέσσερα επίπεδα MIMO (4x4)
- Συντονισμένη εκπομπή και λήψη πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi Point-CoMP Transmission/Reception)
- Υποστήριξη ετερογενών δικτύων (Heterogeneous Networks-HetNets) συμπεριλαμβανομένου του ενισχυμένου συντονισμού διακυβελικών παρεμβολών (enhanced InterCell Interference Coordination-eICIC)
- Αναμεταδότες (relays)

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με αντιπαραβολή των κύριων χαρακτηριστικών του LTE-Advanced και των απαιτήσεων της ITU-R (IMT-Advanced) [21].

Πίνακας 2. Τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE-Advanced και οι απαιτήσεις του IMT-Advanced

	Απαιτήσεις IMT-Advanced		LTE-Advanced	
	Κάτω ζεύξη	Άνω ζεύξη	Κάτω ζεύξη	Άνω ζεύξη
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων (Mbps)	100 για υψηλή κινητικότητα και 1000 για χαμηλή κινητικότητα (4x4 MIMO)	100 για υψηλή κινητικότητα και 1000 για χαμηλή κινητικότητα (2x4 MIMO)	1000 (χαμηλή κινητικότητα, 8x8 MIMO)	500 (χαμηλή κινητικότητα, 4x4 MIMO)
Εύρος ζώνης	Έως 40MHz	Έως 40MHz	Έως 100MHz	Έως 100MHz
Μέγιστη φασματική απόδοση	15 bps/Hz	6.75 bps/Hz	30 bps/Hz	15 bps/Hz
Μέση φασματική απόδοση (bps/Hz/κυψέλη)	2.2 (4x2 MIMO)	1.4 (2x4 MIMO)	2.4 (2x2 MIMO) 2.6 (4x2 MIMO) 3.7 (4x4 MIMO)	1.2 (1x2 SIMO) 2.0 (2x4 MIMO)
Καθυστερήση	Επίπεδο δεδομένων: <10ms (μετ' επιστροφής) Επίπεδο ελέγχου: <100ms (από την αδρανή μέχρι την ενεργό κατάσταση)	Επίπεδο δεδομένων: <10ms (μετ' επιστροφής) Επίπεδο ελέγχου: <100ms (από την αδρανή μέχρι την ενεργό κατάσταση)	Επίπεδο δεδομένων: <10ms (μετ' επιστροφής) Επίπεδο ελέγχου: 50ms (από την αδρανή μέχρι την ενεργό κατάσταση)	Επίπεδο δεδομένων: <10ms (μετ' επιστροφής) Επίπεδο ελέγχου: 50ms (από την αδρανή μέχρι την ενεργό κατάσταση)

Στις ακόλουθες ενότητες αναλύονται δύο από τις καινοτόμες τεχνολογίες του LTE-Advanced, η συνάθροιση φερουσών και η συντονισμένη εκπομπή και λήψη πολλαπλών σημείων.

1.2.1 Συνάθροιση Φερουσών (Carrier Aggregation)

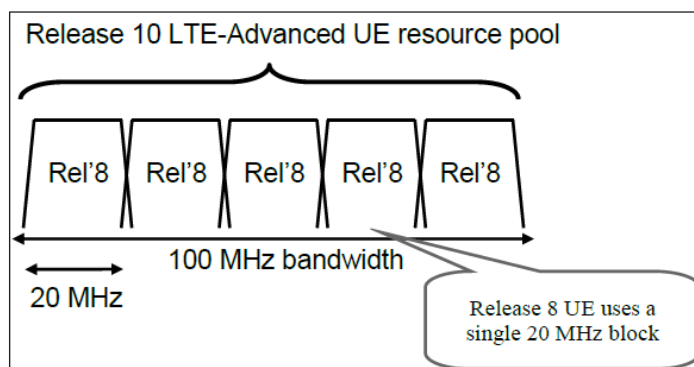
Έστω ότι μια φέρουσα συχνότητα χρησιμοποιείται για μακρο-κάλυψη και μια άλλη διαμοιράζεται μεταξύ των μακροκυψελών (macrocells) και των φεμτοκυψελών (femtocells) κλειστής πρόσβασης (κυψέλες με σταθμούς βάσης χαμηλής ισχύος που εξυπηρετούν μόνο εγγεγραμμένους χρήστες). Η παρεμβολή από το femtocell κλειστής πρόσβασης στη μακρο-κάλυψη αποφεύγεται δεδομένου ότι η μία φέρουσα συχνότητα χρησιμοποιείται μόνο από τα macrocells. [4]

Ένα κινητό τερματικό (User Equipment-UE) με δυνατότητα συνάθροισης φερουσών μπορεί να ωφεληθεί από την κάλυψη του macrocell δικτύου σε μία από τις φέρουσες και τη μερική κάλυψη (εκτός του femtocell κλειστής πρόσβασης) από τη δεύτερη φέρουσα. Ταυτόχρονα, τα femtocells κλειστής πρόσβασης συνεχίζουν να παρέχουν κάλυψη στην αντίστοιχη φέρουσα συχνότητά τους. Αυτό το παράδειγμα μπορεί να γενικευθεί για την περίπτωση όπου περισσότερες από μια φέρουσες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από τα femtocells κλειστής πρόσβασης για την αντιμετώπιση του προβλήματος παρεμβολών μεταξύ δύο femtocells κλειστής πρόσβασης που προκύπτει από το να έχουν μια ενιαία φέρουσα όλα τα femtocells κλειστής πρόσβασης. Συνεπώς, η συνάθροιση φερουσών επιτρέπει την πλήρη χρήση των πόρων από το macrocell δίκτυο χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την κάλυψη των femtocells κλειστής πρόσβασης.

Μια παρόμοια λογική με αυτή των femtocells κλειστής πρόσβασης μπορεί να υιοθετηθεί και για άλλα είδη κόμβων χαμηλής ισχύος: picocells, femtocells ανοικτής πρόσβασης και αναμεταδότες. Αυτοί οι τύποι κόμβων είναι εγγενώς σε μειονεκτική θέση σε σχέση με τα macrocells υψηλής ισχύος. Σε περίπτωση ανάπτυξης κόμβων χαμηλής ισχύος με ανοικτή πρόσβαση, η κάλυψη του macrocell δικτύου δεν τίθεται σε κίνδυνο. Ωστόσο, θέτοντας τη συνήθη μακρο-κάλυψη σε μια από τις φέρουσες με τον καθορισμό της ισχύος τους στην ονομαστική τιμή ενώ οι κόμβοι χαμηλής ισχύος αναπτύσσονται σε άλλη φέρουσα θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του κέρδους χωρητικότητας.

Τα macrocells μπορούν επίσης να εκπέμπουν στη φέρουσα συχνότητα των κόμβων χαμηλής ισχύος αλλά με μειωμένη ισχύ ώστε να αποφευχθεί μια μεγάλη διαφορά ενέργειας που θα κατακλύσει την κάλυψη των κόμβων χαμηλής ισχύος. Αντιστρόφως, οι (ακίνδυνοι) κόμβοι χαμηλής ισχύος μπορούν να αναπτυχθούν στη φέρουσα που χρησιμοποιήθηκε αρχικά από το macrocell δίκτυο. Ως αποτέλεσμα για το παράδειγμα αυτό, μια φέρουσα συχνότητα θα πρέπει να χρησιμοποιείται από το macrocell δίκτυο για να παρέχει ονομαστική κάλυψη (δηλ. εκπομπή του macrocell σε πλήρη ισχύ). Οι κόμβοι χαμηλής ισχύος θα χρησιμοποιήσουν επίσης αυτή τη φέρουσα συχνότητα για βελτίωση της χωρητικότητας σε τοποθεσίες κοντά σε αυτούς τους κόμβους. Μία άλλη φέρουσα συχνότητα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τους κόμβους χαμηλής ισχύος και από τα macrocells με μειωμένη ισχύ εκπομπής. Στην περίπτωση αυτή, το UE θα ωφεληθεί από το γεγονός ότι και οι δύο τύποι κόμβων χρησιμοποιούν δύο φέρουσες.

Ως εκ τούτου, η συνάθροιση φερουσών μπορεί να είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την αποτελεσματική ανάπτυξη των ετερογενών δικτύων χωρίς να προκαλείται απώλεια εύρους ζώνης. Ωστόσο, οι λύσεις που βασίζονται στη συνάθροιση φερουσών απαιτούν τη διαθεσιμότητα αρκετού φάσματος και μπορεί να είναι αναποτελεσματικές λόγω των περιορισμών μέγιστου ρυθμού μετάδοσης για το UE που δεν έχει την δυνατότητα της συνάθροισης φερουσών. Το κόστος ενός UE με δυνατότητα συνάθροισης φερουσών και των κόμβων χαμηλής ισχύος θα μπορούσε επίσης να αποτελέσει σημαντικό θέμα.



Εικόνα 1. Συνάθροιση φερουσών [22]

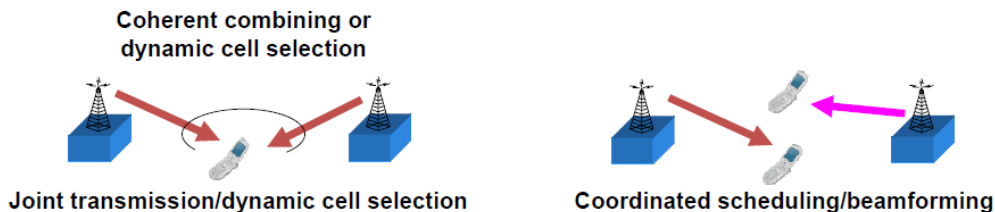
1.2.2 Συντονισμένη Εκπομπή και Λήψη Πολλαπλών Σημείων (CoMP)

Στην Έκδοση 11 του LTE-Advanced συζητείται η συντονισμένη εκπομπή και λήψη πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi Point-CoMP transmission/reception), η οποία έχει ως στόχο να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης που διατίθεται σε UEs στα όρια της κυψέλης, ενισχύοντας την απόδοση του δικτύου μέσω συνδυασμού μιας ομάδας (cluster) σταθμών βάσης ώστε να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα επιλεγμένα UEs. Η CoMP δε βασίζεται μόνο στο διαμοιρασμό των ραδιοπόρων, αλλά εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες εκπομπής και λήψης των γειτονικών σταθμών βάσης ώστε να αυξήσει το λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio-SINR) στην άνω και στην κάτω ζεύξη. Οι τεχνολογίες CoMP θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως εξής [6]:

- **CoMP κάτω ζεύξης:** Σε αυτόν τον τύπο, περισσότεροι από ένας σταθμοί βάσης μεταδίδουν σήματα με συντονισμένο τρόπο στο UE σαν να ήταν ένας μοναδικός πομπός με πολλαπλές κεραιές γεωγραφικά κατανομημένες. Οι σταθμοί βάσης είναι οργανωμένοι σε clusters (είτε ευέλικτα είτε σταθερά) και συντονίζουν τη μετάδοση κάτω ζεύξης μεταξύ όλων αυτών. Οι κύριες τεχνολογίες CoMP κάτω ζεύξης είναι:
 - **Συντονισμένος προγραμματισμός (coordinated scheduling)**, στον οποίο μία οντότητα (συνήθως ένας από τους σταθμούς βάσης του cluster) αναλαμβάνει τις λειτουργίες προγραμματισμού όλου του cluster. Απαιτούνται όλες οι πληροφορίες κατάστασης διαύλου (Channel State Information-CSI) κάτω ζεύξης από όλους τους σταθμούς βάσης προς τα στοχευμένα UEs. Επομένως, πρέπει να υλοποιηθούν μηχανισμοί για τις μετρούμενες CSI των τερματικών ώστε να αποσταλούν στον κύριο σταθμό βάσης. Κάθε UE εξυπηρετείται μόνο από ένα σταθμό βάσης και τα δεδομένα του χρήστη πρέπει να είναι παρόντα μόνο στον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης.
 - **Συντονισμένη διαμόρφωση δέσμης (coordinated beamforming)**, η οποία χρησιμοποιεί CSI για να προκωδικοποιήσει τα μεταδιδόμενα σήματα, ώστε να αποφευχθούν παρεμβολές από διαφορετικές κυψέλες σε ένα κανάλι κάτω ζεύξης του UE. Η προκωδικοποίηση beamforming μπορεί να γίνει τοπικά σε κάθε cluster με έναν κατανομημένο κοινό τρόπο επεξεργασίας. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, κάθε UE εξυπηρετείται από ένα σταθμό βάσης, οπότε, τα δεδομένα του χρήστη πρέπει να είναι παρόντα μόνο στον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης.
 - **Κοινή εκπομπή (joint transmission)**, στην οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σε διάφορους σταθμούς βάσης του cluster. Το απλούστερο σενάριο είναι η δυναμική επιλογή σημείου (dynamic point selection), όπου ο εξυπηρετών σταθμός βάσης μπορεί να αλλάξει δυναμικά ανάλογα με τα CSI που έχει λάβει.

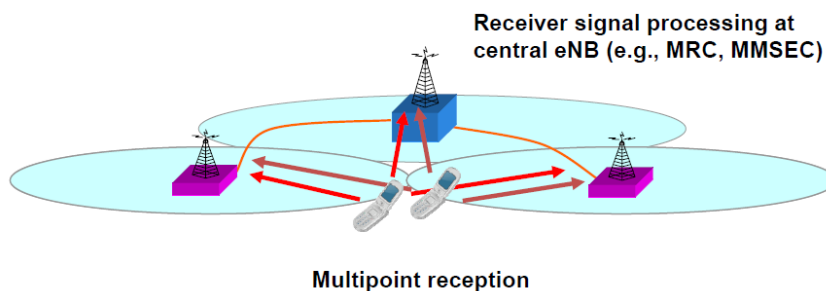
Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος κοινής εκπομπής, τα δεδομένα μεταδίδονται ταυτόχρονα από διαφορετικούς σταθμούς βάσης του cluster. Υπάρχουν δύο επιλογές:

- **Μη συνεκτική εκπομπή (non-coherent transmission)**, στην οποία το κέρδος λαμβάνεται από καθαρή αύξηση της ισχύος του σήματος στους παραλήπτες. Απαιτείται βασικό CSI προκειμένου να υποστηρίξει τις αποφάσεις προγραμματισμού, καθώς και κάποιος χρονικός συγχρονισμός που θα σχετίζεται με την ικανότητα της ραδιο-διεπαφής να διαχειρίζεται την πολυδιαδρομική καθυστέρηση. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι δε χρειάζεται συγχρονισμός φάσης.
- **Συνεκτική εκπομπή (coherent transmission)**, η οποία εκμεταλλεύεται την καλή γνώση του CSI, σταθμίζοντας τις κατανομές των μπλοκ φυσικών πόρων (Physical Resource Block-PRB) (τα PRBs είναι η ελάχιστη τιμή των ραδιοπόρων που κατανέμονται στο UE, χρησιμοποιώντας πολλά υπο-φέροντα κατά μήκος αρκετών OFDM συμβόλων), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το σήμα που λαμβάνει ο χρήστης από διάφορους σταθμούς βάσης. Για αυτή η τεχνική, είναι απαραίτητος ο ορισμός του CSI, ο στενός χρονικός συγχρονισμός και ο συγχρονισμός φάσης μεταξύ του cluster.



Εικόνα 2. Τεχνολογίες CoMP κάτω ζεύξης [21]

- **CoMP άνω ζεύξης:** Τα σήματα άνω ζεύξης των χρηστών λαμβάνονται σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης που είναι γεωγραφικά κατανεμημένοι. Αυτή η τεχνολογία εφαρμόζει τους μηχανισμούς για τον συντονισμό του προγραμματισμού όλων των εμπλεκόμενων σταθμών βάσης και της ανάλυσης των λαμβανόμενων σημάτων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της CoMP άνω ζεύξης είναι ότι μπορεί να σχεδιαστεί χωρίς αντίκτυπο στις τρέχουσες προδιαγραφές των UEs. Μία πιθανή υλοποίηση αποτελείται από τον προγραμματισμό των ίδιων PRBs σε αρκετούς χρήστες. Οι βασικές προσεγγίσεις είναι:
 - **Συνεκτική λήψη (coherent reception):** Τα σήματα που λαμβάνονται στους σταθμούς βάσης συνδυάζονται σε έναν κεντρικό δέκτη
 - **Μη συνεκτική λήψη (non-coherent reception):** Υπάρχει ένα συγκεντρωτικός προγραμματιστής για τα κανάλια άνω ζεύξης και τις πολλαπλές λήψεις των σημάτων.



Εικόνα 3. Τεχνολογία CoMP άνω ζεύξης [21]

2. ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ (HETNETS)

2.1 Η παραδοσιακή προσέγγιση στην ανάπτυξη δικτύου

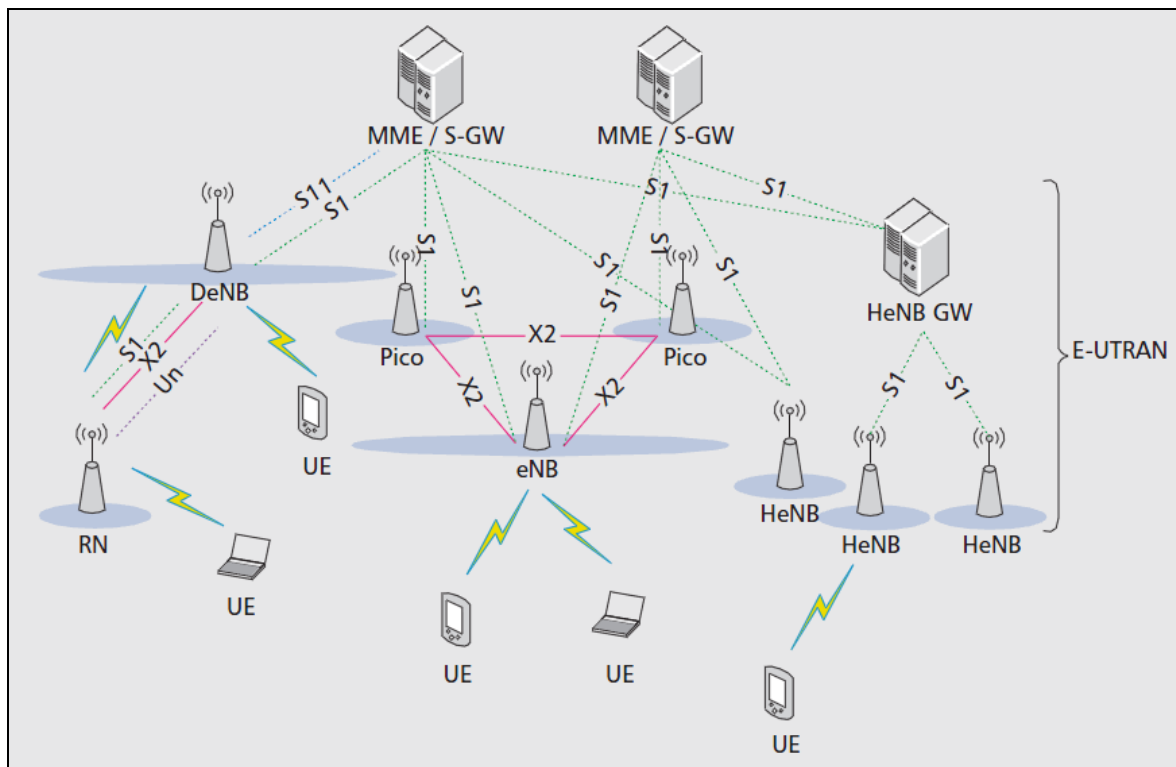
Τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών συνήθως αναπτύσσονται ως ομογενή δίκτυα χρησιμοποιώντας μια διαδικασία σχεδιασμού βασισμένη στις μακροκυψέλες [1]. Ένα ομογενές κυψελωτό σύστημα είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από σταθμούς βάσης σε μια σχεδιασμένη διάταξη και από τερματικά χρηστών. Στο δίκτυο αυτό όλοι οι σταθμοί βάσης έχουν παρόμοια επίπεδα ισχύος εκπομπής, πρότυπα κεραιών, επίπεδα θορύβου του δέκτη και παρόμοια συνδεσιμότητα οπισθόζευξης (backhaul) στο δίκτυο δεδομένων. Επιπλέον, όλοι οι σταθμοί βάσης προσφέρουν απεριόριστη πρόσβαση στα τερματικά εντός του δικτύου, τα οποία μεταφέρουν παρόμοιες ροές δεδομένων με παρόμοιες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

Οι θέσεις των σταθμών βάσης είναι προσεκτικά επιλεγμένες μέσω του σχεδιασμού του δικτύου, ενώ οι ρυθμίσεις των σταθμών βάσης έχουν κατάλληλα οριστεί για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης και τον έλεγχο της παρεμβολής μεταξύ τους. Καθώς η κίνηση αυξάνεται και το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων αλλάζει, το δίκτυο βασίζεται στην αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης ή σε επιπλέον φάσμα για να ξεπεράσει τους περιορισμούς χωρητικότητας και προϋπολογισμού ζεύξης και να διατηρήσει ενιαία την εμπειρία του χρήστη. Ωστόσο, η συγκεκριμένη διαδικασία ανάπτυξης είναι πολύπλοκη και επαναληπτική. Ένα πιο ευέλικτο μοντέλο ανάπτυξης είναι απαραίτητο για τους παρόχους ώστε να βελτιώσουν την εμπειρία των χρηστών με έναν αποτελεσματικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

2.2 Η προσέγγιση των Ετερογενών Δικτύων (HetNets)

Το ετερογενές δίκτυο (HetNet) είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από δομικά στοιχεία με διάφορες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, το καθένα από τα οποία έχει διαφορετικές δυνατότητες, περιορισμούς και λειτουργικότητα [1]. Συγκεκριμένα, στο LTE-Advanced προβλέπονται πολυεπίπεδες υλοποιήσεις δικτύου, με τη συμμετοχή απομακρυσμένων ραδιο-κεφαλών (Remote Radioheads-RRHs), picocells, femtocells, καθώς και αναμεταδοτών που επικαλύπτονται με την υπάρχουσα μακροκυψελική διάταξη. Αυτοί οι χαμηλής ισχύος σταθμοί βάσης μπορεί να εγκατασταθούν είτε από τον πάροχο είτε από το χρήστη, ενώ μπορούν να συνυπάρχουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή και δυνητικά να μοιράζονται το ίδιο φάσμα.

Η ανάπτυξη αυτών των μικρών κυψελών στοχεύει στην αποσυμφόρηση των macrocells, στην αύξηση της χωρητικότητας, στη βελτίωση της κάλυψης κυρίως σε εσωτερικούς χώρους, στην αύξηση της απόδοσης στα όρια της κυψέλης και στην αύξηση της φασματικής απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας μέσω χωρικής επαναχρησιμοποίησης. Μπορούν να αναπτυχθούν με σχετικά χαμηλή επιβάρυνση δικτύου και έχουν προοπτικές για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Οι κόμβοι χαμηλής ισχύος δεν απαιτούν μονάδα κλιματισμού για τον ενισχυτή ισχύος και το κόστος τους είναι πολύ χαμηλότερο από το κόστος των παραδοσιακών μακροκυψελικών σταθμών βάσης. Συνεπώς, απαιτούνται ελάχιστα ή καθόλου εκ των προτέρων έξοδα σχεδιασμού και μίσθωσης, μειώνοντας έτσι δραστικά τις λειτουργικές και κεφαλαιουχικές δαπάνες των δικτύων.



Εικόνα 4. Οι κόμβοι και οι διεπαφές ενός ετερογενούς δικτύου [4]

Στον Πίνακα 3 παρέχονται λεπτομέρειες για τα διάφορα στοιχεία των HetNets ως ακολούθως [2]:

- Τα δίκτυα μακροκυψελών αποτελούνται από συμβατικούς σταθμούς βάσης που εγκαθίστανται από τους παρόχους, προσφέροντας ανοιχτή πρόσβαση στο κοινό και ευρεία κάλυψη, συνήθως μερικών χιλιομέτρων. Στο LTE ονομάζονται επίσης ενισχυμένοι κόμβοι B (enhanced Node Bs-eNBs). Συνήθως προορίζονται για την παροχή ελάχιστου εγγυημένου ρυθμού δεδομένων που καθορίζεται από τη μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση και περιορισμούς διακοπής υπηρεσίας (outage), ενώ εκπέμπουν ισχύ έως 46 dBm, εξυπηρετώντας χιλιάδες συνδρομητές.
- Τα picocells είναι χαμηλής ισχύος σταθμοί βάσης που εγκαθίστανται από τους παρόχους με το ίδιο backhaul και χαρακτηριστικά πρόσβασης όπως τα macrocells. Αναπτύσσονται συνήθως με έναν κεντροποιημένο τρόπο, εξυπηρετώντας μερικές δεκάδες χρηστών μέσα σε ένα εύρος 300 μέτρων ή λιγότερο και έχουν τυπικό εύρος ισχύος εκπομπής 23 έως 30 dBm. Τα picocells χρησιμοποιούνται κυρίως για την αύξηση της χωρητικότητας και της κάλυψης σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους, σε περιβάλλοντα με ανεπαρκή μακρο-διείσδυση (π.χ. κτίρια γραφείων).
- Τα femtocells, που είναι γνωστά και ως οικιακοί σταθμοί βάσης (home eNBs-HeNBs), είναι χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος σημεία πρόσβασης που εγκαθίστανται από τους χρήστες, αποφορτίζουν την κίνηση των δεδομένων χρησιμοποιώντας την ευρυζωνική σύνδεση των συνδρομητών (DSL, καλώδιο ή ίνα) και εξυπηρετούν δεκάδες χρήστες σε σπίτια ή σε επιχειρήσεις. Τυπικά, ένα femtocell καλύπτει λιγότερο από 50 μέτρα και η ισχύς εκπομπής του είναι μικρότερη από 23 dBm. Περισσότερη ανάπτυξη γίνεται σε επόμενη ενότητα.
- Οι αναμεταδότες (relays) είναι συνήθως σημεία πρόσβασης που εγκαθίστανται από τους παρόχους και δρομολογούν τα δεδομένα από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης (macrocell eNB-MeNB) προς τους τελικούς χρήστες και αντιστρόφως. Σε περίπτωση που η backhaul επικοινωνία λαμβάνει χώρα στην

ίδια συχνότητα με την επικοινωνία από/προς το χρήστη για άνω/κάτω ζεύξη αντίστοιχα, τότε ο αναμεταδότης χαρακτηρίζεται ως ενδοζωνικός (in-band). Στην περίπτωση διαφορετικής συχνότητας, ο αναμεταδότης χαρακτηρίζεται ως εξωζωνικός (out-of-band). Οι αναμεταδότες είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να αυξάνουν την ισχύ του σήματος και να βελτιώνουν τη λήψη σε περιοχές χαμηλής κάλυψης και νεκρά σημεία στα υπάρχοντα δίκτυα (π.χ. άκρα κυψελών, σήραγγες). Μπορούν να λειτουργήσουν με διαφανείς ή αδιαφανείς τρόπους (π.χ. IEEE 802.16m), με λίγα ή καθόλου επιπλέον backhaul έξοδα και με παρόμοια ισχύ μετάδοσης όπως τα picocells.

- Οι απομακρυσμένες ραδιο-κεφαλές (RRHs) είναι συμπαγείς, υψηλής ισχύος και χαμηλού βάρους μονάδες, οι οποίες είναι τοποθετημένες έξω από το συμβατικό MeNB και συνδέονται με αυτόν μέσω ενός καλωδίου οπτικών ινών, δημιουργώντας έτσι έναν κατακευματισμένο σταθμό βάσης. Ο κεντρικός MeNB είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την επεξεργασία του σήματος. Μεταφέροντας κάποια κυκλώματα στην απομακρυσμένη κεραία, τα RRHs ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος στο καλώδιο της κεραίας και μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης ενισχύουν την ευελιξία του δικτύου για τους παρόχους που αντιμετωπίζουν φυσικούς περιορισμούς.

Πίνακας 3. Προδιαγραφές διαφόρων στοιχείων σε ένα HetNet

Τύπος κόμβων	Ισχύς εκπομπής	Κάλυψη	Backhaul
Macrocell	46 dBm	Λίγα χιλιόμετρα	Διεπαφή S1
Picocell	23-30 dBm	< 300 μέτρα	Διεπαφή X2
Femtocell	< 23 dBm	< 50 μέτρα	Internet IP
Αναμεταδότες (relays)	30 dBm	300 μέτρα	Ασύρματη ζεύξη
Απομακρυσμένες ραδιο-κεφαλές (RRH)	46 dBm	Λίγα χιλιόμετρα	Οπτική ίνα

Η τοποθέτηση των MeNBs σε ένα κυψελωτό δίκτυο βασίζεται σε προσεκτικό σχεδιασμό του δικτύου, ενώ η τοποθέτηση των μικρών σταθμών βάσης μπορεί να γίνεται ad hoc, βασισμένη μόνο σε μια πρόχειρη γνώση των θεμάτων κάλυψης και πυκνότητας στο δίκτυο (π.χ. hotspots). Λόγω της χαμηλότερης ισχύος εκπομπής και του μικρότερου μεγέθους τους, οι pico/femto/relay σταθμοί βάσης προσφέρουν ευελιξία στο δίκτυο.

2.3 Κρίσιμα θέματα στην ανάπτυξη των HetNets

Τα HetNets αποτελούν μια σημαντική αλλαγή παραδείγματος από την παραδοσιακή κεντροποιημένη προσέγγιση των macrocells σε περισσότερο αυτόνομες, χωρίς συντονισμό και ευφυείς υλοποιήσεις. Ωστόσο, αυτή η μετάβαση, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μια εξαιρετική ευκαιρία για βελτιώσεις, εισάγει επίσης διάφορες προκλήσεις. Για παράδειγμα, παρόλο που το πλεονέκτημα της εγκατάστασης των femtocells υποστηρίζεται από πρόσφατες μελέτες που υποδεικνύουν ότι 50% όλων των κλήσεων φωνής και περισσότερο από 70% της κίνησης δεδομένων προέρχονται από εσωτερικούς χώρους, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να εμποδίσουν την επιτυχή ανάπτυξη αυτού του τύπου δικτύου. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις βασικότερες τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα HetNets [2].

2.3.1 Αυτο-Οργάνωση (Self-Organization)

Δεδομένου ότι ορισμένες κυψέλες, όπως τα femtocells, θα εγκαθίστανται από το χρήστη χωρίς την επίβλεψη του παρόχου, η εύρυθμη λειτουργία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά αυτο-οργάνωσής τους. Η ικανότητα αυτο-οργάνωσης των HetNets μπορεί γενικά να ταξινομηθεί σε τρεις διαδικασίες:

- **Αυτο-ρύθμιση (self-configuration):** οι πρόσφατα εγκατεστημένες κυψέλες διαμορφώνονται αυτόματα με τη λήψη λογισμικού πριν εισέλθουν σε κατάσταση λειτουργίας
- **Αυτο-ίαση (self-healing):** οι κυψέλες μπορεί να υποστούν αυτόματα αποκατάσταση βλάβης ή να εφαρμόσουν μηχανισμούς αντιστάθμισης οποτεδήποτε παρουσιάζονται βλάβες
- **Αυτο-βελτιστοποίηση (self-optimization):** οι κυψέλες παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση του δικτύου και βελτιστοποιούν τις ρυθμίσεις τους για να αυξήσουν την κάλυψη και να μειώσουν τις παρεμβολές.

Η ανάπτυξη των αυτο-οργανωμένων HetNets αποτελεί ένα περίπλοκο έργο, λόγω των διαφόρων τύπων κυψελών που συνυπάρχουν και του αυξανόμενου αριθμού των παραμέτρων δικτύου που πρέπει να εξεταστούν. Ο τυχαίος, άνισος και χρονικά μεταβαλλόμενος χαρακτήρας των αφίξεων χρηστών και της συνεπαγόμενης κίνησής τους, επιδεινώνει επίσης τις δυσκολίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη ενός εντελώς αυτο-οργανωμένου HetNet.

2.3.2 Οπισθόζευξη (Backhaul)

Ο σχεδιασμός του backhaul δικτύου είναι ένα σημαντικό ζήτημα λόγω της περίπλοκης τοπολογίας των διαφόρων τύπων κυψελών που συνυπάρχουν. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη των picocells θα απαιτήσει πρόσβαση σε υποδομές με παροχή ενέργειας και ενσύρματο δίκτυο backhaul, που μπορεί μελλοντικά να είναι ακριβά. Τα femtocells, που αντιθέτως έχουν σχετικά χαμηλότερο κόστος backhaul, ενδέχεται να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στη διατήρηση της ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) δεδομένου ότι το backhaul βασίζεται στην ευρυζωνική σύνδεση του χρήστη. Ως εκ τούτου, οι πάροχοι πρέπει να σχεδιάσουν το backhaul προσεκτικά ώστε να προσδιορίσουν την πλέον οικονομικά αποτελεσματική λύση εγγυημένου QoS. Μια τέτοια λύση είναι πιθανό να αποτελεί ένα μίγμα από ασύρματες και ενσύρματες τεχνολογίες backhaul, όπου κάποιες κυψέλες μπορεί να έχουν αποκλειστικές διεπαφές με το δίκτυο πυρήνα (core network), κάποιες άλλες μπορεί να σχηματίζουν μια ομάδα (cluster) για να συγκεντρώνουν και να προωθούν την κίνηση προς το δίκτυο πυρήνα (core network), και κάποιες άλλες κυψέλες μπορεί να στηρίζονται στους αναμεταδότες ως εναλλακτική διεπαφή.

2.3.3 Μεταπομπές (Handovers)

Οι μεταπομπές (handovers) είναι απαραίτητες προκειμένου να παρέχουν μια απρόσκοπτη, ενιαία υπηρεσία, όταν οι χρήστες μετακινούνται εντός ή εκτός της κάλυψης της κυψέλης. Επιπλέον, οι μεταπομπές είναι αποτελεσματικές για την εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης των χρηστών που κινούνται στα όρια γειτονικών/επικαλυπτόμενων κυψελών, από τις κυψέλες με μεγαλύτερη συμφόρηση προς εκείνες με λιγότερη συμφόρηση. Ωστόσο, αυτό έχει το αντιστάθμισμα της επιβάρυνσης του συστήματος, η οποία πιθανώς να είναι σημαντική στα HetNets λόγω

του μεγάλου αριθμού των μικρών κυψελών και των διαφόρων τύπων διαθέσιμων backhaul ζεύξεων για κάθε τύπο κυψέλης. Επιπλέον, η πιθανότητα αποτυχίας μεταπομπής αυξάνει την πιθανότητα διακοπής υπηρεσίας του χρήστη.

2.3.4 Παρεμβολές (Interference)

Η εισαγωγή των κόμβων χαμηλής ισχύος σε ένα δίκτυο μακροκυψελών δημιουργεί ανισορροπία μεταξύ της κάλυψης άνω και κάτω ζεύξης. Λόγω της μεγαλύτερης ισχύος εκπομπής του MeNB, το όριο μεταπομπής μετατοπίζεται πλησιέστερα προς τον κόμβο χαμηλής ισχύος, που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα παρεμβολής στην άνω ζεύξη καθώς τα τερματικά που εξυπηρετούνται από τους MeNBs δημιουργούν ισχυρή παρεμβολή στους κόμβους χαμηλής ισχύος. Στα HetNets, τα προβλήματα παρεμβολών είναι ιδιαίτερα σημαντικά εξαιτίας των παρακάτω λόγων:

- Το backhaul δίκτυο υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους κυψελών κι έτσι μπορεί να έχει διαφορετικούς περιορισμούς εύρους ζώνης και καθυστέρησης. Για παράδειγμα τα femtocells είναι απίθανο να συνδέονται απευθείας με το δίκτυο πυρήνα. Έτσι, είναι δυνατή μόνο περιορισμένη backhaul σηματοδότηση για το συντονισμό των παρεμβολών.
- Η περιορισμένη πρόσβαση που σχετίζεται με τα picocells και τα femtocells μπορεί να οδηγήσει σε σενάρια ισχυρής παρεμβολής τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη, δεδομένου ότι δε γίνεται μεταπομπή στις πλησιέστερες κυψέλες.
- Η ικανότητα αυτο-οργάνωσης των κυψελών απαιτεί συνεχή ανίχνευση και παρακολούθηση του περιβάλλοντος γύρω τους, προκειμένου να περιορίσουν ή να αποφύγουν την παρεμβολή με δυναμικό και προσαρμοστικό τρόπο.

3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ FEMTOCELLS ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE/LTE-ADVANCED

3.1 Επισκόπηση των femtocells

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών επόμενης γενιάς είναι η βελτίωση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους και η παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού δεδομένων στους χρήστες ταυτόχρονα και με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο, για την ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου. Μία από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις για την επίλυση αυτού του προβλήματος είναι να βρίσκονται οι πομποί και οι δέκτες πιο κοντά ο ένας στον άλλο. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή μπορεί να μην είναι οικονομικά εφικτή, δεδομένου ότι απαιτεί την ανάπτυξη περισσότερων σταθμών βάσης εντός του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, οι οικιακοί σταθμοί βάσης, κοινώς γνωστοί ως femtocells, θεωρούνται ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για τους παρόχους ώστε να βελτιώσουν την κάλυψη του δικτύου, ιδιαίτερα στο εσωτερικό των σπιτιών και των κτιρίων και να παρέχουν υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα με τους τελικούς χρήστες [5]. Τα femtocells ή femto Access Points (FAPs) είναι μικρά, μικρής εμβέλειας (10-30 μέτρα), χαμηλής ισχύος (10-100 mW) σημεία πρόσβασης που αναπτύχθηκαν για να προσφέρουν οικονομικά αποδοτικές και υψηλού εύρους ζώνης υπηρεσίες. Τα femtocells λειτουργούν σε αδειοδοτημένο φάσμα που ανήκει στον πάροχο υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών και επιτρέπουν τη σύγκλιση σταθερής και κινητής τηλεφωνίας (Fixed Mobile Convergence - FMC) μέσω της σύνδεσης του κυψελωτού δικτύου με ευρυζωνικές ζεύξεις (π.χ. DSL). Είναι συμβατά με τα πρότυπα UMTS, WiMAX, και LTE.

Τα τελευταία χρόνια, διάφορα είδη femtocells σχεδιάζονται και αναπτύσσονται με βάση διάφορες τεχνολογίες ασύρματης διεπαφής, υπηρεσίες, πρότυπα και στρατηγικές ελέγχου πρόσβασης. Για παράδειγμα, τα femtocells 3rd γενιάς χρησιμοποιούν την ασύρματη διεπαφή UMTS βασισμένη στην ευρυζωνική πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (WCDMA). Το 3GPP αναφέρεται στα femtocells 3rd γενιάς ως Home Node Bs (HNBs). Από την άλλη πλευρά, τα femtocells σε WiMAX και LTE χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA). Τα femtocells του LTE ονομάζονται Home evolved Node Bs (HeNBs).

Σε γενικές γραμμές, τα femtocells είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης, δηλαδή:

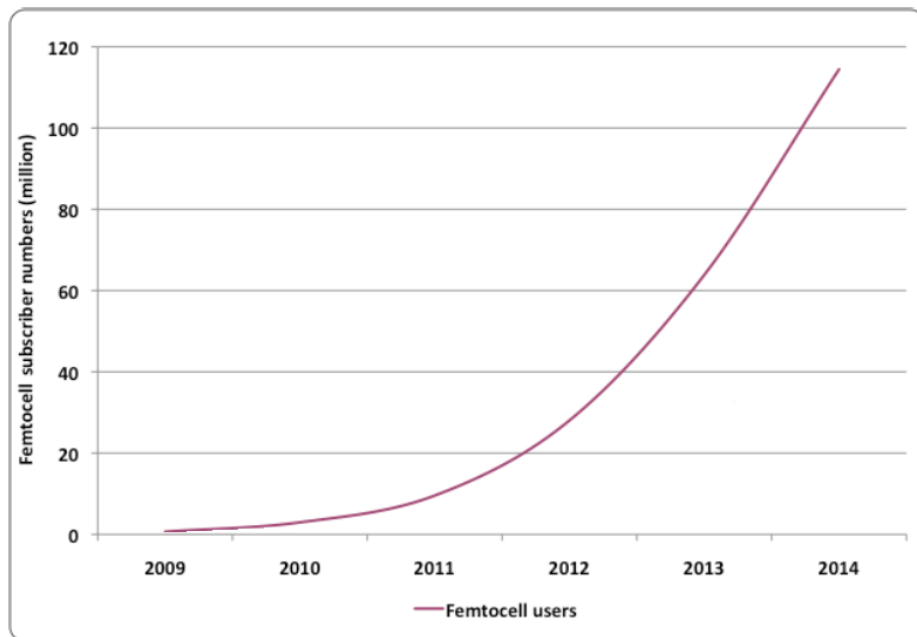
1. Λειτουργία κλειστής πρόσβασης (closed access mode),
2. Λειτουργία ανοικτής πρόσβασης (open access mode),
3. Υβριδική λειτουργία πρόσβασης (hybrid access mode).

Στη λειτουργία κλειστής πρόσβασης, ένα σύνολο εγγεγραμμένων UEs που ανήκουν στην κλειστή ομάδα συνδρομητή (Closed Subscriber Group - CSG), επιτρέπεται να έχουν πρόσβαση σε ένα femtocell. Αυτή η στρατηγική για τον έλεγχο πρόσβασης στο femtocell συνήθως εφαρμόζεται σε οικιακές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, σε δημόσιους χώρους όπως αεροδρόμια και εμπορικά κέντρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία ανοικτής πρόσβασης στα femtocells όπου κάθε UE μπορεί να έχει πρόσβαση στο femtocell και να επωφεληθεί από τις υπηρεσίες του. Αυτός ο τύπος πρόσβασης συνήθως χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους. Στην υβριδική λειτουργία πρόσβασης, κάθε UE μπορεί να έχει πρόσβαση στο femtocell αλλά δίνεται προτεραιότητα σε εκείνα τα UEs που είναι εγγεγραμμένα στο femtocell. Στις επιχειρήσεις μπορούν να εφαρμοστούν τα σενάρια εγκατάστασης υβριδικής λειτουργίας πρόσβασης στα femtocells.

3.2 Οφέλη από τη χρήση των femtocells

Η ενίσχυση της χωρητικότητας του δικτύου και η βελτίωση της κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους όπου το σήμα από τον MeNB είναι ασθενές είναι από τα κύρια πλεονεκτήματα της ανάπτυξης των femtocells [5]. Σε αντίθεση με τα macrocells που υποστηρίζουν εκατοντάδες χρήστες, τα femtocells θα υποστηρίζουν λίγους χρήστες ταυτόχρονα επιτρέποντας μικρότερο ανταγωνισμό πρόσβασης και επιτυγχάνοντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης. Τα femtocells παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας στους συνδρομητές και καλύτερη εμπειρία δεδομένων/πολυμέσων με λιγότερες διακοπές και απώλεια σύνδεσης σε σύγκριση με ένα περιβάλλον macrocell. Επίσης επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των κινητών τηλεφώνων δεδομένου ότι τα κινητά τερματικά δεν χρειάζεται να επικοινωνούν με ένα μακρινό MeNB. Τα femtocells μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν από τους τελικούς χρήστες σε εσωτερικούς χώρους σε μια βάση «plug-and-play».

Από την πλευρά των παρόχων [24], η χρήση των femtocells θα μειώσει τα τεράστια κεφαλαιουχικά έξοδα (Capital Expenditure-CAPEX) για τον εξοπλισμό και την ανάπτυξη των macrocells. Αυτό περιλαμβάνει την εξοικονόμηση κόστους σε εξοπλισμό, συνδέσεις με τα κέντρα μεταγωγής κλπ. καθώς η κίνηση δεδομένων γίνεται μέσω ενσύρματων οικιακών ευρυζωνικών συνδέσεων (DSL, καλώδιο, ή οπτική ίνα) και μειώνει την ένταση της κίνησης στο δίκτυο της μακροκυστής. Επιτυγχάνεται επίσης μείωση στα λειτουργικά έξοδα (Operational Expenditure-OPEX) καθώς με λιγότερα macrocells μειώνονται τα κόστη συντήρησης των εγκαταστάσεων, του εξοπλισμού και του backhaul. Με την παροχή υψηλής κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους και την ανώτερη εμπειρία χρήστη σε υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, οι πάροχοι θα έχουν την ευκαιρία για την αύξηση του μέσου εσόδου ανά χρήστη (Average Revenue Per User-ARPU). Τέλος, τα femtocells μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως εναλλακτική λύση της σύγκλισης σταθερών και κινητών υπηρεσιών. Μια πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη από την εταιρεία ερευνών Informa Telecoms & Media εκτιμά ότι μέχρι το 2014, 114 εκατομμύρια χρήστες θα έχουν πρόσβαση σε κινητά δίκτυα μέσω των femtocells.



Σχήμα 1. Πρόβλεψη femtocell χρηστών [26]

3.3 Προκλήσεις στην ανάπτυξη των femtocells

3.3.1 Προβλήματα παρεμβολών σε δίκτυα femtocells

Η μαζική ανάπτυξη των femtocells δημιουργεί πολλές τεχνικές προκλήσεις [5]. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η διαχείριση παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells ή μεταξύ femtocell και macrocell. Σε γενικές γραμμές, δύο τύποι παρεμβολών που συμβαίνουν σε μια αρχιτεκτονική δικτύου femtocell δύο επιπέδων (δηλαδή, ένα κεντρικό macrocell επικαλύπτεται με femtocells) είναι οι εξής:

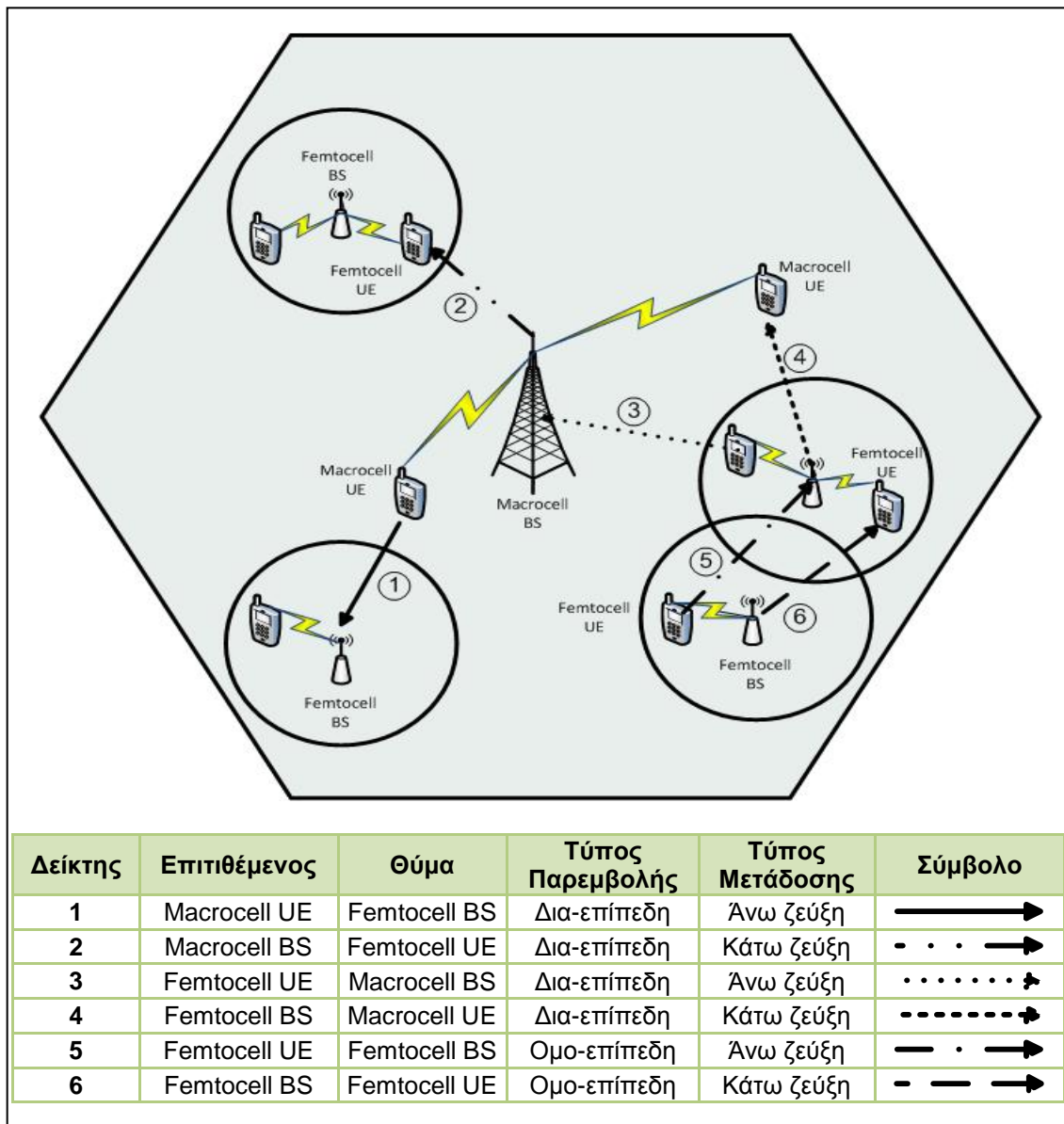
- **Ομο-επίπεδη παρεμβολή (co-tier interference):** Αυτός ο τύπος παρεμβολής εμφανίζεται μεταξύ στοιχείων του δικτύου που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο του δικτύου. Στην περίπτωση ενός δικτύου femtocell, η ομο-επίπεδη παρεμβολή πραγματοποιείται μεταξύ γειτονικών femtocells. Για παράδειγμα, ένας femtocell χρήστης-HUE (επιτιθέμενος) προκαλεί ομο-επίπεδη παρεμβολή στην άνω ζεύξη σε γειτονικούς femtocell σταθμούς βάσης-HeNBs (θύματα). Από την άλλη πλευρά, ένας HeNB ενεργεί ως πηγή ομο-επίπεδης παρεμβολής στην κάτω ζεύξη στα γειτονικά HUEs. Ωστόσο, σε συστήματα OFDMA, η ομο-επίπεδη παρεμβολή στην άνω ή κάτω ζεύξη εμφανίζεται μόνο όταν ο επιτιθέμενος (ή η πηγή της παρεμβολής) και το θύμα χρησιμοποιούν τα ίδια υπο-κανάλια. Ως εκ τούτου, απαιτείται αποτελεσματική κατανομή των υπο-καναλιών στα OFDMA δίκτυα femtocells για τον περιορισμό της ομο-επίπεδης παρεμβολής.
- **Δια-επίπεδη παρεμβολή (cross-tier interference):** Αυτός ο τύπος παρεμβολής εμφανίζεται μεταξύ στοιχείων του δικτύου που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα του δικτύου, δηλαδή, παρεμβολή μεταξύ femtocells και macrocells. Για παράδειγμα, τα HUEs και τα MUEs (χρήστες του macrocell) λειτουργούν ως πηγή δια-επίπεδης παρεμβολής στην άνω ζεύξη στο MeNB και στους γειτονικούς HeNBs, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, ο MeNB και οι HeNBs προκαλούν δια-επίπεδη παρεμβολή στην κάτω ζεύξη στα HUEs και τα γειτονικά MUEs, αντίστοιχα. Και πάλι, σε συστήματα OFDMA, η δια-επίπεδη παρεμβολή στην κάτω ή άνω ζεύξη εμφανίζεται μόνο όταν ο επιτιθέμενος και το θύμα χρησιμοποιούν τα ίδια υπο-κανάλια.

Τα femtocells έχουν αναπτυχθεί πάνω από το υπάρχον δίκτυο των macrocells και μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων με τα macrocells. Λόγω της στενότητας φάσματος, τα femtocells και τα macrocells πρέπει να επαναχρησιμοποιούν το σύνολο των κατανεμημένων συχνοτήτων μερικώς ή ολικώς, γεγονός που οδηγεί σε δια-επίπεδη ή ομοδιαυλική παρεμβολή. Παράλληλα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας στους MUEs, τα femtocells πρέπει να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν μικρότερο εύρος ζώνης, που οδηγεί σε ομο-επίπεδη παρεμβολή. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση του δικτύου μειώνεται σημαντικά λόγω της δια-επίπεδης και ομο-επίπεδης παρεμβολής. Επιπλέον, σοβαρή παρεμβολή μπορεί να οδηγήσει σε «Νεκρές ζώνες» (Dead zones), δηλαδή περιοχές όπου η ποιότητα υπηρεσίας υποβαθμίζεται σημαντικά. Οι «Νεκρές ζώνες» δημιουργούνται λόγω του ασύμμετρου επιπέδου ισχύος μετάδοσης εντός του δικτύου και της απόστασης μεταξύ του MUE και του MeNB. Για παράδειγμα, ένας MUE που βρίσκεται στο όριο της κυψέλης και εκπέμπει σε υψηλή ισχύ, δημιουργεί μια «Νεκρή Ζώνη» κατά τη μετάδοση άνω ζεύξης του γειτονικού femtocell λόγω ομοδιαυλικής παρεμβολής. Από την άλλη πλευρά, κατά τη μετάδοση κάτω ζεύξης, εξαιτίας απωλειών διαδρομής και φαινομένων σκίασης, ένας MUE στο όριο της κυψέλης μπορεί να υποστεί σοβαρή ομοδιαυλική παρεμβολή από τα γειτονικά femtocells. Έτσι, είναι απαραίτητο να υιοθετηθεί ένα αποτελεσματικό και εύρωστο σχήμα διαχείρισης των παρεμβολών που θα περιορίσει την ομο-επίπεδη

παρεμβολή και θα μειώσει σημαντικά τη δια-επίπεδη παρεμβολή προκειμένου να ενισχυθεί η απόδοση του συνολικού δικτύου.

Σε OFDMA δίκτυα femtocell, εξαιτίας της ευελιξίας στην κατανομή του φάσματος, ορθογώνια υπο-φέροντα μπορούν να ανατεθούν σε femtocells και macrocells. Αυτό δίνει στα OFDMA femtocells ένα πλεονέκτημα έναντι των CDMA συστημάτων όσον αφορά την αποτελεσματική χρήση των πόρων του ραδιοφάσματος. Εάν υιοθετηθεί ένα αποτελεσματικό σχήμα διαχείρισης των παρεμβολών, τότε η ομο-επίπεδη παρεμβολή μπορεί να περιοριστεί και η δια-επίπεδη παρεμβολή μπορεί να μειωθεί, οδηγώντας στην αύξηση της απόδοσης του συνολικού δικτύου.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει όλα τα πιθανά σενάρια παρεμβολών σε ένα OFDMA δίκτυο femtocell.



Εικόνα 5. Σενάρια παρεμβολών σε OFDMA δίκτυα femtocells

Οι ομο-επίπεδες και δια-επίπεδες παρεμβολές οφείλονται κυρίως στους παρακάτω λόγους [2].

- Μη σχεδιασμένη ανάπτυξη: οι κόμβοι χαμηλής ισχύος, όπως τα femtocells συνήθως αναπτύσσονται με έναν ad hoc τρόπο από τους χρήστες. Μπορούν ακόμη να μετακινηθούν, να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν ανά πάσα

στιγμή. Ως εκ τούτου, ο παραδοσιακός σχεδιασμός του δικτύου και η βελτιστοποίηση γίνονται αναποτελεσματικά διότι οι πάροχοι δεν ελέγχουν ούτε τον αριθμό ούτε τη θέση αυτών των κυψελών. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για νέα, αποκεντρωμένα συστήματα αποφυγής των παρεμβολών που λειτουργούν ανεξάρτητα σε κάθε κυψέλη, χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές πληροφορίες, ενώ επιτυγχάνεται μια αποτελεσματική λύση για ολόκληρο το δίκτυο.

- Πρόσβαση στην κλειστή ομάδα συνδρομητή (CSG): το γεγονός ότι ορισμένες κυψέλες μπορεί να βρίσκονται σε CSG λειτουργία, όπου η πρόσβαση στην κυψέλη είναι περιορισμένη και επομένως οι μη εγγεγραμμένοι χρήστες δεν συνδέονται πάντα με το πλησιέστερο σταθμό βάσης, προκαλεί σημαντική δια-επίπεδη παρεμβολή.
- Διαφορά ισχύος μεταξύ των κόμβων: τα picocells και οι αναμεταδότες συνήθως λειτουργούν δίνοντας ελεύθερη πρόσβαση, πράγμα που σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες ενός συγκεκριμένου παρόχου μπορεί να έχουν πρόσβαση σε αυτά. Η ανοικτή πρόσβαση βοηθά στην ελαχιστοποίηση της παρεμβολής κάτω ζεύξης καθώς οι τελικοί χρήστες συνδέονται πάντα στην ισχυρότερη κυψέλη, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα των CSG παρεμβολών. Ωστόσο, στα HetNets, το να είναι ένας χρήστης συνδεδεμένος με την κυψέλη που παρέχει τη μεγαλύτερη ισχύ λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength-RSS) στην κάτω ζεύξη δεν είναι πάντα η καλύτερη στρατηγική δεδομένου ότι οι χρήστες τείνουν να συνδέονται σε μακροκυψέλες και όχι στις κυψέλες με τη μικρότερη απόσταση απωλειών διαδρομής. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη διαφορά σε ισχύ μετάδοσης μεταξύ των macrocells και των κόμβων χαμηλής ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, το φορτίο της κίνησης θα είναι άνισα κατανομημένο, υπερφορτώνοντας έτσι τα macrocells.
- Επέκταση εύρους (range expansion): για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν λόγω της διαφοράς ισχύος μεταξύ των κόμβων στα HetNets, είναι απαραίτητες νέες μέθοδοι επιλογής κυψέλης που θα επιτρέπουν τη σύνδεση του χρήστη με κυψέλες που παρέχουν ασθενέστερη ποιότητα σήματος στην κάτω ζεύξη. Μια υπό εξέταση προσέγγιση είναι η επέκταση εύρους, κατά την οποία γίνεται μια επέκταση στην RSS του picocell ή του αναμεταδότη, προκειμένου να αυξήσει το αποτύπωμα της κάλυψης κάτω ζεύξης. Παρόλο που η επέκταση εύρους περιορίζει σημαντικά τη δια-επίπεδη παρεμβολή στην άνω ζεύξη, έχει σαν αντιστάθμισμα τη μείωση της ποιότητας σήματος στην κάτω ζεύξη των χρηστών που βρίσκονται στην διευρυμένη περιοχή. Αυτοί οι χρήστες στην κάτω ζεύξη μπορούν να υποστούν SINR κάτω από 0 dB εφόσον είναι συνδεδεμένοι σε κυψέλες που δεν παρέχουν την καλύτερη RSS στην κάτω ζεύξη.

3.3.1.1 Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών (ICIC)

Τα προβλήματα παρεμβολών μπορεί να υποβαθμίσουν σημαντικά τη συνολική απόδοση του HetNet, γεγονός που απαιτεί τη χρήση σχημάτων Συντονισμού Διακυψελικών Παρεμβολών (Intercell Interference Coordination-ICIC) για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του [2]. Σε αυτά τα σχήματα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον περιορισμό των διακυψελικών παρεμβολών στα κανάλια ελέγχου. Το UE μπορεί να δηλώσει αποτυχία ραδιοζεύξης όταν υφίσταται σοβαρή παρεμβολή και διακοπή υπηρεσίας λόγω των αναξιόπιστων καναλιών ελέγχου κάτω ζεύξης.

Επιπλέον, είναι σημαντικό για ένα UE να είναι σε θέση να ανιχνεύσει και να ενημερώσει τους εξυπηρετητές του σχετικά με γειτονικές κυψέλες που εν δυνάμει παρεμβάλλουν.

Στη συνέχεια, η κυψέλη που εξυπηρετεί το χρήστη σε συνεργασία με τις εν δυνάμει παρεμβάλλουσες κυψέλες θα συντονίσουν την κατανομή των πόρων τους όσον αφορά την ισχύ, τη συχνότητα και το χρόνο ώστε να ενισχύσουν τη χωρητικότητα του δικτύου και να περιορίσουν τις διακοπές εξυπηρέτησης των χρηστών.

Για τη διευκόλυνση του συντονισμού μεταξύ των κυψελών των ετερογενών δικτύων, ενημερωτικά μηνύματα πρέπει να ανταλλάσσονται μεταξύ τους. Τα macrocells συνδέονται με τα picocells και τους αναμεταδότες μέσω της διεπαφής X2. Τα ICIC μηνύματα που μπορούν να ανταλλάσσονται μέσω της διεπαφής X2 καταγράφονται ως εξής:

- **Δείκτης σχετικής εκπεμπόμενης ισχύος στενής ζώνης (Relative Narrowband Transmit Power-RNTP):** Για μεταδόσεις κάτω ζεύξης, ένας RNTP δείκτης που μεταδίδεται από μια συγκεκριμένη κυψέλη, χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τις γειτονικές κυψέλες για το αν η εκπεμπόμενη ισχύς για συγκεκριμένα RBs θα τεθεί κάτω από μια ορισμένη τιμή κατωφλίου.
- **Δείκτης υπερφόρτωσης (Overload Indicator-OI):** Για μεταδόσεις άνω ζεύξης, ο μέσος όρος των μετρήσεων ισχύος παρεμβολών συν θερμικό θόρυβο για κάθε RB ανταλλάσσεται μεταξύ των διαφορετικών κυψελών.
- **Δείκτης υψηλής παρεμβολής (High Interference Indicator-HII):** Μια συγκεκριμένη κυψέλη ενημερώνει τους γείτονές της ότι η μετάδοση άνω ζεύξης ενός εκ των χρηστών που βρίσκεται στα όρια της κυψέλης θα προγραμματιστεί στο εγγύς μέλλον, και οι γειτονικές κυψέλες μπορούν να απέχουν από τον προγραμματισμό των δικών τους χρηστών στα συγκεκριμένα RBs.

3.3.1.2 Ενισχυμένος Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών (eICIC)

Οι ICIC μέθοδοι που καθορίζονται στις Εκδόσεις 8 και 9 του 3GPP δεν εξετάζουν ειδικώς τις ρυθμίσεις των ετερογενών δικτύων και δεν μπορούν να είναι αποτελεσματικές για τα κυρίαρχα σενάρια παρεμβολών των ετερογενών δικτύων. Για την αντιμετώπιση τέτοιων σεναρίων, έχουν αναπτυχθεί στην Έκδοση 10 οι τεχνικές ενισχυμένου συντονισμού διακυψελικών παρεμβολών (enhanced Inter-cell Interference Coordination - eICIC), οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τεχνικές στο πεδίο του χρόνου, τεχνικές στο πεδίο της συχνότητας και τεχνικές στο πεδίο της ισχύος.

Οι προσεγγίσεις αυτές αναπτύσσονται με περισσότερες λεπτομέρειες παρακάτω. Εκτός αν ορίζεται διαφορετικά, εξετάζεται ο eICIC για τα femtocells λόγω της προτεραιότητάς τους στο 3GPP.

- Τεχνικές στο πεδίο του χρόνου

Στις μεθόδους eICIC στο πεδίο του χρόνου, οι μεταδόσεις των θυμάτων χρηστών προγραμματίζονται στους πόρους του πεδίου του χρόνου, όπου μετριάζεται η παρεμβολή από άλλους κόμβους. Μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες ως εξής:

- **Ευθυγράμμιση υποπλαισίου (subframe alignment)** - Όταν τα υποπλάισια του MeNB και του HeNB ευθυγραμμίζονται, τα κανάλια ελέγχου και δεδομένων τους αλληλεπικαλύπτονται. Ως εκ τούτου, προκειμένου να μην υπάρχουν παρεμβολές στο κανάλι ελέγχου των MUEs, πρέπει να εφαρμοστεί ενισχυμένος συντονισμός του καναλιού ελέγχου στα femtocells. Ένας πιθανός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να χρησιμοποιηθούν τα σχεδόν κενά υποπλάισια (Almost Blank Subframes-ABSF) στα femtocells. Στα ABSF, μεταδίδονται μόνο σήματα

αναφοράς, χωρίς σήματα ελέγχου ή δεδομένων. Όταν υπάρχουν MUEs κοντά σε ένα femtocell, μπορούν να προγραμματιστούν εντός των υποπλαισίων που επικαλύπτονται με τα ABSF του femtocell, γεγονός που μετριάξει σημαντικά την παρεμβολή πολλαπλών επιπέδων.

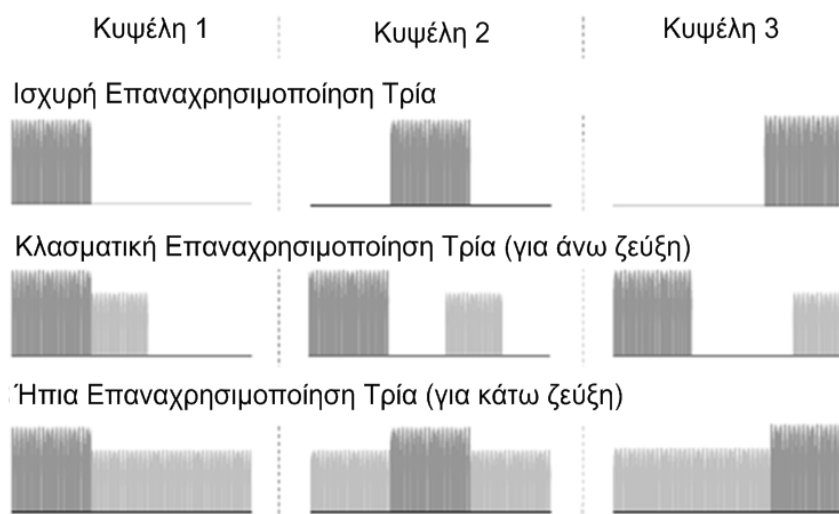
Μια παρόμοια προσέγγιση με χρήση των ABSF μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει τα προβλήματα παρεμβολών σε picocells (και αναμεταδότες) που εφαρμόζουν επέκταση εύρους. Όταν δεν χρησιμοποιείται συντονισμός παρεμβολών για χρήστες επεκταμένων picocells, οι χρήστες παρατηρούν μεγάλη παρεμβολή κάτω ζεύξης από το macrocell. Το πρόβλημα παρεμβολών μπορεί να μετριαστεί μέσω της χρησιμοποίησης ABSF στο macrocell και του προγραμματισμού χρηστών επεκταμένων picocells μέσα σε υποπλάισια που επικαλύπτονται με τα ABSFs του macrocell.

- **Μετατόπιση συμβόλου OFDM (OFDM symbol shift)** – Σε αυτήν την κατηγορία, το όριο του υποπλαισίου του HeNB μετατοπίζεται κατά έναν αριθμό συμβόλων OFDM σε σχέση με το όριο του υποπλαισίου του MeNB προκειμένου να αποφευχθεί επικάλυψη μεταξύ των καναλιών ελέγχου του femtocell και του macrocell. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα παρεμβολή από τα κανάλια δεδομένων των HUEs στα κανάλια ελέγχου των MUEs. Δύο πιθανές λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η σίγαση συμβόλου διαμοιραζόμενου καναλιού (shared-channel symbol muting) και η συνεχόμενη κάλυψη υποπλαισίου σε femtocell (consecutive subframe blanking at femtocells).

- Τεχνικές στο πεδίο της συχνότητας

Στις μεθόδους eICIC στο πεδίο της συχνότητας, κανάλια ελέγχου και φυσικά σήματα (δηλ. σήματα αναφοράς και συγχρονισμού) από διαφορετικές κυψέλες προγραμματίζονται σε μειωμένο εύρος ζώνης, προκειμένου να έχουμε εντελώς ορθογώνια μετάδοση αυτών των σημάτων σε διαφορετικές κυψέλες. Παρόλο που η ορθογωνιοποίηση στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί με ένα στατικό τρόπο, μπορεί επίσης να εφαρμοστεί δυναμικά μέσω ανίχνευσης του θύματος UE.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια γενική εικόνα από μεθόδους διαμέρισης συχνοτήτων (frequency partitioning). Αυτές οι ICIC μέθοδοι περιγράφουν τους βασικούς κανόνες για το πώς μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης ενός συστήματος με τη διαχείριση του εύρους ζώνης και της ισχύος εκπομπής [3]. Η ακόλουθη ανάλυση επικεντρώνεται στη διαμέριση συχνοτήτων και τις διαθέσιμες επιλογές για την Έκδοση LTE 8/9.



Εικόνα 6. Τεχνικές συντονισμού διακυβελικών παρεμβολών

➤ Πλήρης επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (full frequency reuse)

Η πλήρης επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σημαίνει ότι δεν γίνεται διαμέριση συχνοτήτων μεταξύ των eNBs του ίδιου δικτύου. Οι eNBs σε αυτό το σχήμα μεταδίδουν με ενιαία ισχύ σε ολόκληρο το εύρος ζώνης του συστήματος. Αυτός είναι ο συμβατικός τρόπος της λειτουργίας ενός δικτύου LTE. Η κύρια παγίδα σε αυτή τη μέθοδο είναι ότι οι χρήστες στα όρια της κυψέλης υφίστανται έντονη παρεμβολή από τις γειτονικές κυψέλες στην κάτω ζεύξη και δημιουργούν έντονη παρεμβολή στην άνω ζεύξη, υποβαθμίζοντας σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της επικοινωνίας.

➤ Ισχυρή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (hard frequency reuse)

Αυτή η μέθοδος ICIC εμφανίζεται συνήθως σε δίκτυα GSM, όταν πρόκειται για τη διανομή των συχνοτήτων μεταξύ των κυψελών. Όταν εφαρμόζεται στο LTE σημαίνει ότι τα υπο-φέροντα διαιρούνται σε 3, 4 ή 7 σύνολα. Αυτά τα σύνολα των υπο-φερόντων εκχωρούνται στους επιμέρους eNBs με τέτοιο τρόπο ώστε οι γειτονικές κυψέλες δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Αυτό μειώνει σημαντικά την παρεμβολή στα όρια της κυψέλης και μπορεί να θεωρηθεί το αντίθετο άκρο της πλήρους επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Ενώ η παρεμβολή στα όρια της κυψέλης υφίσταται τη μέγιστη μείωση, η αποδοτικότητα του φάσματος μειώνεται κατά ένα συντελεστή ίσο με το συντελεστή επαναχρησιμοποίησης.

➤ Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (fractional frequency reuse)

Αυτό είναι ένα υβριδικό σχήμα διαμέρισης συχνοτήτων που συνδυάζει χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων μεθόδων. Αποτελείται από τη διαίρεση του φάσματος σε δύο τμήματα εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιείται σε όλες τις κυψέλες, ενώ το άλλο τμήμα κατανέμεται μεταξύ διαφορετικών eNBs. Η ιδέα είναι ότι ο eNB εκχωρεί τις πλήρως επαναχρησιμοποιούμενες συχνότητες στους χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης και τα άλλα κομμάτια στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης.

➤ Ήπια επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (soft frequency reuse)

Σε αυτή τη μέθοδο, ένας eNB μεταδίδει σε ολόκληρο το εύρος ζώνης του συστήματος, αλλά χρησιμοποιεί ένα μη ομοιόμορφο φάσμα ισχύος.

Σε περιοχές όπου η ισχύς εκπομπής είναι υψηλή, οι πόροι ανατίθενται κατά προτεραιότητα στους χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, ενώ σε περιοχές χαμηλής ισχύος εκπομπής, οι πόροι ανατίθενται στους χρήστες στο κέντρο της κυψέλης.

Αυτό το σχήμα συντονισμού οδηγεί σε βελτίωση των επιπέδων SINR για τους χρήστες στα όρια της κυψέλης και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για συντονισμό διακυψελικών παρεμβολών στην κάτω ζεύξη.

Στην περίπτωση των HetNets μπορεί επίσης να είναι χρήσιμο να μπλοκάρουμε ορισμένους πόρους συχνοτήτων που διατίθενται εξ ολοκλήρου στους σταθμούς βάσης των picocells ή femtocells αλλά να επιτρέψουμε στο σταθμό βάσης του macrocell να χρησιμοποιήσει όλο το φάσμα. Έτσι παραχωρούνται πόροι στα macrocells που δεν υφίστανται παρεμβολή από τους μικρότερους σταθμούς βάσης, αλλά υπάρχει το μειονέκτημα της μειωμένης απόδοσης για τους μικρούς σταθμούς βάσης. Αυτό δεν οδηγεί απαραίτητα σε μειωμένη απόδοση των χρηστών δεδομένου ότι ο αριθμός των UEs που συνδέονται στους μικρούς σταθμούς βάσης είναι συνήθως περιορισμένος.

- Τεχνικές στο πεδίο της ισχύος

Μια άλλη προσέγγιση για τη διαχείριση των κυρίαρχων σεναρίων παρεμβολής είναι η εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών ελέγχου ισχύος στα femtocells. Παρόλο που η μείωση της εκπνευμένης ισχύος στο femtocell μειώνει τη συνολική απόδοση των HUEs, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των θυμάτων MUEs.

3.3.1.3 Προσεγγίσεις για τη διαχείριση των παρεμβολών

Στην ενότητα αυτή, γίνεται μια επισκόπηση των διαφόρων προσεγγίσεων για την περιορισμό των παρεμβολών σε OFDMA δίκτυα femtocell δύο επιπέδων [5].

- Femto-ενήμερο σχήμα ρύθμισης του φάσματος (femto-aware spectrum arrangement scheme)

Στόχος αυτής της τεχνικής είναι η αποφυγή δια-επίπεδων παρεμβολών στην άνω ζεύξη. Το φάσμα συχνοτήτων που έχει ανατεθεί για κάθε macrocell χωρίζεται σε δύο μέρη: το τμήμα φάσματος που είναι αποκλειστικό για το macrocell και το διαμοιραζόμενο τμήμα φάσματος για macrocell και femtocell. Υποτίθεται ότι το διαμοιραζόμενο φάσμα που ανατίθεται στους HeNBs ρυθμίζεται από τους παρόχους. Έτσι, ο MeNB έχει επαρκή γνώση του διαμοιραζόμενου φάσματος συχνοτήτων. Με βάση αυτή τη γνώση, ο MeNB αναπτύσσει μια δεξαμενή παρεμβολών η οποία περιλαμβάνει τα MUEs που αποτελούν απειλή για τα κοντινά HeNBs. Σε αυτά τα MUEs ανατίθεται ένα τμήμα του φάσματος που είναι αποκλειστικό για τη μακροκυψέλη, που περιορίζει την δια-επίπεδη παρεμβολή άνω ζεύξης και λύνει το πρόβλημα της «Νεκρής ζώνης» στην άνω ζεύξη.

Ωστόσο, αυτό το σχήμα δε λαμβάνει υπόψη την παρεμβολή μεταξύ HeNBs και μπορεί να είναι αναποτελεσματικό, αν ο αριθμός των MUEs που βρίσκονται κοντά στους HeNBs αυξάνεται.

- Ομαδοποίηση των femtocells (clustering of femtocells)

Στόχος αυτής της τεχνικής είναι η αποφυγή δια-επίπεδων και ομο-επίπεδων παρεμβολών στην κάτω ζεύξη και η ενίσχυση της φασματικής απόδοσης για ένα OFDMA δίκτυο femtocell κλειστής πρόσβασης. Σε αυτό το πλαίσιο, ένας ελεγκτής συστήματος femtocell (Femtocell System Controller-FSC) ανά macrocell λαμβάνει όλη την απαραίτητη γνώση της ρύθμισης των HeNBs (δηλαδή, τις πληροφορίες θέσης των HeNBs και των MUEs) και εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς. Προκειμένου να μειώσει τις παρεμβολές, το σύστημα περιλαμβάνει ένα συνδυασμό δυναμικής ανάθεσης της ζώνης συχνοτήτων μεταξύ των HeNBs και του MeNB, καθώς και μια ομαδοποίηση των HeNBs με βάση τη γεωγραφική τους θέση. Σε αυτό το σχήμα, ένα τμήμα της ζώνης συχνοτήτων είναι αποκλειστικά στη διάθεση των MUEs και το υπόλοιπο επαναχρησιμοποιείται από τον MeNB και τους HeNBs. Το πλεονέκτημα της ανάθεσης ενός τμήματος της ζώνης συχνοτήτων αυστηρά στους MUEs ότι μπορεί να λύσει το πρόβλημα της «Νεκρής ζώνης» στην κάτω ζεύξη των MUEs και να εγγυηθεί την απαίτηση των χρηστών για QoS. Ωστόσο, το διαμοιραζόμενο τμήμα της ζώνης συχνοτήτων καθορίζεται από το συνολικό αριθμό των ομάδων HeNB που προκύπτει μέσω ενός αλγορίθμου ομαδοποίησης. Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης αναθέτει τους HeNBs σε διαφορετικές ομάδες επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Τα UEs διαφορετικών HeNBs που ανήκουν στην ίδια ομάδα χρησιμοποιούν τα ίδια υπο-κανάλια που ανατίθενται από τη διαμοιραζόμενη ζώνη συχνοτήτων. Με βάση τις γεωγραφικές θέσεις των HeNBs, υπολογίζεται η απόσταση κατωφλίου για την ομαδοποίηση των παρεμβολών. Αν η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε HeNBs είναι μικρότερη από την απόσταση κατωφλίου, τότε αποδίδονται σε διαφορετικές ομάδες. Αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι επιτυγχάνεται υψηλή φασματική αποδοτικότητα, με αποτέλεσμα το πρόβλημα σχετικά με τη «Νεκρή ζώνη» στην κάτω ζεύξη του MUE γύρω από τα HeNBs λύνεται αποτελεσματικά. Επίσης παρατηρείται μια

σημαντική βελτίωση της χωρητικότητας των femtocells (μέχρι 200 HeNBs ανά macrocell).

- Στρατηγική επιλογής υποσυνόλου δέσμης (beam subset selection strategy)

Έχει προταθεί ένα σύστημα μείωσης ομο-επίπεδων παρεμβολών μέσω ορθογώνιας τυχαίας διαμόρφωσης δέσμης σε δίκτυα femtocell κλειστής πρόσβασης δύο επιπέδων. Η macrocell στρατηγική επιλογής υποσυνόλου δέσμης βασίζεται στον αριθμό των MUEs και την πυκνότητα των HeNBs στο δίκτυο. Ο MeNB επιλέγει το υποσύνολο δέσμης και τους χρήστες για κάθε κανάλι βάσει της πληροφορίας SINR για όλα τα κανάλια, η οποία ανατροφοδοτείται από τα MUEs. Ο κύριος στόχος είναι η αύξηση της απόδοσης του δικτύου με τη βελτιστοποίηση του αντισταθμίσιμου μεταξύ κέρδους πολυπλεξίας και δια-επίπεδων παρεμβολών με βάση την προσαρμοστική επιλογή του βέλτιστου αριθμού των δεσμών. Η προσαρμοστική επιλογή του αριθμού των δεσμών μειώνει τις δια-επίπεδες παρεμβολές και παρέχει χωρική ευκαιρία στους HeNBs να έχουν πρόσβαση στο φάσμα με έναν ευκαιριακό τρόπο. Επιπλέον, αν ενσωματωθεί καταναμημένος έλεγχος ισχύος για τους HeNBs με το προτεινόμενο σύστημα, θα μειώσει σημαντικά τη δια-επίπεδη παρεμβολή.

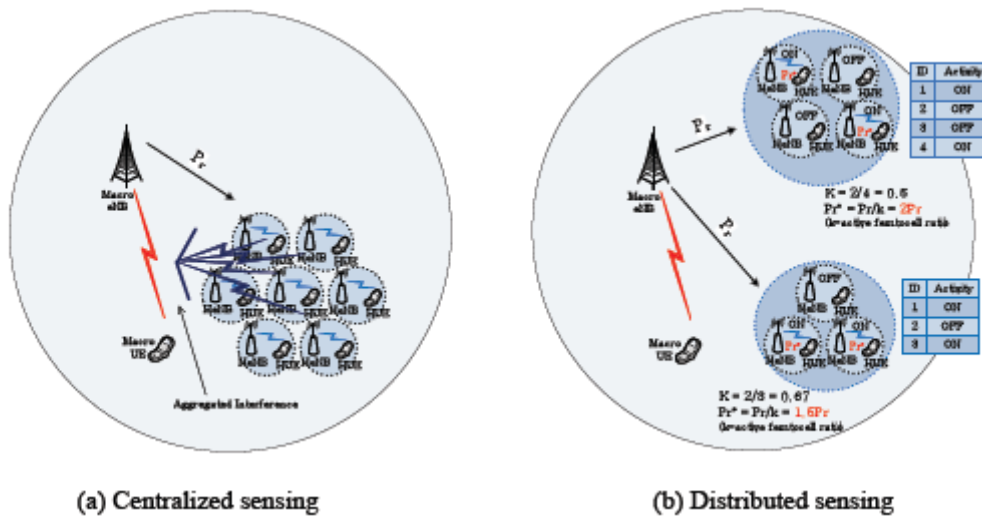
- Συνεργατικός προγραμματισμός συχνότητας (collaborative frequency scheduling)

Η ομοδιαυλική δια-επίπεδη παρεμβολή άνω και κάτω ζεύξης μπορεί να μετριαστεί εάν ο HeNB μπορεί να αποφύγει τη χρήση των RBs του macrocell που ανήκουν σε κοντινά MUEs μέσω αποτελεσματικής ανίχνευσης φάσματος. Εντούτοις, τα αποτελέσματα ανιχνεύσεως του φάσματος για τον HeNB μπορεί να υποβαθμιστούν λόγω κακής ανίχνευσης, ψευδούς συναγερμού και ακατάλληλου συγχρονισμού. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, παρέχεται ένα πλαίσιο για OFDMA HeNBs, όπου οι πληροφορίες προγραμματισμού για τα MUEs (άνω και κάτω ζεύξης) λαμβάνονται από τον MeNB μέσω backhaul ή ασύρματης διεπαφής. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τα αποτελέσματα της ανίχνευσης φάσματος για τον HeNB και να χρησιμοποιήσει τα RBs που συνδέονται με το μακρινό MUE στην άνω και κάτω ζεύξη μετάδοσης.

- Έλεγχος ισχύος (power control)

Οι μέθοδοι ελέγχου ισχύος για περιορισμό της δια-επίπεδης παρεμβολής γενικά επικεντρώνονται στη μείωση της ισχύος εκπομπής των HeNBs. Αυτές οι μέθοδοι πλεονεκτούν στο ότι ο MeNB και οι HeNBs μπορούν να χρησιμοποιήσουν το σύνολο του εύρους ζώνης με συντονισμό παρεμβολών. Η δυναμική ή προσαρμοστική ρύθμιση ισχύος, η οποία προτιμάται έναντι της σταθερής ρύθμισης ισχύος HeNB, μπορεί να γίνει είτε με προληπτικό (proactive) ή με αντιδραστικό (reactive) τρόπο, καθένας από τους οποίους μπορεί να εκτελείται είτε σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου ισχύος (Open Loop Power Setting-OLPS) ή σε λειτουργία κλειστού βρόχου ισχύος (Closed Loop Power Setting-CLPS). Στη λειτουργία OLPS, ο HeNB ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του βάσει των μετρήσεων του ή των προκαθορισμένων παραμέτρων του συστήματος (δηλ. με προληπτικό τρόπο). Στη λειτουργία CLPS, ο HeNB ρυθμίζει την ισχύ εκπομπής του βάσει του συντονισμού με τον MeNB (δηλ. με αντιδραστικό τρόπο). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υβριδικός τρόπος λειτουργίας όπου ο HeNB εναλλάσσεται μεταξύ των δύο τρόπων, ανάλογα με τα σενάρια λειτουργίας. Μια άλλη ιδέα είναι ο έλεγχος ισχύος για HeNBs σε βάση cluster στο οποίο η αρχική ρύθμιση ισχύος για τους HeNBs γίνεται ευκαιριακά με βάση τον αριθμό των ενεργών femtocells σε ένα cluster. Για το σκοπό αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κεντροποιημένη ανίχνευση με την οποία ένας MeNB μπορεί να εκτιμήσει τον αριθμό των ενεργών femtocells ανά cluster και να μεταδώσει τις πληροφορίες παρεμβολών στα femtocells για την αρχική τους ρύθμιση ισχύος. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί καταναμημένη ανίχνευση όπου κάθε

κυψέλη ανιχνεύει αν οι άλλες είναι ενεργές στο ίδιο cluster και προσαρμόζει την αρχική της ρύθμιση ισχύος αναλόγως.



Εικόνα 7. Προσεγγίσεις ελέγχου ισχύος [5]

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης μοντέλα της θεωρίας παιγνίων για το σχεδιασμό και την ανάλυση των καταναμημένων μεθόδων ελέγχου ισχύος σε ένα ετερογενές δίκτυο με macrocells και femtocells.

- Κλασματική επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και διαμέριση πόρων (fractional frequency reuse-FFR and resource partitioning)

Υπάρχουν δύο τύποι σχημάτων FFR [23]:

Στατική FFR: Οι μέθοδοι στατικής FFR μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, την ισχυρή και την ήπια FFR στρατηγική. Η ισχυρή FFR στρατηγική χωρίζει ολόκληρο το φάσμα συχνοτήτων σε ορισμένες μη-επικαλυπτόμενες υπο-ζώνες συχνοτήτων. Οι χρήστες που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης και οι χρήστες στα όρια της ίδιας κυψέλης εξυπηρετούνται σε διαφορετικές υπο-ζώνες συχνοτήτων. Οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια γειτονικών κυψελών εξυπηρετούνται επίσης σε μη-επικαλυπτόμενες υπο-ζώνες συχνοτήτων για αποφευχθεί η ισχυρή διακυβελική παρεμβολή. Ένα μειονέκτημα αυτού του σχήματος είναι ότι το φάσμα μπορεί να υποχρησιμοποιείται. Η ήπια FFR στρατηγική έχει ως στόχο να αξιοποιήσει το φάσμα πιο αποτελεσματικά επιτρέποντας στους χρήστες του κέντρου να χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων που έχει ανατεθεί στους χρήστες στα όρια της κυψέλης, αλλά σε μειωμένα επίπεδα ισχύος. Η λύση αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλή χρησιμοποίηση του φάσματος σε ορισμένες περιπτώσεις.

Δυναμική FFR: Οι λύσεις της στατικής FFR υποθέτουν σταθερή κίνηση φορτίου κατά τη λειτουργία ενός ασύρματου δικτύου. Στην πράξη ωστόσο, ο κυκλοφοριακός φόρτος και οι συνθήκες του καναλιού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Ο στόχος της δυναμικής στρατηγικής FFR είναι να λάβει υπόψη το φορτίο της κάθε κυψέλης καθώς και τις συνθήκες του καναλιού, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η χωρητικότητα του συστήματος. Σημαντικές έρευνες για τη δυναμική FFR, όπως η προσέγγιση της θεωρίας παιγνίων και η προσέγγιση που βασίζεται σε γράφους βρίσκονται σε εξέλιξη. Οι λύσεις αυτές έχουν δείξει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση. Η δυναμική FFR μπορεί επίσης να συνδυαστεί με διάφορους αλγόριθμους προγραμματισμού για την επίτευξη υψηλότερης χωρητικότητας. Ωστόσο, τα σχήματα δυναμικής FFR μπορεί να απαιτήσουν την ανταλλαγή μεγαλύτερου ποσού πληροφοριών μεταξύ γειτονικών σταθμών βάσης που συνεπάγεται μεγαλύτερη επιβάρυνση στο κανάλι ελέγχου.

Σημειώνεται ότι η μέθοδος διαμέρισης των πόρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με έλεγχο ισχύος (οδηγώντας έτσι σε μία υβριδική προσέγγιση) με σκοπό τη μείωση των δια-επίπεδων και ομο-επίπεδων παρεμβολών.

- Γνωσιακή προσέγγιση (cognitive approach)

Έχει προταθεί ένα αποτελεσματικό σχήμα διαχείρισης ομο-επίπεδων παρεμβολών κάτω ζεύξης για ένα OFDMA σύστημα, όπου η πληροφορία απωλειών διαδρομής διαμοιράζεται μεταξύ των γειτονικών HeNBs. Επιπλέον, οι γειτονικοί HeNBs διαμοιράζονται τις πληροφορίες σχετικά με τη χρήση των LTE συνιστωσών φερουσών (Component Carriers-CC), που επιτυγχάνεται με βάση την τεχνική συνάθροισης φερουσών, με έναν κατανεμημένο τρόπο. Στο προτεινόμενο σχήμα, όταν ένας HeNB είναι ενεργοποιημένος, προσδιορίζει τους γείτονες και αποκτά τη γνώση των CCs που χρησιμοποιούνται από τους γείτονες. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι κάθε HeNB εκτιμά την ομο-επίπεδη παρεμβολή με βάση την πληροφορία απωλειών διαδρομής, αξιοποιεί τη γνώση από τη χρήση των CCs από τους γείτονες και αποκτά με έξυπνο τρόπο πρόσβαση στο φάσμα για να ελαχιστοποιήσει τις παρεμβολές. Η επιλογή του CC γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε HeNB επιλέγει το CC που δε χρησιμοποιείται από το γείτονα ή το CC που καταλαμβάνεται από το πιο μακρινό γείτονα ή το CC που καταλαμβάνεται από τους λιγότερους γείτονες (με χρονολογική σειρά). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν μια σημαντική μείωση της ομο-επίπεδης παρεμβολής και της επιπλέον σηματοδοσίας στο δίκτυο σε σύγκριση με άλλη γνωσιακή τεχνική διαχείρισης ομο-επίπεδης παρεμβολής.

Η επιλογή ενός συστήματος διαχείρισης των παρεμβολών εξαρτάται από την επιθυμητή αντιστάθμιση (trade-off) μεταξύ πολυπλοκότητας και αποδοτικότητας. Η FFR προτείνεται ως σύστημα διαχείρισης των παρεμβολών σε δίκτυα femtocell δύο επιπέδων, δεδομένου ότι απαιτεί ελάχιστο ή καθόλου συντονισμό μεταξύ των HeNBs και του MeNB (και ως εκ τούτου μειώνει την επιβάρυνση σηματοδοσίας και την πολυπλοκότητα του συστήματος), έχει πρόσβαση ευκαιρικά στο φάσμα με βάση μόνο την τιμή RSSI από τα MeNB σήματα, ενώ λύνει αποτελεσματικά το πρόβλημα της ομο-επίπεδης και δια-επίπεδης παρεμβολής στην άνω και κάτω ζεύξη για τους διάφορους τύπους πρόσβασης στους HeNBs. Κατά συνέπεια, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση του δικτύου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ο μέσος αριθμός των HeNBs ανά macrocell είναι πολύ υψηλός (περίπου 180-200) διατηρώντας παράλληλα τις απαιτήσεις QoS των MUEs. Επί του παρόντος, η FFR θεωρείται ως μια αποδοτική τεχνική διαχείρισης παρεμβολών για OFDMA δίκτυα femtocell δύο επιπέδων.

3.3.2 Προκλήσεις σε τεχνικό, οικονομικό και θεσμικό επίπεδο

Εξίσου σημαντικές προκλήσεις στην ανάπτυξη των femtocells περιλαμβάνουν διαχείριση μεταπομπών και κινητικότητας, συγχρονισμό, αυτο-ρύθμιση, και ασφάλεια [5]. Ένα αποτελεσματικό και αποδοτικό σχήμα διαχείρισης της κινητικότητας και των μεταπομπών (macrocell-to-femtocell, femtocell-to-macrocell και femtocell-to-femtocell) είναι απαραίτητο για τη μαζική ανάπτυξη των femtocells σε δίκτυα LTE. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να έχει χαμηλή πολυπλοκότητα και κόστος σηματοδοσίας, να διαχειρίζεται διάφορους τρόπους πρόσβασης και να πραγματοποιεί εκ των προτέρων κατάλληλη διαχείριση των πόρων για την αποτελεσματική μεταπομπή. Ο συγχρονισμός είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στα femtocells διότι αφενός ο συγχρονισμός πάνω από το IP backhaul είναι δύσκολος και αφετέρου μπορεί να εμφανιστούν ασυνεχείς καθυστερήσεις εξαιτίας της μεταβαλλόμενης κυκλοφοριακής συμφόρησης. Δεδομένου ότι τα femtocells πρέπει να λειτουργούν σε βάση «plug-and-play», είναι σημαντικό να μπορούν να οργανώνονται και να ρυθμίζονται αυτόνομα

καθώς και να έχουν πρόσβαση στο ραδιοδίκτυο με έξυπνο τρόπο έτσι ώστε να προκαλούν τον ελάχιστο δυνατό αντίκτυπο στο υπάρχον macrocell δίκτυο. Ωστόσο, αξιόπιστες διαδικασίες πρέπει να είναι σε θέση να εξασφαλίσουν την αυθεντικοποίηση για την αποφυγή κακόβουλων επιθέσεων όπως υποκλοπές, man-in-the-middle επιθέσεις, κλπ., την εξακρίβωση θέσης και τη συμμόρφωση με τα υπάρχοντα πρότυπα και τις φασματικές απαιτήσεις εκπομπής.

Τα κίνητρα των παρόχων ISPs είναι επίσης μια κρίσιμη πρόκληση [25]. Οι ιδιωτικοί πάροχοι ISPs που προσφέρουν τη σύνδεση backhaul σε femtocells θα αναγκαστούν να μεταφέρουν πρόσθετη κίνηση δεδομένων, ιδιαίτερα εάν τα femtocells λειτουργούν παρέχοντας ανοικτή πρόσβαση. Αν τα femtocells εξελιχθούν σε κυρίαρχη κυψελωτή τεχνολογία, οι ISPs θα είναι υπεύθυνοι για ένα μεγάλο τμήμα της συνολικής κίνησης δεδομένων. Το πώς θα ανταποκριθούν οι ISPs, αν θα επιβάλλουν περιορισμούς εύρους ζώνης ή δεδομένων, αν θα αυξήσουν τα τέλη για τους συνδρομητές ή αν θα κάνουν συμφωνίες με τους παρόχους κινητών επικοινωνιών είναι ορισμένα ερωτήματα που χρήζουν ενδιαφέροντος. Πολλές μελέτες έχουν εστιάσει σε διάφορες προσεγγίσεις τιμολόγησης και θεωρίας παιγνίων.

Φαινομενικά τα femtocells θεωρούνται ως ανταγωνιστές του WiFi. Στην ουσία, τα femtocells προσφέρουν μια πολύ διαφορετική προσέγγιση από αυτήν του WiFi. Τα femtocells παρέχονται ως μια υπο διαχείριση υπηρεσία (managed service) σε σχέση με την υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best-effort service) που προσφέρεται από το WiFi. Παρά το γεγονός ότι σήμερα πολλοί άνθρωποι αποδέχονται αυτήν την προσέγγιση της βέλτιστης προσπάθειας για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, εκτιμάται ότι οι χρήστες θα θέλουν ευρυζωνική εμπειρία με το επίπεδο της αξιοπιστίας που θα περίμεναν από την ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Καθώς τα WiFi δίκτυα γίνονται όλο και πιο πυκνά, η επίδοσή τους θα υποβαθμίζεται δεδομένου ότι τα 802.11 πρότυπα δεν υποστηρίζουν συντονισμό μεταξύ των διαφόρων σημείων πρόσβασης. Η απρόσκοπτη ολοκλήρωση με το κυψελωτό δίκτυο είναι πολύ σημαντική για τα femtocells και παρέχει αξία για την οποία οι χρήστες είναι πρόθυμοι να πληρώσουν. Αυτές οι υπο διαχείριση υπηρεσίες περιλαμβάνουν τη δυνατότητα για τον πάροχο να προσφέρει ολοκληρωμένη διαχείριση από άκρο σε άκρο, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων σχετικά με το πού βρισκόμαστε, πώς είμαστε συνδεδεμένοι και διάφορες άλλες παραμέτρους διαχείρισης. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι πρόσφατες μελέτες που χρησιμοποιούν μια αρχιτεκτονική σύγκλισης ανάμεσα σε WiFi και 3G ασύρματα μόντεμ κατέδειξαν το πώς οι τεχνολογίες θα μπορούσαν να συνδυαστούν για να εκμεταλλευτούμε και τις δύο μορφές συνδεσιμότητας για περαιτέρω ενίσχυση του ρυθμού δεδομένων και της συνολικής αξιοπιστίας. Με λίγα λόγια, φαίνεται ότι femtocells και WiFi είναι συμπληρωματικές προσεγγίσεις για την αποσυμφόρηση των δεδομένων από το κυψελωτό δίκτυο και αναμένονται να είναι πολύ επιτυχημένες στα επόμενα χρόνια.

Τέλος, το φάσμα αποτελεί ένα κρίσιμο ρυθμιστικό ζήτημα. Δεδομένου ότι τα femtocells μπορούν να συνυπάρξουν στο ίδιο φάσμα με τα macrocells, δεν υπάρχει ανάγκη για συγκεκριμένες αναθέσεις φάσματος στα femtocells. Αν και οι αρχικές αναπτύξεις έχουν χρησιμοποιήσει ξεχωριστές ή εν μέρει ξεχωριστές ζώνες για την ανάπτυξη των femtocells, υπάρχει σημαντική πίεση στους παρόχους να προχωρήσουν σε αναπτύξεις διαμοιραζόμενων φερουσών. Αυτό καθοδηγείται από την αυξημένη ζήτηση και την έλλειψη φάσματος. Οι πάροχοι έχουν επίσης την ανάγκη για μια προσέγγιση που λειτουργεί απρόσκοπτα σε όλες τις χώρες, ελαχιστοποιώντας τις ρυθμίσεις και τις λειτουργικές δαπάνες. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ενδιαφέρον για συγκεκριμένες αναθέσεις femtocell. Για παράδειγμα, η βρετανική ρυθμιστική αρχή Ofcom προτείνει να διατεθεί ένα τμήμα (2 x 20 MHz) από τη ζώνη των 2.6 GHz ειδικά για χρήση χαμηλής ισχύος.

4. ΥΠΗΡΕΣΙΑ VoIP ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE/LTE-ADVANCED

Αν και η κίνηση δεδομένων ολοένα αυξάνεται, η υπηρεσία φωνής εξακολουθεί να αποτελεί την πλειοψηφία των εσόδων των παρόχων κινητών επικοινωνιών. Δεδομένου ότι πάνω από το 80% των εσόδων των παρόχων προέρχεται από κίνηση φωνής και SMS, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα βιώσιμο και προτυποποιημένο σύστημα για την παροχή αυτών των υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, το LTE/LTE-Advanced έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίξει αποτελεσματικά όχι μόνο τις υπηρεσίες δεδομένων, αλλά και την υπηρεσία φωνής με υψηλή ποιότητα. Καθώς το LTE/LTE-Advanced υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες πακέτων, η υπηρεσία φωνής θα είναι φωνή μέσω IP (Voice over IP-VoIP) και όχι μέσω μεταγωγής κυκλώματος [33].

Το VoIP έχει τουλάχιστον τρία χαρακτηριστικά που πρέπει να εξεταστούν στο LTE: [27] Ριπαία κίνηση χαμηλού ρυθμού δεδομένων, αυστηρή απαίτηση για ποιότητα υπηρεσίας με βάση την καθυστέρηση πακέτων και μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών. Αυτά τα ζητήματα αποτελούν προκλήσεις για τις λειτουργίες της διαχείρισης ραδιοπόρων (Radio Resource Management-RRM).

4.1 Αλγόριθμοι κωδικοποίησης φωνής για VoIP

Τα GSM δίκτυα ξεκίνησαν με τον κωδικοαποκωδικοποιητή ομιλίας (codec) FR (Full Rate) και εξελίχθηκαν με τον codec EFR (Enhanced Full Rate). Ο codec AMR (Adaptive Multi-Rate) προστέθηκε στην Έκδοση 98 του 3GPP για το GSM με σκοπό την προσαρμογή του ρυθμού κωδικοποίησης ανάλογα με τις ραδιοσυνθήκες. Οι ρυθμοί δεδομένων του AMR κυμαίνονται από 4.75 kbps έως 12.2 kbps. Ο υψηλότερος ρυθμός AMR ισοδυναμεί με το ρυθμό του EFR. Ο AMR χρησιμοποιεί ένα ρυθμό δειγματοληψίας 8 kHz, που παρέχει 300-3400 Hz εύρος ζώνης ήχου. Ο ίδιος AMR codec συμπεριλήφθηκε στην Έκδοση 99 για WCDMA. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στο LTE/LTE-Advanced [33].

Ο ευρυζωνικός (wideband) AMR (AMR-WB) codec προστέθηκε στην Έκδοση 5 του 3GPP. Ο AMR-WB χρησιμοποιεί ένα ρυθμό δειγματοληψίας 16 kHz, που παρέχει 50-7000 Hz εύρος ζώνης ήχου και ουσιαστικά καλύτερη ποιότητα φωνής και καλύτερη μέση γνωμοβαθμολογία (MOS). Δεδομένου ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας του AMR-WB είναι διπλάσιος από το ρυθμό δειγματοληψίας του AMR, το AMR συχνά αναφέρεται ως AMR-NB (narrowband-στενής ζώνης). Ο ρυθμός δεδομένων του AMR-WB κυμαίνεται από 6.6 kbps έως 23.85 kbps. Ο συνήθης ρυθμός είναι 12.65 kbps, που είναι παρόμοιος με το AMR των 12.2 kbps. Ο AMR-WB προσφέρει σαφώς καλύτερη ποιότητα φωνής από τον AMR με τον ίδιο ρυθμό δεδομένων.

Υπάρχουν επίσης και άλλοι codecs που χρησιμοποιούνται για VoIP. Ορισμένα παραδείγματα είναι ο iLBC (Internet Low Bit Rate Codec) με ρυθμό κωδικοποίησης 13 kbps, που χρησιμοποιείται στο Skype και στο GoogleTalk, ο G.711 με ρυθμό 64 kbps, ο G.723.1 με ρυθμό 5.3 kbps ή 6.3 kbps και ο G.729 με ρυθμό 8 kbps.

Το G.729a [20] αποτελεί μια από τις πιο γνωστές επεκτάσεις του G.729, ενός αλγορίθμου συμπίεσης δεδομένων ήχου που συμπιέζει ψηφιακή φωνή σε πακέτα διάρκειας 10 ms. Περιγράφεται επίσημα ως κωδικοποίηση ομιλίας στα 8 kbps χρησιμοποιώντας την αλγεβρική κωδικοδιεγειρόμενη γραμμική πρόλεξη συζυγούς δόμησης (conjugate structure algebraic code excited linear prediction – CS-ACELP).

Τα χαρακτηριστικά του G.729a είναι:

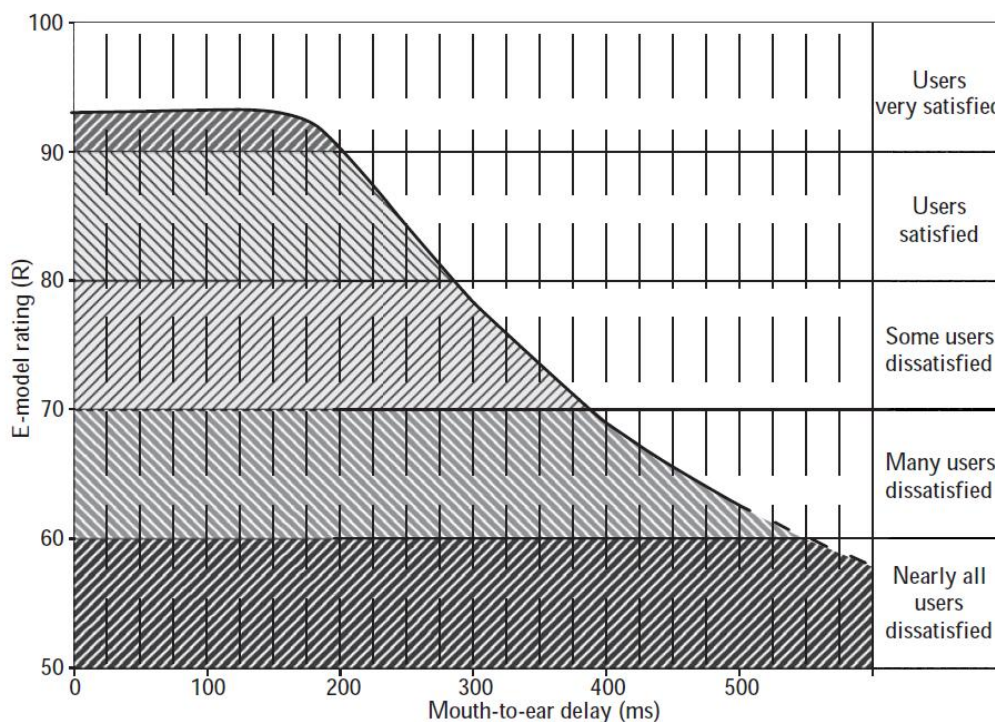
- Συχνότητα δειγματοληψίας 8 kHz/16-bit (80 δείγματα για πλαίσια των 10 ms)
- Σταθερός ρυθμός δεδομένων (8 kbps, πλαίσια των 10 ms)

- Σταθερό μέγεθος πλαισίου (10 bytes για πλαίσια των 10 ms)
- Η αλγοριθμική καθυστέρηση, η οποία είναι σχετικά χαμηλή, ανέρχεται σε 15 ms ανά πλαίσιο, με 5 ms μέριμνα καθυστέρησης
- Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου εκτιμάται σε 15, με μια σχετική κλίμακα, όπου η πολυπλοκότητα του codec G.711 είναι 1 και του G.723.1 είναι 25
- Απαιτεί λιγότερη υπολογιστική ισχύ από το G.729, ωστόσο έχει το κόστος της οριακά μειωμένης ποιότητας ομιλίας

4.2 Απαιτήσεις VoIP

Υπάρχει ένα σύνολο απαιτήσεων ώστε το ραδιοδίκτυο να παρέχει μια υπηρεσία φωνής με αξιοπιστία και καλή ποιότητα. Μερικές από τις βασικές απαιτήσεις είναι [33], [27]:

- Ο αντίκτυπος της καθυστέρησης από στόμα προς αυτί σχετικά με την ικανοποίηση των χρηστών απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Η καθυστέρηση κατά προτίμηση θα πρέπει να είναι κάτω από 200 ms, που είναι παρόμοια με την καθυστέρηση στις κλήσεις τεχνολογίας GSM ή WCDMA. Η μέγιστη ανεκτή καθυστέρηση από στόμα προς αυτί για φωνή είναι της τάξεως των 250 ms. Υποθέτοντας ότι η καθυστέρηση για το δίκτυο πυρήνα είναι περίπου 100 ms, τότε η ανεκτή καθυστέρηση για τον έλεγχο ραδιοζεύξης (Radio Link Control-RLC) και για αποθήκευση (buffering), ανίχνευση (sensing) και προγραμματισμό (scheduling) ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control -MAC) και πρέπει να είναι αυστηρά κάτω από 150 ms. Συνεπώς, υποθέτοντας ότι και οι δύο τελικοί χρήστες είναι χρήστες του επίγειου δικτύου ραδιοπρόσβασης E-UTRAN, τότε η ανεκτή καθυστέρηση για αποθήκευση και προγραμματισμό είναι μικρότερη από 80 ms. Μια δέσμευση καθυστέρησης των 50 ms (για καθυστέρηση από τον eNB προς το UE) έχει επιλεγεί στις αξιολογήσεις επίδοσης του 3GPP για την καλύτερη αντιμετώπιση της μεταβλητότητας των καθυστερήσεων από άκρο σε άκρο.



Σχήμα 2. Απαιτήσεις καθυστέρησης από στόμα προς αυτί [33]

- Το υποσύστημα IP πολυμέσων (IP Multimedia Subsystem-IMS) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της VoIP. Το IMS παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με την απαιτούμενη QoS στο ραδιοδίκτυο με τη χρήση του προτυποποιημένου από το 3GPP ελέγχου πολιτικής και τιμολόγησης (Policy and Charging Control-PCC). Το ραδιοδίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να έχει τους αλγορίθμους που θα προσφέρουν την απαιτούμενη QoS καλύτερα από ότι η πολιτική βέλτιστης προσπάθειας. Η QoS περιλαμβάνει κυρίως απαιτήσεις καθυστέρησης, ποσοστού σφαλμάτων και εύρους ζώνης.
- Τα ποσοστά των κλήσεων που διακόπτονται είναι πολύ χαμηλά στα σημερινά βελτιστοποιημένα GSM/WCDMA δίκτυα - στην καλύτερη περίπτωση κάτω από 0.3%. Το VoIP σε LTE πρέπει να προσφέρει παρόμοια διατηρησιμότητα (retainability) συμπεριλαμβανομένης της ομαλής διαλειτουργικότητας (interworking) με τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος GSM/WCDMA. Η λειτουργικότητα της μεταπομπής από VoIP σε LTE σε GSM/WCDMA μεταγωγή κυκλώματος ονομάζεται ενιαία συνέχιση κλήσεων (Single Radio Voice Call Continuity-SR-VCC).
- Το μέγεθος του πακέτου με χρήση του AMR 12.2 kbps είναι 31 bytes, ενώ η επικεφαλίδα IP είναι 40-60 bytes. Η συμπίεση της IP επικεφαλίδας είναι μια υποχρεωτική απαίτηση για μια αποδοτική λύση VoIP. Η συμπίεση της IP επικεφαλίδας απαιτείται τόσο στο UE όσο και στον eNB.
- Οι περιπτώσεις περιαγωγής (roaming) VoIP χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή ειδικά αν υπάρχουν κάποια LTE δίκτυα που έχουν σχεδιαστεί για μετάδοση VoIP και δεδομένων, ενώ ορισμένα δίκτυα έχουν σχεδιαστεί μόνο για μετάδοση δεδομένων, χωρίς τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για φωνή.
- Η βελτιωμένη παγκόσμια επίγεια ραδιοπρόσβαση (Enhanced Universal Terrestrial Radio Access - E-UTRA) θα πρέπει να υποστηρίζει αποτελεσματικά διάφορους τύπους υπηρεσίας όπως web-browsing, ροή βίντεο, VoIP, ή ακόμα και πιο προηγμένες υπηρεσίες (π.χ. βίντεο πραγματικού χρόνου) στο πεδίο μεταγωγής πακέτου. Η φωνή και άλλες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου στο πεδίο μεταγωγής κυκλώματος πρέπει να υποστηρίζονται από το E-UTRAN μέσω του πεδίου μεταγωγής πακέτου με τουλάχιστον ίση ποιότητα όπως στο 3G (π.χ. σε όρους εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης).
- Η υπηρεσία VoIP θα πρέπει να υποστηρίζεται με την ίδια τουλάχιστον αποδοτικότητα backhaul και καθυστέρηση, όπως η φωνή μέσω δικτύων μεταγωγής κυκλώματος UMTS.
- Η χωρητικότητα του συστήματος, που ορίζεται ως ο αριθμός των χρηστών σε μια κυψέλη, όταν πάνω από το 95% των χρηστών είναι ικανοποιημένοι, περιορίζεται από τα όρια διακοπής υπηρεσίας που ορίζονται στις αναφορές του 3GPP. Ένα χρήστης VoIP υφίσταται διακοπή υπηρεσίας αν λιγότερο από το 98% των πλαισίων ομιλίας παραδίδονται επιτυχώς μέσα σε 50 ms καθυστέρηση ασύρματης διεπαφής.
- Η VoIP κίνηση μέσω του AMR codec είναι αρκετά ριπαία (bursty): Υπάρχει ένα πακέτο VoIP σε χρονικά διαστήματα 20 ms κατά τη διάρκεια της ομιλίας και ένα SID (Silence Insertion Descriptor) πακέτο σε χρονικά διαστήματα 160 ms κατά τη διάρκεια της σιγής. Έτσι, για οποιοδήποτε δεδομένο χρονικό διάστημα μετάδοσης (Transmission Time Interval-TTI), μόνο λίγοι από τους ενεργούς χρήστες πρέπει να προγραμματιστούν. Ταυτόχρονα, κάθε μη-προγραμματισμένος χρήστης συμβάλλει στις ανεκτέλεστες αιτήσεις προγραμματισμού για μετέπειτα TTIs. Δεδομένου ότι αυτές οι ανεκτέλεστες

αιτήσεις μπορεί να συσσωρευτούν με αποτέλεσμα τη στασιμότητα των πόρων για πολλούς χρήστες, ο προγραμματισμός θα πρέπει να φροντίσει ώστε η καθυστέρηση αποθήκευσης του κάθε χρήστη VoIP να λαμβάνεται υπόψη στις αποφάσεις προγραμματισμού.

- Δεδομένου ότι το VoIP είναι υπηρεσία αυστηρά περιορισμένης καθυστέρησης, ο προγραμματισμός πακέτου χρειάζεται να λάβει υπόψη την καθυστέρηση αποθήκευσης των UEs. Ο δυναμικός προγραμματισμός πακέτων παρέχει σημαντικό κέρδος για πολλούς χρήστες στο πεδίο συχνοτήτων και για κίνηση τύπου βέλτιστης προσπάθειας κυκλοφορίας. Ωστόσο, λόγω των χαρακτηριστικών του VoIP που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αρκετοί αλγόριθμοι εμμένοντος προγραμματισμού (όπως ο πλήρως εμμένων-fully persistent και ο ημι-εμμένων προγραμματισμός-semi-persistent) έχουν προταθεί από το 3GPP. Αυτοί οι μηχανισμοί προγραμματισμού περιορίζουν ή ακόμη και στερούνται εντελώς το κέρδος για πολλούς χρήστες στο πεδίο συχνοτήτων, αλλά κινούνται γύρω από ένα δύσκολο πρόβλημα της χωρητικότητας PDCCH που περιορίζει τη συνολική χωρητικότητα VoIP. Ωστόσο, ο δυναμικός προγραμματισμός πακέτου μπορεί να βελτιωθεί με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας VoIP με περιορισμούς του διαύλου ελέγχου. Με την ομαδοποίηση πακέτων, ο eNB μπορεί να αποφασίσει να συνδυάσει ένα ή περισσότερα πακέτα VoIP σε μία μονάδα δεδομένων πρωτοκόλλου (Protocol Data Unit-PDU) βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση μαζί με προσαρμογή ζεύξης (link adaptation) λόγω της καλύτερης αξιοποίησης των πόρων.
- Για την κινητικότητα, το E-UTRAN χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ισχυρής μεταπομπής με τη βοήθεια του UE: το UE μετρά την ποιότητα του σήματος κάτω ζεύξης και στέλνει αναφορές μετρήσεων στον eNB είτε περιοδικά είτε όταν ενεργοποιηθεί ένα συμβάν (όπως όταν ένας άλλος eNB γίνει ισχυρότερος από ότι ο τρέχων eNB). Ο eNB τότε παίρνει τις τελικές αποφάσεις μεταπομπής με βάση τις λαμβανόμενες αναφορές μετρήσεων. Συνήθως χρησιμοποιούνται η μέτρηση μέσου όρου, τα περιθώρια και οι μετρητές μεταπομπών προκειμένου να αποφευχθούν οι υπερβολικές μεταπομπές ή οι μεταπομπές τύπου πινγκ-πονγκ. Κατά τη διάρκεια μιας μεταπομπής ο παλιός εξυπηρετών eNB απελευθερώνει τους buffers, πράγμα που σημαίνει ότι τα VoIP πακέτα που περίμεναν για μια αναμετάδοση θα πρέπει να απορριφθούν. Επίσης, ένα UE δεν μπορεί να προγραμματισθεί, ενώ η μεταπομπή είναι σε εξέλιξη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πρόσθετες καθυστερήσεις για τις PDUs. Μετά από την εγκατάσταση σύνδεσης με το νέο eNB οι επεξεργασίες προγραμματισμού πακέτου συνεχίζουν κανονικά.

4.3 Επιλογές για την παροχή VoIP μέσω LTE

Έχουν εξεταστεί διάφορες πιθανές λύσεις για την παροχή VoIP μέσω LTE. Ορισμένες από αυτές περιγράφονται παρακάτω [28], [29]:

- **Επαναφορά μεταγωγής κυκλώματος (Circuit Switched Fall Back-CSFB):** Η επιλογή CSFB για την παροχή φωνής μέσω LTE έχει προτυποποιηθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές 3GPP 23.272. Ουσιαστικά η CSFB χρησιμοποιεί διάφορες διαδικασίες και στοιχεία του δικτύου ώστε να επιτρέψει στο κύκλωμα να γυρίσει στη 2G ή 3G σύνδεση πριν πραγματοποιηθεί μια κλήση μεταγωγής κυκλώματος.

Η προδιαγραφή επιτρέπει επίσης τη μεταφορά SMS δεδομένου ότι είναι απαραίτητη για πολλές διαδικασίες. Για να επιτευχθεί αυτό, η συσκευή

χρησιμοποιεί μια διασύνδεση γνωστή ως πύλη εξυπηρέτησης (serving gateway-SGW) που επιτρέπει την αποστολή μηνυμάτων μέσω ενός καναλιού LTE.

Επιπλέον, η CSFB απαιτεί τροποποίηση σε στοιχεία εντός του δικτύου, συγκεκριμένα τα κέντρα μεταγωγής (Mobile Switching Center-MSC) καθώς και υποστήριξη για νέες συσκευές.

Ένα άλλο μειονέκτημά της είναι ο μεγάλος απαιτούμενος χρόνος εγκατάστασης της κλήσης.

- **Ταυτόχρονη φωνή LTE (Simultaneous Voice LTE - SV-LTE):** Η SV-LTE επιτρέπει την εκτέλεση υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου LTE ταυτόχρονα με μια υπηρεσία φωνής μεταγωγής κυκλώματος. Η SV-LTE παρέχει την εγκατάσταση της CSFB την ίδια στιγμή που τρέχει μια υπηρεσία δεδομένων μεταγωγής πακέτου. Αυτή είναι μια επιλογή που πολλές επιχειρήσεις θα επιλέξουν. Ωστόσο, αυτό έχει σοβαρές επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

- **Φωνή μέσω LTE μέσω γενικής πρόσβασης (Voice over LTE via Generic Access - VoLGA):** Το πρότυπο VoLGA βασίστηκε στο υπάρχον 3GPP πρότυπο του δικτύου γενικής πρόσβασης (Generic Access Network-GAN) και ο στόχος ήταν να επιτρέψει στους χρήστες του LTE να λαμβάνουν μια συνεκτική ποιότητα εμπειρίας φωνής με εκείνη των 2G/3G τεχνολογιών.

Για τους παρόχους, ο στόχος της VoLGA ήταν να παρέχει μια προσέγγιση χαμηλού κόστους και χαμηλού κινδύνου σε νέες αναπτύξεις δικτύων LTE.

Όμως, η λειτουργικότητα VoLGA βασίζεται στον ελεγκτή πρόσβασης δικτύου VoLGA (VoLGA Access Network Controller - VANC) που απαιτεί εκτενή ανάπτυξη.

- **Ενιαία φωνή (One voice)/αργότερα ονομάστηκε φωνή μέσω LTE (VoLTE):** Το VoLTE παρέχει φωνή πάνω από ένα σύστημα LTE χρησιμοποιώντας το IMS. Το IMS είναι ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων μέσω IP.

Το VoLTE επιτρέπει σε μια ποικιλία υπηρεσιών να λειτουργούν απρόσκοπτα.

Το κύριο μειονέκτημά του είναι η πολυπλοκότητα, που αποτελεί το κύριο εμπόδιο για μεγάλης κλίμακας εμπορικές αναπτύξεις IMS.

4.3.1 Φωνή μέσω LTE (VoLTE)

Η λύση VoLTE θεωρείται ως η καλύτερη μελλοντική λύση για τη μακροπρόθεσμη εξυπηρέτηση φωνής στο LTE [29]. Η μελέτη αυτής της πλατφόρμας που είναι πλήρως βασισμένη στο IP για την πολυμεσική επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένων των κλήσεων φωνής, ξεκίνησε πριν από αρκετά χρόνια για το UMTS. Πρόσφατα, έχουν καθοριστεί βελτιώσεις για τη μεταπομπή των εν εξελίξει κλήσεων στο IMS προς δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος, όπως το GSM, όταν ο χρήστης αποχωρεί από μια περιοχή κάλυψης UMTS ή LTE κατά τη διάρκεια μιας κλήσης. Ωστόσο, η διαχείριση της πολυπλοκότητας αυτής της λύσης αποτελεί μια πρόκληση για τις εμπορικές αναπτύξεις IMS.

Το IMS σχεδιάστηκε αρχικά μόνο ως μια IP πλατφόρμα, και ως εκ τούτου δεν αναπτύχθηκαν οι προδιαγραφές για τις υπηρεσίες περιαγωγής μεταξύ ενός δικτύου IP και ενός δικτύου μεταγωγής κυκλώματος. Αργότερα, προτυποποιήθηκαν επεκτάσεις για να καταστεί δυνατή η μεταπομπή των κλήσεων μεταξύ ενός δικτύου που είναι βασισμένο στο IP και ενός δικτύου πρόσβασης μεταγωγής κυκλώματος.

Για την παροχή της υπηρεσίας VoLTE, ορίζονται τρεις διεπαφές [28]:

- **Διεπαφή χρήστη-δικτύου (User Network Interface-UNI):** Αυτή η διεπαφή βρίσκεται μεταξύ του τερματικού και του δικτύου.
- **Διεπαφή περιαγωγής δικτύου-δικτύου (Roaming Network Network Interface R-NNI):** Η R-NNI είναι μια διεπαφή που βρίσκεται ανάμεσα στο οικείο (home) δίκτυο και το δίκτυο επίσκεψης (visited). Αυτό χρησιμοποιείται για ένα χρήστη που δεν είναι συνδεδεμένος στο οικείο δίκτυό του, δηλαδή σε περιαγωγή.
- **Διεπαφή διασύνδεσης δικτύου-δικτύου (Interconnect Network Network Interface I-NNI):** Το I-NNI είναι η διεπαφή που βρίσκεται μεταξύ των δικτύων των δύο μερών που πραγματοποιούν μια κλήση.

Οι εργασίες σχετικά με τον ορισμό της VoLTE είναι σε εξέλιξη. Το VoLTE θα περιλαμβάνει μια σειρά από στοιχεία όπως τα ακόλουθα:

- Θα είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί η συνέχιση της κλήσης όταν ένας χρήστης μετακινείται από μια περιοχή κάλυψης LTE σε μια περιοχή όπου απαιτείται επαναφορά σε άλλη τεχνολογία. Αυτή η μορφή της μεταπομπής θα πρέπει να επιτευχθεί με τη χρήση SR-VCC.
- Θα είναι σημαντικό να παρέχεται η βέλτιστη δρομολόγηση των κομιστών (bearers) για κλήσεις φωνής όταν ο συνδρομητής είναι σε περιαγωγή.
- Εξίσου σημαντική θα είναι η δημιουργία εμπορικών πλαισίων για την περιαγωγή και τη διασύνδεση για υπηρεσίες που υλοποιούνται με τη χρήση VoLTE. Αυτό θα επιτρέψει τη σύσταση συμφωνιών περιαγωγής.
- Για οποιεσδήποτε υπηρεσίες, είναι απαραίτητη η ενδεδειγμένη ασφάλεια και ο έλεγχος απάτης για την πρόληψη πειρατείας και μη εξουσιοδοτημένης εισόδου σε οποιαδήποτε περιοχή εντός του δικτύου.

Για την υλοποίηση του VoLTE η συσκευή πρέπει να έχει το κατάλληλο λογισμικό που θα παρέχει τη λειτουργικότητα VoLTE. Επίσης το δίκτυο απαιτείται να είναι συμβατό με IMS. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά θέματα προκειμένου να καταστεί λειτουργικό το VoLTE, ιδίως λόγω των ιδιομορφιών του δικτύου πρόσβασης, όπου χρονικές καθυστερήσεις και ανωμαλίες διάδοσης αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα.

4.4 Κρίσιμα ζητήματα για την υπηρεσία VoIP μέσω LTE

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα κυψελωτά πρότυπα συμπεριλαμβανομένου του GSM, το LTE δεν έχει αποκλειστικά κανάλια για τηλεφωνία μεταγωγής κυκλώματος. Πρόκειται για ένα all-IP σύστημα που παρέχει μια IP σύνδεση από άκρο σε άκρο. Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια μορφή σύνδεσης φωνής μέσω ενός τυπικού LTE bearer, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια μορφή VoIP [28].

Ο στόχος για κάθε υπηρεσία φωνής είναι να αξιοποιήσει τη χαμηλή καθυστέρηση και τα QoS χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα στο LTE για να εξασφαλίσει ότι κάθε υπηρεσία φωνής προσφέρει μια βελτίωση σε σχέση με τα πρότυπα των 2G και 3G δικτύων.

Ενώ προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, η τεχνολογία VoIP αποδεικνύεται ότι είναι λιγότερο εύρωστη από εκείνη του PSTN [34]. Η φωνή πρέπει να συμπιέζεται, να μεταδίδεται κι έπειτα να αποσυμπιέζεται. Οι διαδικασίες αυτές πρέπει να γίνονται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Όσο καθυστερούν (λόγω αργής σύνδεσης ή υλικού), τόσο η ποιότητα της κλήσης υποβαθμίζεται οδηγώντας σε φαινόμενα ηχούς, θορύβου κλπ.

Πολλές φορές η χρήση της VoIP γίνεται ταυτόχρονα με άλλες εφαρμογές όπως κατέβασμα αρχείων, e-mail κλπ. Σε περιόδους αιχμής, το εύρος ζώνης για VoIP μπορεί να είναι ανεπαρκές, προκαλώντας την επιδείνωση της ποιότητας της κλήσης.

Η ασφάλεια είναι μεγάλης σημασίας πρόκληση για το VoIP, όπως συμβαίνει και με άλλες τεχνολογίες του διαδικτύου. Τα σημαντικότερα θέματα ασφάλειας στο VoIP είναι ιοί, κακόβουλο λογισμικό, άρνηση παροχής υπηρεσιών, επιθέσεις ψαρέματος κλπ.

Οι πάροχοι υπηρεσιών VoIP δεν δεσμεύονται από κανονισμούς να προσφέρουν κλήσεις έκτακτης ανάγκης αν και πολλές εταιρείες καταβάλλουν προσπάθειες για να παρέχουν τις κλήσεις έκτακτης ανάγκης στην υπηρεσία τους.

Δεδομένου ότι τα VoIP πακέτα είναι σχετικά μικρά, υπάρχουν μερικές προκλήσεις για την κατανομή των πόρων [27]. 2-4 σύμβολα του κάθε φέροντος σε κάθε PRB προορίζονται αποκλειστικά για τον έλεγχο των δεδομένων (σύμβολα αναφοράς, πληροφορίες ανάθεσης κλπ), ανάλογα με την ανάγκη για σηματοδότηση ανάθεσης. Με τη ζήτηση πολλών χρηστών να προγραμματίζεται ταυτόχρονα, η χωρητικότητα του διαύλου ελέγχου θα μπορούσε να αποτελεί έναν περιορισμό για τη χωρητικότητα VoIP λόγω έλλειψης bits σηματοδότησης.

Η επίτευξη μιας πλήρους παροχής VoIP στο LTE εγείρει σημαντικά προβλήματα που θα απαιτήσουν χρόνο για να επιλυθούν. Οι πρώτες υλοποιήσεις έλαβαν χώρα το 2010, συνεπώς είναι απαραίτητο να βρεθεί μια λύση εντός σύντομου χρονικού διαστήματος.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

5.1 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Σύμφωνα με το πρότυπο της ITU-T X.902, η ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service-QoS) ορίζεται ως ένα σύνολο απαιτήσεων ποιότητας επί της συλλογικής συμπεριφοράς ενός ή περισσότερων αντικειμένων. Η ποιότητα υπηρεσίας αφορά σε χαρακτηριστικά της σύνδεσης, όπως ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας, η καθυστέρηση, η πιθανότητα αποτυχίας του συστήματος, η πιθανότητα αποτυχίας αποθήκευσης κλπ [7].

Οι συνιστώσες της ποιότητας υπηρεσίας, όπως καθορίζονται στο πρότυπο ETSI TS 102 και απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα, είναι [8]:

- **Διαθεσιμότητα δικτύου (Network Availability):** Είναι η πιθανότητα οι υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών να παρέχονται στο χρήστη.
- **Προσβασιμότητα δικτύου (Network Accessibility):** Είναι η πιθανότητα ο χρήστης να εγγραφεί επιτυχώς στο δίκτυο.
- **Προσβασιμότητα υπηρεσίας (Service Accessibility):** Αν ο συνδρομητής επιθυμεί να χρησιμοποιήσει μια υπηρεσία, τότε ο πάροχος δικτύου οφείλει να του εξασφαλίζει πρόσβαση στην υπηρεσία, το συντομότερο δυνατό.
- **Ακεραιότητα υπηρεσίας (Service Integrity):** Περιγράφει την ποιότητα υπηρεσίας κατά τη διάρκεια της χρήσης της.
- **Διατηρησιμότητα υπηρεσίας (Service Retainability):** Περιγράφει τον τερματισμό των υπηρεσιών με ή χωρίς τη θέληση του χρήστη.



Σχήμα 3. Ιεράρχηση των συνιστωσών ποιότητας υπηρεσίας

Οι βασικότερες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα υπηρεσίας είναι η καθυστέρηση, η μεταβολή της καθυστέρησης και η απώλεια πληροφορίας που συνήθως μεταφράζεται σε απώλεια πακέτων (packet loss ratio-PLR). Μια ένδειξη των προτυποποιημένων στόχων επίδοσης για εφαρμογές ήχου φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα [30].

Πίνακας 4. Στόχοι επίδοσης για εφαρμογές ήχου

Εφαρμογή	Τυπικοί ρυθμοί δεδομένων	Παράμετροι επίδοσης και τιμές-στόχοι		
		Μονόδρομη καθυστέρηση	Μεταβολή καθυστέρησης	Απώλεια πακέτων
Συνομιλία	4-64 kbps	< 150 ms (προτιμώμενο) < 400 ms (όριο)	< 1 ms	< 3%
Μηνυματοδοσία φωνής	4-32 kbps	< 1 s (playback) < 2 s (εγγραφή)	< 1 ms	< 3%
Υψηλής ποιότητας ροή ήχου	16-128 kbps	< 10 s	<< 1 ms	< 1%

Υπάρχουν οκτώ διαφορετικές ομάδες οι οποίες καλύπτουν το φάσμα των εφαρμογών φωνής, βίντεο και δεδομένων. Μέσα σε αυτές τις οκτώ ομάδες υπάρχει ένας διαχωρισμός μεταξύ των εφαρμογών που μπορούν να ανεχτούν κάποια απώλεια πληροφορίας και των εφαρμογών που δεν μπορούν να ανεχτούν καμία απώλεια πληροφορίας, καθώς και τέσσερις γενικοί τομείς ανοχής της καθυστέρησης. Το παρακάτω σχήμα παρέχει ένα συνιστώμενο μοντέλο για τις κατηγορίες QoS του τελικού χρήστη [30].

Ανεκτικό στα σφάλματα	Συνομιλία και βιντεοκλήση	Μηνυματοδοσία φωνής/βίντεο	Ροή ήχου και βίντεο	Φαξ
Μη ανεκτικό στα σφάλματα	Εντολή/έλεγχος (π.χ. Telnet, διαδραστικά παιχνίδια)	Συναλλαγές (π.χ. ηλεκτρονικό εμπόριο, email)	Μηνυματοδοσία, λήψεις αρχείων (π.χ. FTP, ακίνητη εικόνα)	Υπόβαθρο (π.χ. Usenet)
	Διαδραστικό (καθυστέρηση <<1s)	Αναταποκριτικό (καθυστέρηση ~2s)	Έγκαιρο (καθυστέρηση ~10s)	Μη κρίσιμο (καθυστέρηση >>10s)

Σχήμα 4. Χρηστοκεντρικές κατηγορίες QoS

5.2 Ποιότητα Εμπειρίας (QoE)

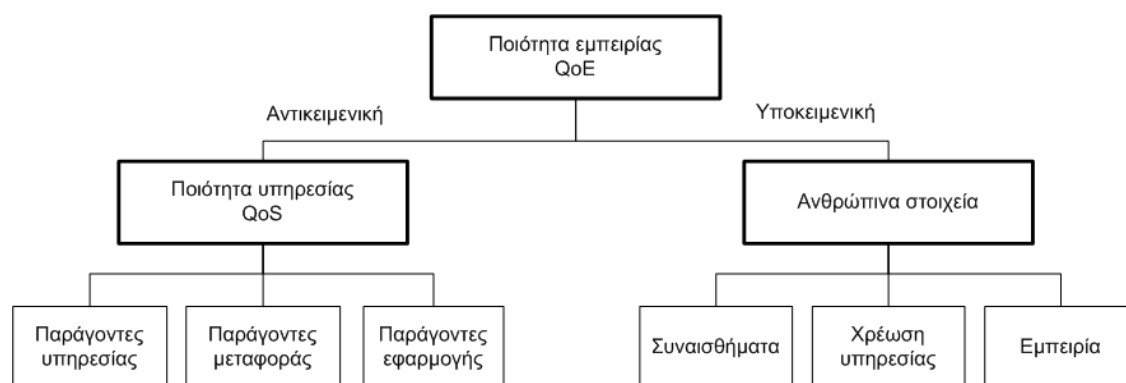
Σύμφωνα με τον ορισμό της ITU-T [9], η ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience-QoE) είναι η συνολική αποδεκτότητα μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας, όπως αυτή γίνεται υποκειμενικά αντιληπτή από τον τελικό χρήστη. Η ποιότητα εμπειρίας περιλαμβάνει τις ολοκληρωμένες επιδράσεις στο σύστημα από άκρο σε άκρο (πελάτη, τερματικό, δίκτυο, υποδομή υπηρεσίας, κλπ.). Η συνολική αποδεκτότητα μπορεί να επηρεαστεί από τις προσδοκίες των χρηστών.

Η αποδεκτότητα δεν είναι ισοδύναμη με την QoE [10]. Για παράδειγμα, μια εικόνα βίντεο χαμηλής ανάλυσης θα έχει χαμηλότερη ποιότητα εμπειρίας από ότι μια εικόνα υψηλής ανάλυσης, αλλά μπορεί να είναι απολύτως αποδεκτή για ορισμένες εφαρμογές και υπηρεσίες, ανάλογα με τη συσκευή, το φυσικό μέγεθος της οθόνης και το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται. Αυτό που έχει σημασία για τους συνδρομητές είναι το πόσο

καλά μια υπηρεσία ικανοποιεί τις προσδοκίες τους για αποτελεσματικότητα, λειτουργικότητα, διαθεσιμότητα και ευκολία χρήσης.

Ορισμένα χαρακτηριστικά της απόδοσης του συστήματος (QoS) συμβάλλουν στην ποιότητα εμπειρίας, όπως για παράδειγμα ο codec, ο ρυθμός κωδικοποίησης, η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και η διαθεσιμότητα. Υπάρχουν πρόσθετοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αντίδραση του τελικού χρήστη. Μερικοί από αυτούς επηρεάζουν την αντίληψη της ποιότητας, όπως το πλαίσιο της κρίσης (π.χ. μια συγκεκριμένη εικόνα θα αξιολογηθεί με διαφορετικό τρόπο στο πλαίσιο της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και με διαφορετικό τρόπο στο πλαίσιο ενός βίντεο στο διαδίκτυο), το πολιτισμικό υπόβαθρο, τα κίνητρα, η συναισθηματική κατάσταση κλπ. (Οι άμεσες αξιολογήσεις της QoE σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποκλείσουν τους παράγοντες αυτούς, δεδομένου ότι δεν βρίσκονται υπό τον έλεγχο ενός παρόχου). Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την κρίση του χρήστη είναι η προηγούμενη εμπειρία με το συγκεκριμένο τρόπο επικοινωνίας, το αντίτιμο για την υπηρεσία (το «value for money» όπως γίνεται αντιληπτό από το χρήστη για τη συγκεκριμένη υπηρεσία), τα οφέλη που του παρέχει η υπηρεσία (κινητικότητα) κλπ.

Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τους παράγοντες που συμβάλλουν στην QoE.



Σχήμα 5. Οι διαστάσεις της ποιότητας εμπειρίας

Η σχέση μεταξύ QoE και QoS μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους:

1. Δεδομένης μιας μέτρησης QoS, θα μπορούσε κανείς να προβλέψει την αναμενόμενη QoE για ένα χρήστη, με κατάλληλες υποθέσεις.
2. Δεδομένου ενός στόχου QoE για το χρήστη, θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει την καθαρή απαιτούμενη απόδοση της υπηρεσίας, με κατάλληλες υποθέσεις.

Οι τάσεις που αντικατοπτρίζουν την εμπειρία του χρήστη σχετικά με την ποιότητα φωνής είναι οι ακόλουθες [11]:

1. Η πολυπλοκότητα του δικτύου εισάγει επιπλέον υποβαθμίσεις στην ποιότητα φωνής. Ο τεράστιος αριθμός συσκευών και η IP τηλεφωνία καθιστά πιο δύσκολη την επίτευξη της υψηλής ποιότητας φωνής. Οι τάσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα την εμπειρία που απολαμβάνει ο χρήστης του δικτύου.

Οι κινητές συσκευές δοκιμάζονται πριν διαχυθούν στην αγορά. Παλαιότερα, ο αριθμός των συσκευών ήταν μικρότερος και δοκιμαζόταν ενδελεχώς. Σήμερα όμως, ο αριθμός των συσκευών στην αγορά αυξάνεται ενώ συνεχώς κυκλοφορούν νέα μοντέλα, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη δέσμευση πόρων για να δοκιμάζεται εκτενώς κάθε νέο μοντέλο. Η διαδικασία των δοκιμών γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη εξαιτίας των έντονων ανταγωνιστικών πιέσεων για συνεχή κυκλοφορία νέων μοντέλων και προσέλκυση πολλαπλών αγοραστικών ομάδων. Η ανικανότητα των κατασκευαστών να ελέγχουν αποτελεσματικά την ποιότητα φωνής σε ένα ευρύ φάσμα κινητών συσκευών έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη

συχνότητα εμφάνισης ακουστικής ηχούς, ακατάλληλων επιπέδων ήχου και θορύβου.

Εάν ο έλεγχος της ποιότητας φωνής ανάμεσα σε ένα μεγάλο αριθμό συσκευών είναι δύσκολος, τότε ο έλεγχος της ποιότητας αφού προστεθούν εξαρτήματα (π.χ. bluetooth) σε ένα κινητό είναι αδύνατος. Η αγορά είναι πλημμυρισμένη με εξαρτήματα κινητών συσκευών, τα οποία οι καταναλωτές αγοράζουν και συχνά διαμορφώνουν. Ο μεγάλος αριθμός των πιθανών αλληλεπιδράσεων μεταξύ κινητών και εξαρτημάτων δεν μπορεί να ελεγχθεί με οικονομικό τρόπο.

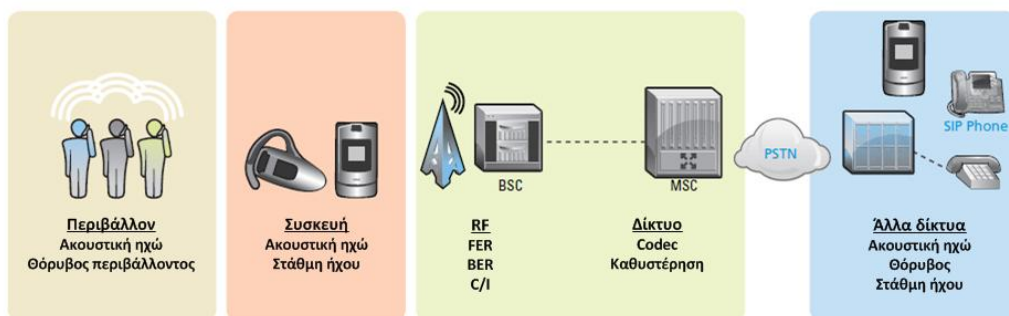
Μια πτυχή που μπορεί να ελέγξει ένας πάροχος είναι το δίκτυό του, καθώς η βιομηχανία έχει αναπτύξει μια εύρωστη μεθοδολογία για τον χαρακτηρισμό του δικτύου. Κατά τη δοκιμή του δικτύου, δύο είναι τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται κυρίως για να ορίσουν την ποιότητα φωνής:

- **Η ραδιοσυχνότητα (RF):** αξιολογεί την απόδοση της ασύρματης ζεύξης χρησιμοποιώντας μετρικά όπως ο ρυθμός εξάλειψης πλαισίου (Frame Erasure Rate-FER), ο ρυθμός σφάλματος bit (Bit Error Rate-BER), και ο λόγος φέροντος προς παρεμβολή (Carrier to Interference Ratio-C/I).
- **Η ποιότητα του δικτύου:** αξιολογεί την καθυστέρηση του δικτύου και την επιλογή του codec.

Ωστόσο, αυτός ο έλεγχος του δικτύου ολοκληρώνεται στην άκρη του δικτύου, όπου η κίνηση παραδίδεται σε άλλους φορείς για δρομολόγηση εντός των δικτύων τους. Δυστυχώς, αυτές οι διασυνδέσεις συχνά εισάγουν ακουστική και υβριδική ηχώ, θόρυβο, διαφορετικά επίπεδα ήχου και καθυστέρηση, που προστίθενται στην κακή ποιότητα φωνής.

2. Οι προσδοκίες των χρηστών για την ποιότητα φωνής από τα κινητά τηλέφωνα αυξάνονται, καθώς η βιομηχανία των κινητών επικοινωνιών ωριμάζει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της ανοχής για θέματα ποιότητας φωνής όπως ο θόρυβος και η ηχώ.

3. Δεδομένου ότι η χρήση του κινητού τηλεφώνου γίνεται συνήθης, όλο και περισσότερες κλήσεις ξεκινούν και τερματίζουν σε περιβάλλον με θόρυβο ή ακουστική ηχώ, εγείροντας θέματα ποιότητας.



Εικόνα 8. Πηγές υποβάθμισης της ποιότητας φωνής

5.3 Σχέση μεταξύ ποιότητας υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας

Οι έννοιες της ποιότητας υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας είναι αλληλένδετες. Στη βιβλιογραφία έχει προταθεί [32] μια θεμελιώδης σχέση μεταξύ της QoE και παραγόντων υποβάθμισης της ποιότητας, όπως η απώλεια πακέτων. Ως μια αναλυτική λύση της

σχέσεως μεταξύ QoE και της απώλειας πακέτων παρουσιάζουμε την υπόθεση IQX (εκθετική αλληλεξάρτηση των QoE και QoS). Η επαλήθευση αυτής της υπόθεσης γίνεται χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις χρήσει του codec iLBC.

Ο codec χαμηλού ρυθμού δεδομένων iLBC είναι ένας δωρεάν codec ομιλίας για υπηρεσία VoIP και έχει σχεδιαστεί για ομιλία στενής ζώνης. Υποστηρίζει δύο βασικά μήκη πλαισίου: (α) 304 bit κάθε 20 ms, δίνοντας 15.2 kbps, και (β) 400 bit κάθε 30 ms, δίνοντας 13.3 kbps. Το τελευταίο χρησιμοποιείται στο Skype όταν ο επεξεργαστής των χρησιμοποιούμενων μηχανημάτων είναι κάτω από 600 MHz.

Πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων, όπου χρησιμοποιήθηκε ο codec iLBC 13.3 kbps. Η πιθανότητα P_{loss} αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να χαθεί ένα πακέτο στην πορεία από το χρήστη A στο χρήστη B. Η μελέτη γίνεται για διάφορες πιθανότητες απώλειας από 0% έως 90% με βήμα 0.9%.

Για να εκφράσουμε την QoE της κλήσης VoIP, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο αξιολόγησης της ποιότητας PESQ που περιγράφεται στο πρότυπο της ITU-T P.862. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις τιμές μέσης γνωμοβαθμολογίας (MOS) που λαμβάνονται από τη μέθοδο PESQ σε συνάρτηση της πιθανότητας απώλειας πακέτων P_{loss} . Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα απώλειας πακέτου, τόσο μικρότερη είναι η τιμή MOS. Σε γενικές γραμμές, η QoE είναι συνάρτηση των παραγόντων επιρροής I_j , $1 \leq j \leq n$:

$$QoE = \Phi(I_1, I_2, \dots, I_n)$$

Ωστόσο, εδώ επικεντρωνόμαστε σε έναν μόνο παράγοντα που αποτελεί ένδειξη του QoS, την πιθανότητα απώλειας πακέτων P_{loss} , προκειμένου να εξαχθεί η θεμελιώδης σχέση μεταξύ της QoE και ενός συντελεστή υποβάθμισης της ποιότητας που αντιστοιχεί στο QoS. Ως εκ τούτου, η ιδέα είναι να προκύψει η συναρτησιακή σχέση $QoE = f(p_{loss})$. Εάν η QoE είναι πολύ υψηλή, τότε μια μικρή διαταραχή θα μειώσει έντονα την QoE. Από την άλλη πλευρά, εάν η QoE είναι ήδη χαμηλή, τότε μία περαιτέρω διαταραχή δε γίνεται σημαντικά αντιληπτή.

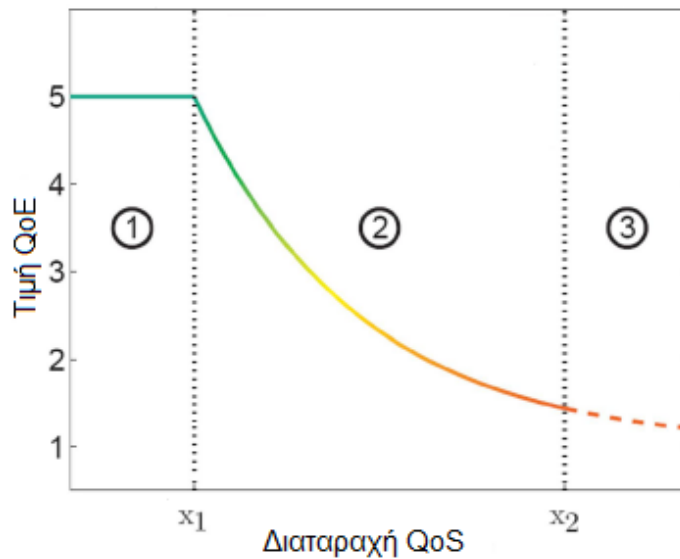
Θεωρούμε ότι η αλλαγή της QoE εξαρτάται από το επίπεδο προσδοκιών δεδομένης της μεταβολής της τιμής QoS. Μαθηματικά, αυτή η σχέση μπορεί να εκφραστεί με τον ακόλουθο τρόπο. Η υποβάθμιση της επίδοσης της QoE λόγω της απώλειας πακέτων είναι $\frac{\partial QoE}{\partial p_{loss}}$. Υποθέτοντας μια γραμμική εξάρτηση στο επίπεδο QoE, φτάνουμε στην

ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial QoE}{\partial p_{loss}} = -\beta \cdot (QoE - \gamma)$$

Η λύση για αυτή την εξίσωση υπολογίζεται εύκολα ως μια εκθετική συνάρτηση, η οποία εκφράζει τη βασική σχέση της υπόθεσης IQX:

$$QoE = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot p_{loss}} + \gamma$$



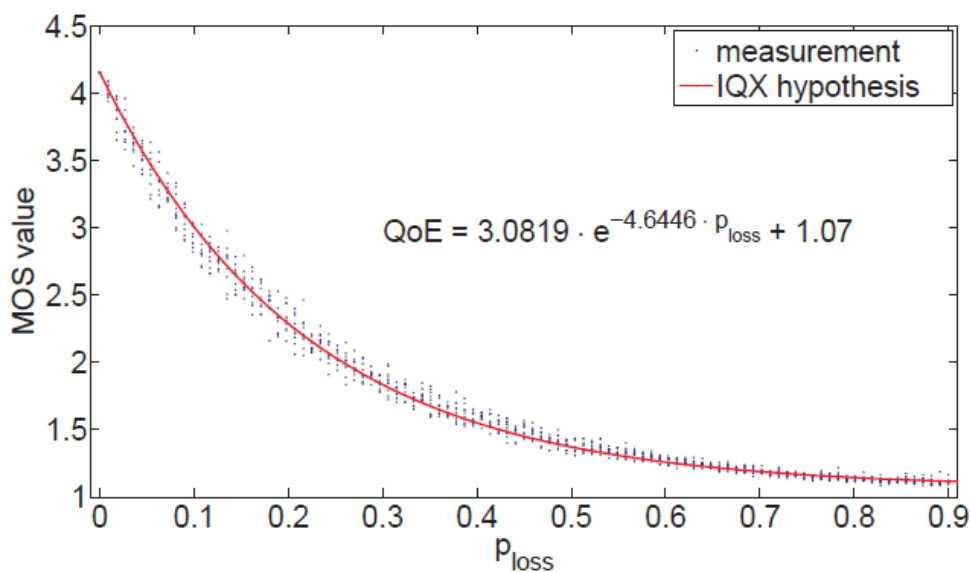
Σχήμα 6. Γενική αλληλεξάρτηση μεταξύ QoE και QoS

Στη γενική περίπτωση, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, υπάρχουν τρεις περιοχές που αναφέρονται στον τρόπο που ο χρήστης αντιλαμβάνεται τη διαταραχή μιας παραμέτρου QoS [35]:

- Η περιοχή 1 αντιπροσωπεύει τη σταθερή βέλτιστη QoE. Το x_1 είναι το κατώφλι κάτω από το οποίο ο χρήστης αισθάνεται το σύστημα να αντιδρά στιγμιαία.
- Η περιοχή 2 αντιπροσωπεύει τη βυθιζόμενη QoE. Όσο μεγαλύτερη είναι η QoE, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αντίκτυπος μιας πρόσθετης διαταραχής QoS.
- Η περιοχή 3 αντιπροσωπεύει τη μη αποδεκτή QoE. Το x_2 είναι το κατώφλι πάνω από το οποίο η μετάδοση γίνεται μη αποδεκτή σε ποιότητα.

Από τις μετρήσεις, παίρνουμε την παρακάτω φόρμουλα για iLBC codec (400 bits κάθε 30 ms):

$$QoE = 3.0819 \cdot e^{-4.6446 p_{loss}} + 1.07$$



Σχήμα 7. Εκθετική εκτίμηση της εξάρτησης της QoE από την P_{loss}

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απώλεια πακέτου είναι μόνο ένας παράγοντας υποβάθμισης που αποτελεί ένδειξη της QoS. Για μια γενική ποσοτικοποίηση της QoE, πρόσθετοι παράγοντες όπως η μεταβλητότητα της καθυστέρησης (jitter) πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Μια εφαρμογή της σχέσης μεταξύ QoE και QoS είναι εφικτή στο online πρόγραμμα myspeed.visualware.com, το οποίο επιτρέπει τον υπολογισμό των απαραίτητων παραμέτρων QoS για την αξιολόγηση του QoE.

5.4 Υποκειμενική αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας με χρήση της Μέσης Γνωμοβαθμολογίας (MOS)

Τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα παρέχουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών φωνής χρησιμοποιώντας πολλά συστήματα μετάδοσης. Η ταχεία ανάπτυξη των ψηφιακών τεχνολογιών έχει οδηγήσει σε αυξημένη ανάγκη για αξιολόγηση των συστημάτων μετάδοσης και των συστατικών τους. Το πρότυπο της ITU-T P.800 συστάθηκε το 1996 για να περιγράψει τις μεθόδους υποκειμενικής αξιολόγησης που καθορίζουν το πόσο ικανοποιητική αναμένεται να είναι η επίδοση δεδομένων τηλεφωνικών συνδέσεων [12].

Η υποκειμενική αξιολόγηση βασίζεται στο μέσο όρο των βαθμολογιών γνώμης (Mean Opinion Score-MOS), δηλαδή των τιμών σε μια προκαθορισμένη κλίμακα στην οποία οι συμμετέχοντες εκφράζουν τη γνώμη τους για την επίδοση του τηλεφωνικού συστήματος, είτε για συνομιλία είτε για ακρόαση προφορικού υλικού.

Η MOS έχει σκοπό να εφαρμόζεται γενικά, ανεξαρτήτως της μορφής που παρουσιάζουν οι παράγοντες υποβάθμισης όπως:

- απώλειες
- θόρυβος κυκλώματος
- σφάλματα μετάδοσης (π.χ. τυχαία σφάλματα bit)
- θόρυβος περιβάλλοντος
- πλάγιος τόνος (sidetone)
- ηχώ ομιλητή
- μη γραμμική παραμόρφωση (κωδικοποίηση χαμηλού ρυθμού δεδομένων)
- χρόνος διάδοσης
- επιβλαβείς επιπτώσεις των συσκευών φωνής
- παραμορφώσεις που οφείλονται στη μεταγωγή πακέτου
- χρονομεταβλητές υποβαθμίσεις του διαύλου επικοινωνίας.

Η υποκειμενική αξιολόγηση διεξάγεται χρησιμοποιώντας ακουστικές ή συνομιλητικές μεθόδους. Στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως οι ακουστικές μέθοδοι στις οποίες και θα αναφερθούμε.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για ακουστικές δοκιμές είναι η Απόλυτη Διαβάθμιση Κατηγορίας (Absolute Category Rating-ACR), που ιεραρχεί την ποιότητα ομιλίας στην κλίμακα 1-5 και απεικονίζεται στον Πίνακα 5. Η ACR είναι μια καλώς ορισμένη μέθοδος που έχει εφαρμοστεί σε αναλογικές και ψηφιακές τηλεφωνικές συνδέσεις και σε τηλεπικοινωνιακές συσκευές, όπως οι codecs.

Άλλες γνωστές μέθοδοι είναι ο Βαθμός Κατηγορίας Υποβάθμισης (Degradation Category Rating-DCR), η Διαβάθμιση Κατηγορίας Σύγκρισης (Comparison Category Rating-CCR) και η Μέθοδος Κατωφλίου (Threshold Method).

Οι ακουστικές μέθοδοι έχουν άμεσες εφαρμογές στην αποτίμηση των φυσικών συστημάτων μετάδοσης τα οποία είναι ουσιαστικά μιας κατεύθυνσης, π.χ. κυκλώματα ευρεεκτομπής. Επίσης, μπορούν να εφαρμοστούν, με ορισμένες επιφυλάξεις, στην πρόβλεψη για αξιολόγηση συνομιλίας που πραγματοποιείται σε σύστημα δύο κατευθύνσεων, όπως μια σύνδεση σε δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο.

Πίνακας 5. Κλίμακα υποκειμενικής αξιολόγησης ACR

Βαθμολογία	Ποιότητα ομιλίας (ACR)
5	Εξαιρετική
4	Καλή
3	Μέτρια
2	Ασθενής
1	Κακή

Τα αποτελέσματα της υποκειμενικής αξιολόγησης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των δοκιμών, καθώς επηρεάζονται από παράγοντες όπως οι παρακάτω [13].

- **Πολιτιστικές διαφορές:** σε διαφορετικές γλώσσες και πολιτισμούς, οι έννοιες «εξαιρετικό», «κακό» κλπ διαφέρουν. Αυτό μπορεί να έχει ως συνέπεια έως και 1.0 βαθμό MOS διαφορά κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν υπό ίδιες συνθήκες και από διαφορετικά εργαστήρια.
- **Ατομικές διαφορές:** η προσωπική εμπειρία επηρεάζει επίσης τον τρόπο βαθμολόγησης. Καθώς κατά τις υποκειμενικές δοκιμές χρησιμοποιείται ένας σχετικά μικρός αριθμός ατόμων (συνήθως 24-32), οι συστηματικές ατομικές διαφορές μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη διακύμανση της MOS.
- **Συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος:** η απόλυτη μέθοδος βαθμολόγησης σημαίνει ότι οι συμμετέχοντες προσαρμόζονται έως κάποιο βαθμό στις συνθήκες μιας δοκιμής. Ένα μεγάλο μέρος των συνθηκών, που είναι από «ασθενείς» έως «κακές», σημαίνει ότι οι καλύτερες συνθήκες είναι πιθανό να αποτιμηθούν ως «εξαιρετικές», καθώς είναι σαφώς διακριτές. Αντιστρόφως, εάν υπάρχουν λιγότερες «κακές» συνθήκες, τότε είναι πιθανό οι συμμετέχοντες να αξιολογήσουν τις καλύτερες συνθήκες ως «καλές», δεδομένου ότι διακρίνονται δυσκολότερα. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγήσει διακυμάνσεις μέχρι 1.0 βαθμό MOS μεταξύ των δοκιμών που διενεργούνται στο ίδιο εργαστήριο.

5.5 Αντικειμενικές μέθοδοι αξιολόγησης της ποιότητας ομιλίας

Η MOS είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της ποιότητας ομιλίας, αλλά η έλλειψη επαναληπτικότητας καθώς και οι υψηλές απαιτήσεις της σε κόστος και χρόνο την καθιστούν μη πρακτική. Σε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα των υποκειμενικών δοκιμών, διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί με στόχο την καθιέρωση μιας αντικειμενικής μέτρησης της ποιότητας φωνής. Αυτές οι μέθοδοι είναι απλές και οικονομικά προσιτές, αλλά ταυτόχρονα ευαίσθητες στις υποβαθμίσεις του εξοπλισμού καθώς και στις επιπτώσεις επεξεργασίας, όπως το μη γραμμικό φιλτράρισμα και η ακύρωση ηχούς. Οι αντικειμενικές δοκιμές μπορεί να είναι παρεισφρητικές (intrusive) ή

μη παρεισφρητικές (non-intrusive). Οι παρεισφρητικές τεχνικές συγκρίνουν το πρωτότυπο σήμα ομιλίας (σήμα αναφοράς) με ένα υποβαθμισμένο σήμα, το οποίο είναι το αποτέλεσμα του πρώτου, καθώς περνά μέσα από το υπό εξέταση δίκτυο. Ορισμένα από τα παρεισφρητικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί είναι [14]:

- **PSQM (ITU P.861) / PSQM+** : Αντιληπτική μέτρηση της ποιότητας ομιλίας
- **PESQ (ITU P.862)** : Αντιληπτική αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας
- **PAMS (British Telecom)** : Σύστημα μέτρησης αντιληπτικής ανάλυσης

Οι PSQM, PSQM+ και PESQ είναι μέρος μιας σειράς διαδοχικών αλγοριθμικών τροποποιήσεων που ξεκίνησαν από το πρότυπο ITU P.861. Η British Telecom ανέπτυξε την PAMS, η οποία είναι παρόμοια με PSQM. Οι μετρήσεις μέσω PSQM, PESQ και PAMS στέλνουν ένα σήμα αναφοράς μέσω του τηλεφωνικού δικτύου και στη συνέχεια συγκρίνουν το σήμα αναφοράς με το σήμα που έχει ληφθεί στο άλλο άκρο του δικτύου, με τη βοήθεια αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.

Παρόλο που η απαίτηση των παρεισφρητικών μεθόδων για ύπαρξη σήματος αναφοράς δεν παρουσιάζει πρόβλημα σε μια εργαστηριακή δοκιμή, στον πραγματικό κόσμο είναι μη πρακτική [19]. Υπάρχει προφανής ανάγκη να καθορίζεται η ποιότητα ενός δικτύου VoIP καθώς και των κλήσεων σε συνεχή βάση. Επομένως, έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός μη-παρεισφρητικών τεχνικών που προσπαθούν να εκτιμήσουν την ποιότητα των κλήσεων με βάση τις μετρήσεις του δικτύου και/ή το σήμα ομιλίας που δημιουργείται στην πλευρά του δέκτη. Ορισμένα από τα μη παρεισφρητικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί είναι:

- **ITU P.563**: πρότυπο βασισμένο σε σήματα
- **ITU G.107 (Μοντέλο E)**: πρότυπο βασισμένο σε παραμέτρους
- **ITU P.CQO**: υπό μελέτη πρότυπο

Το πρότυπο της ITU P.563 αποτελείται από μια εκτεταμένη ανάλυση κυματομορφής ενός επεξεργασμένου ήχου που εφαρμόζεται στο τελικό άκρο. Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι οι αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις και η ανακρίβεια που συχνά παρουσιάζουν τα αποτελέσματά της. Το πρότυπο P.CQO θα είναι ένα νέο μοντέλο που θα βασίζεται στο P.563 και στο Μοντέλο E και επί του παρόντος δεν έχει ολοκληρωθεί. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το απλούστερο στην εφαρμογή Μοντέλο E με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας και θα αναπτυχθεί στην επόμενη ενότητα.

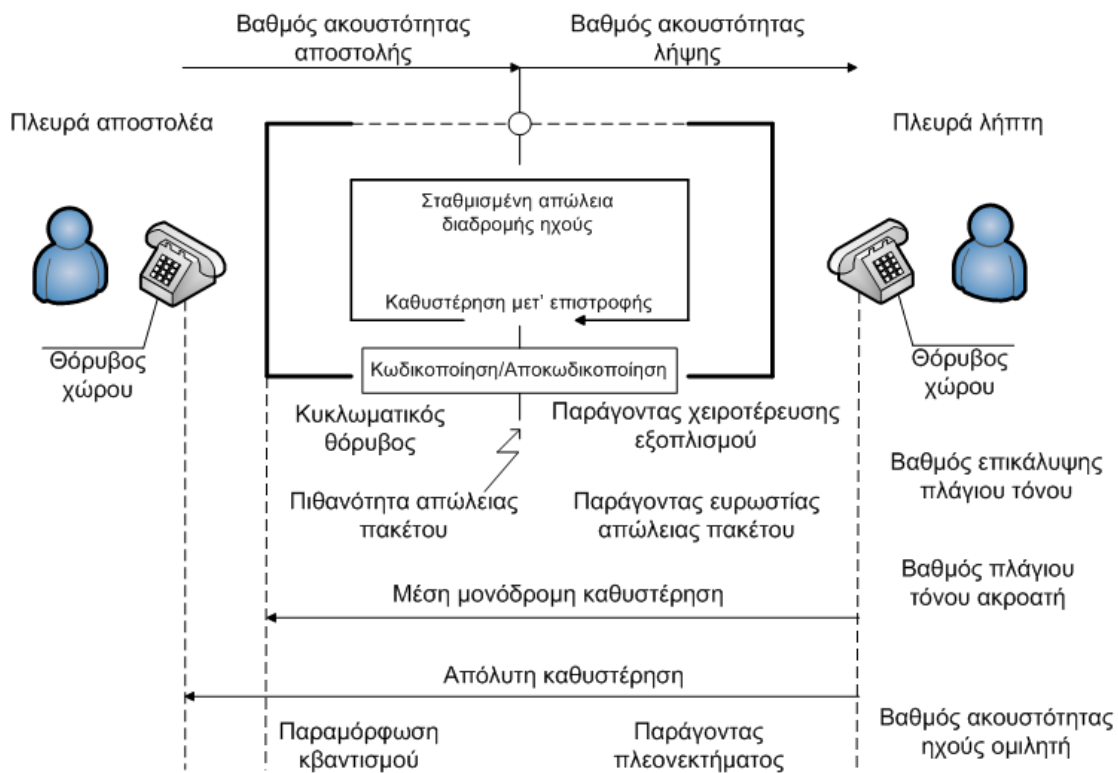
5.5.1 Μοντέλο E

Το μοντέλο E που ορίζεται στη Σύσταση G.107 της ITU-T [16] αναπτύχθηκε ως ένα εργαλείο σχεδιασμού για να βοηθήσει τους σχεδιαστές δικτύου να εκτιμήσουν την ποιότητα φωνής με βάση ορισμένους παράγοντες χειροτέρευσης που αποδίδονται σε κάθε τμήμα του εξοπλισμού σε μια αλυσίδα μετάδοσης. Βασίζεται στην υπόθεση ότι οι υποβαθμίσεις της μετάδοσης μπορούν να μετασχηματιστούν σε «ψυχολογικούς παράγοντες» και οι ψυχολογικοί παράγοντες στην ψυχολογική κλίμακα είναι προσθετικοί. Η προκύπτουσα τιμή, που είναι ο παράγοντας R, μπορεί να συσχετιστεί με μία τιμή MOS και να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της μετάδοσης.

Το πρότυπο G.107 έχει εξελιχθεί πέρα από τον αρχικό σχεδιαστικό σκοπό του και τείνει να γίνει ένα εργαλείο για τη διαχείριση του δικτύου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πρότυπο G.107 μπορεί να συμπεριλάβει πολλές υποβαθμίσεις και να παρέχει μια συνολική βαθμολογία ποιότητας για κλήσεις σε πραγματικό χρόνο. Για το λόγο αυτό,

χρησιμοποιείται ευρέως στην υπηρεσία VoIP για την παρακολούθηση της ποιότητας φωνής στο δίκτυο.

Το μοντέλο κάνει εκτίμηση της ποιότητας συνομιλίας από στόμα προς αυτί, όπως την αντιλαμβάνεται ο χρήστης στην πλευρά λήψης τόσο ως ακροατής όσο και ως ομιλητής.



Εικόνα 9. Σύνδεση αναφοράς του μοντέλου E

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές παράμετροι που σχετίζονται με τον χρόνο μετάδοσης. Η απόλυτη καθυστέρηση αντιπροσωπεύει τη συνολική μονόδρομη καθυστέρηση μεταξύ της πλευράς αποστολής και της πλευράς λήψης και χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει την υποβάθμιση που οφείλεται σε υπερβολική καθυστέρηση. Η μέση μονόδρομη καθυστέρηση αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση μεταξύ της πλευράς λήψης (σε κατάσταση ομιλίας) και το σημείο στη σύνδεση όπου μια σύζευξη σήματος εμφανίζεται ως πηγή ηχούς. Η μετ' επιστροφής καθυστέρηση αντιπροσωπεύει την καθυστέρηση σε έναν τετρασύρματο βρόχο, όπου το διπλοανακλώμενο σήμα προκαλεί υποβάθμιση εξαιτίας της ηχούς του ακροατή.

Το αποτέλεσμα κάθε υπολογισμού με το μοντέλο E σε πρώτη φάση είναι ένας παράγοντας βαθμολογίας μετάδοσης R, ο οποίος συνδυάζει όλες τις παραμέτρους μετάδοσης που είναι σχετικές με την εξεταζόμενη σύνδεση. Αυτός ο παράγοντας R κυμαίνεται από 0 (χειρίστη ποιότητα) έως 100 (καλύτερη ποιότητα) και εκφράζεται ως:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{ef} + A$$

- Ο παράγοντας R_0 αντιπροσωπεύει το βασικό σηματοθορυβικό λόγο, συμπεριλαμβανομένων των πηγών θορύβου, όπως ο θόρυβος κυκλώματος και ο θόρυβος χώρου.
- Ο παράγοντας I_s είναι ένας συνδυασμός όλων των υποβαθμίσεων οι οποίες εμφανίζονται ταυτόχρονα με τη μετάδοση φωνής. Αυτές είναι: οι υπερβολικά χαμηλές τιμές του συνολικού βαθμού ακουστότητας, ο μη βέλτιστος πλάγιος τόνος και η παραμόρφωση κβαντισμού.

- Ο παράγοντας I_d αντιπροσωπεύει τις υποβαθμίσεις που προκαλούνται από την καθυστέρηση του σήματος φωνής και την ηχώ. Διαιρείται περαιτέρω σε τρεις παράγοντες: την υποβάθμιση εξαιτίας της ηχούς του ομιλητή, της ηχούς του ακροατή και της πολύ μεγάλης απόλυτης καθυστέρησης, η οποία εκδηλώνεται ακόμη και με τέλεια ακύρωση ηχούς. Με το d να υποδηλώνει τη συνολική καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, το I_d προσεγγίζεται ύστερα από πειράματα ως εξής [17]:

$$I_d = 0.024d + 0.11(d - 177.3)H(d - 177.3)$$

όπου

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{για } x < 0 \\ 1 & \text{για } x \geq 0 \end{cases}$$

- Ο παράγοντας χειροτέρευσης εξοπλισμού I_{ef} αντιπροσωπεύει τις υποβαθμίσεις που προκαλούνται από τους codecs χαμηλού ρυθμού μετάδοσης αλλά και από τις τυχαία κατανεμημένες απώλειες πακέτων. Πειράματα δείχνουν ότι το I_{ef} μπορεί να προσεγγιστεί ως [17]:

$$I_{ef} = \lambda_1 + \lambda_2 \ln(1 + \lambda_3 p)$$

όπου το λ_1 αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση της ποιότητας φωνής λόγω του codec, τα λ_2 και λ_3 εκφράζουν την υποβάθμιση λόγω της απώλειας πακέτων και το p υποδηλώνει το συνολικό ρυθμό απώλειας πακέτων. Οι τιμές για τις παραμέτρους λ έχουν προσδιοριστεί μέσω προσομοιώσεων σε διαφορετικές συνθήκες απωλειών και για διαφορετικούς codecs. Για την περίπτωση του codec G.729a και τυχαία απώλεια πακέτων, το I_{ef} δίνεται από:

$$I_{ef} = 11 + 40 \ln(1 + 10p)$$

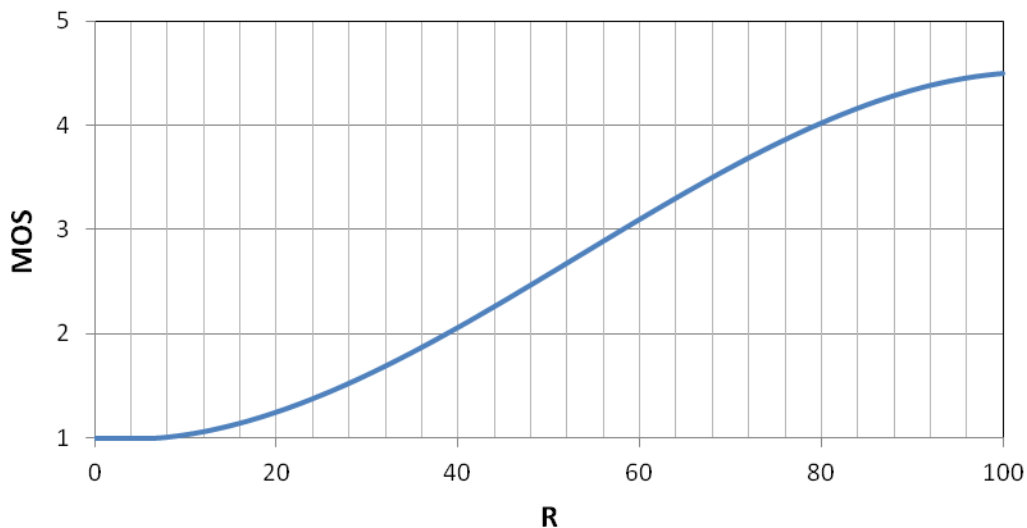
- Ο παράγοντας πλεονεκτήματος A επιτρέπει την αντιστάθμιση των παραγόντων χειροτέρευσης όταν ο χρήστης ωφελείται από άλλους τύπους πρόσβασης. Ο παράγοντας αυτός δε σχετίζεται με τον codec ή με την παραμόρφωση του σήματος, αλλά με τη σχετική βαρύτητα της λειτουργικότητας και της ποιότητας μετάδοσης στις προσδοκίες των χρηστών ανάλογα με τον τύπο του χρήστη και το χρόνο [15]. Ο παράγοντας πλεονεκτήματος A αντιπροσωπεύει το «πλεονέκτημα της πρόσβασης», επιτρέποντας στο σχεδιαστή να λάβει υπόψη το γεγονός ότι οι χρήστες μπορεί να δεχθούν κάποια μείωση στην ποιότητα ως αντιστάθμιση για το πλεονέκτημα πρόσβασης, π.χ., κινητικότητα ή σύνδεση σε περιοχές που είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Για VoIP συστήματα ο παράγοντας A τίθεται 0.

Μια εκτιμώμενη τιμή του MOS μπορεί να εξαχθεί από τον παράγοντα R με χρήση των εξισώσεων [16]:

$$MOS = \begin{cases} 1 & \text{για } R < 0, \\ 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)7 \cdot 10^{-6} & \text{για } 0 \leq R \leq 100, \\ 4.5 & \text{για } R > 100 \end{cases}$$

Αποδεικνύεται ότι αν ο παράγοντας R είναι μικρότερος από 6.5, τότε η τιμή MOS είναι κάτω από 1. Γι' αυτό η τιμή R συνήθως περιορίζεται στο εύρος [6.5, 100].

Η εξίσωση φαίνεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8. Η MOS συναρτήσει του παράγοντα R

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται οι κλάσεις της ικανοποίησης χρηστών και η συσχέτισή τους με τις τιμές R και MOS.

R	ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΤΩΝ	MOS
100	Ιδιαίτερα ικανοποιημένοι	4.5
90	Ικανοποιημένοι	4.3
80	Κάποιοι δυσαρεστημένοι	4.0
70	Πολλοί δυσαρεστημένοι	3.6
60	Σχεδόν όλοι δυσαρεστημένοι	3.1
50	Δεν συνίσταται	2.6
0		1.0

Σχήμα 9. Οι κλάσεις ικανοποίησης χρηστών και οι σχετικές κλίμακες των παραγόντων R και MOS

Το μοντέλο E διαφέρει από άλλες μεθόδους στο ότι βασίζεται σε παραμέτρους υποβάθμισης αντί για σήματα. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως εργαλείο σχεδιασμού δικτύου, αλλά έχει κερδίσει ευρύτερη αποδοχή και σήμερα αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά μοντέλα μέτρησης. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι προσθετικό, δεν περιορίζεται από το μέγεθος του δικτύου που ερευνάται. Είναι μια ευέλικτη μέθοδος που προσαρμόζεται εύκολα για διαφορετικές συνθήκες του δικτύου [18]

Το μοντέλο E επιτρέπει την αξιολόγηση πολλαπλών κλήσεων, χωρίς να επηρεάζει το δίκτυο, ενώ απαιτεί εξαιρετικά χαμηλό υπολογιστικό κόστος, γεγονός που το καθιστά πολύ ελκυστικό από άποψη υλοποίησης. Ωστόσο, λειτουργεί μόνο για ορισμένους codecs (π.χ. όχι AMR) και δεν παρέχει μέριμνα για άλλους τύπους υποβαθμίσεων (π.χ. φαλίδιση ομιλίας-speech clipping). Επίσης το μοντέλο E κάνει υποθέσεις σχετικά με τις επιπτώσεις των υπολογισμένων παραγόντων χειροτέρευσης. Στην πραγματικότητα μπορεί να είναι δύσκολο να γίνει πρόβλεψη για τις συνδυασμένες επιπτώσεις αυτών των υποβαθμίσεων εξαιτίας της προσθετικής ιδιότητας του μοντέλου. Η αξιοπιστία του μοντέλου έχει βρεθεί ότι είναι μικρότερη από τις παρεισφρητικές μεθόδους αλλά είναι

αρκετά υψηλή ώστε να είναι χρήσιμο. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η ανάγκη για υψηλή αξιοπιστία είναι μικρότερη σε ένα σενάριο πραγματικού δικτύου από ότι σε εργαστηριακές δοκιμές, επειδή ο σκοπός είναι συνήθως μόνο να προσδιοριστεί αν η ποιότητα κλήσης είναι αρκετά καλή ή όχι. Παρόλο που οι μη παρεισφρητικές μέθοδοι είναι λιγότερο αξιόπιστες από τις παρεισφρητικές, είναι πιο χρήσιμες για σενάρια πραγματικού χρόνου. Οι μη παρεισφρητικές είναι σημαντικές για την παρακολούθηση αλλαγών της ποιότητας σε πραγματικό χρόνο [19].

Η συσχέτιση του μοντέλου E με τις υποκειμενικές δοκιμές κυμαίνεται συνήθως από 0.6 έως 0.8.

Το μοντέλο E είναι υπό μελέτη και συνεχώς επεκτείνεται με νέους υπολογισμούς, καθώς και προσαρμόζεται σε πιο σύγχρονα δίκτυα όπως το VoIP.

Παρακάτω δίνονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του μοντέλου E.

Πίνακας 6. Παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων του μοντέλου E

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Παρακολούθηση πολλών κλήσεων χωρίς να επηρεάζει το δίκτυο	Κάποιες υποβαθμίσεις δε λαμβάνονται υπόψη
Πολύ χαμηλό κόστος υλοποίησης	Λειτουργεί μόνο για ορισμένους codecs
Παρέχει πολλές μετρήσεις υποβαθμίσεων για κλήσεις σε πραγματικό χρόνο	Δύσκολο να προβλεφθούν οι επιπτώσεις από συνδυασμούς υποβαθμίσεων
Αξιοποιήσιμο για χρήση VoIP	

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΟΜΙΛΙΑΣ VOIP ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ LTE

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται εκτίμηση της ποιότητας ομιλίας VoIP σε ένα δίκτυο LTE με τη χρήση του Μοντέλου E. Επικεντρώνουμε στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός δικτύου LTE στο οποίο εισάγονται femtocells ως προς την ποιότητα εμπειρίας VoIP κλήσεων. Από τα αποτελέσματα θα αξιολογηθεί κατά πόσο η εισαγωγή femtocells σε ένα LTE δίκτυο έχει θετικό αντίκτυπο και ποιες αδυναμίες του συστήματος μπορεί να αναδειχθούν.

Επιλέξαμε να εστιάσουμε στην τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης LTE, καθώς είναι προ των πυλών στην Ελλάδα ενώ έχει ήδη διατεθεί εμπορικά σε αρκετές χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Βραζιλία, η Αυστραλία, η Νορβηγία, η Σουηδία και η Ρωσία κ.ά. Στο άμεσο μέλλον, η κύρια εφαρμογή των κινητών επικοινωνιών θα εξακολουθήσει να είναι η υπηρεσία τηλεφωνίας [36], η οποία, δεδομένης της αρχιτεκτονικής μεταγωγής πακέτου στο LTE, αναμένεται να παρέχεται ως υπηρεσία VoIP. Επιπλέον, δίνουμε έμφαση στα femtocells, διότι πρόκειται για μια υλοποίηση δικτύου με πολλαπλά οφέλη, που θα ανταποκριθεί στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, καθώς και στο γεγονός ότι η πλειοψηφία της κίνησης διεξάγεται σε εσωτερικούς χώρους.

Στην περίπτωση επικοινωνίας μεταξύ δύο κινητών τερματικών, η σύνδεση διακρίνεται σε δύο μέρη: τη σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης και τη σύνδεση μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης. Η σύνδεση μεταξύ των σταθμών βάσης επιτυγχάνεται μέσω του διαδικτύου με ενσύρματα μέσα, και τα δεδομένα φωνής μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο VoIP. Δεδομένου ότι το διαδίκτυο έχει συνήθως μεγάλο εύρος ζώνης επικοινωνίας, παρέχει σχετικά σταθερή ποιότητα επικοινωνίας, έχοντας κατά συνέπεια μικρό αντίκτυπο στην ποιότητα φωνής. Ωστόσο, η επικοινωνία μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης είναι ασύρματη. Δεδομένου ότι τα ασύρματα κανάλια είναι ευαίσθητα σε σφάλματα που οφείλονται σε παρεμβολές καθώς και στην κίνηση του UE, η ποιότητα του ασύρματου καναλιού είναι αυτή που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα της κλήσης VoIP.

Σε αυτήν τη μελέτη, θα επικεντρωθούμε στην ασύρματη ζεύξη, δηλαδή στην επικοινωνία μεταξύ των κινητών τερματικών και των σταθμών βάσης. Δύο κρίσιμοι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα της VoIP κλήσης και εξαρτώνται από την ασύρματη ζεύξη είναι η καθυστέρηση (d) και η απώλεια πακέτων (p). Για το σκοπό της μελέτης, διεξάγεται προσομοίωση ενός δικτύου LTE σε Java ενώ τα αποτελέσματα αποτυπώνονται με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab.

Οι συσχετίσεις που μελετώνται είναι:

- Η MOS συναρτήσκει του πλήθους των χρηστών.
- Η MOS συναρτήσκει της ταχύτητας των χρηστών.
- Η MOS συναρτήσκει του φορτίου των χρηστών.
- Η MOS συναρτήσκει της πυκνότητας των femtocells.

Εξετάζονται δύο υλοποιήσεις:

- Υλοποίηση 1: Ένα δίκτυο όπου αναπτύσσονται μόνο macrocells.
- Υλοποίηση 2: Ένα δίκτυο όπου αναπτύσσονται macrocells και femtocells κλειστής πρόσβασης.

Παρακάτω δίνονται όλες οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

Πίνακας 7. Ρυθμίσεις παραμέτρων προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Τοποθέτηση eNBs	Εξαγωνική
eNBs	7
Ακτίνα eNBs	500 m
Ισχύς εκπομπής eNBs	43 dBm
Μέγεθος cluster	1
Μέγεθος κτιρίου	5x5 διαμερίσματα
Πλευρά διαμερίσματος	10 m
Τοποθέτηση HeNBs	Εσωτερικό διαμερισμάτων
HeNBs	1/4/6/8/ ανά κτίριο
Ισχύς εκπομπής HeNBs	20 dBm
Ανάπτυξη HeNBs	Ομοδιαυλική
Τοποθέτηση MUEs	Τυχαία (εντός του macrocell)
Τοποθέτηση HUEs	Τυχαία (εντός του femtocell διαμερίσματος)
Πλήθος UEs στο σύστημα	20, 40, 60, 80, 100
Φορτίο ανά χρήστη	1 VoIP / 1 VoIP + 1 best effort εφαρμογή
Κινητικότητα χρηστών	Σταθερή θέση/Τυχαία κατεύθυνση
Ταχύτητα χρηστών	0km/h, 3km/h, 30km/h, 120km/h
VoIP codec	G.729a
Τύπος αμφίδρομης επικοινωνίας	FDD
Εύρος ζώνης καναλιού ανά κυψέλη	10MHz
Αλγόριθμος προγραμματισμού	Αναλογική δίκαιη
Διάρκεια ροής	10 s

Υπενθυμίζουμε ότι σύμφωνα με το Μοντέλο E, η MOS δίνεται από τη σχέση:

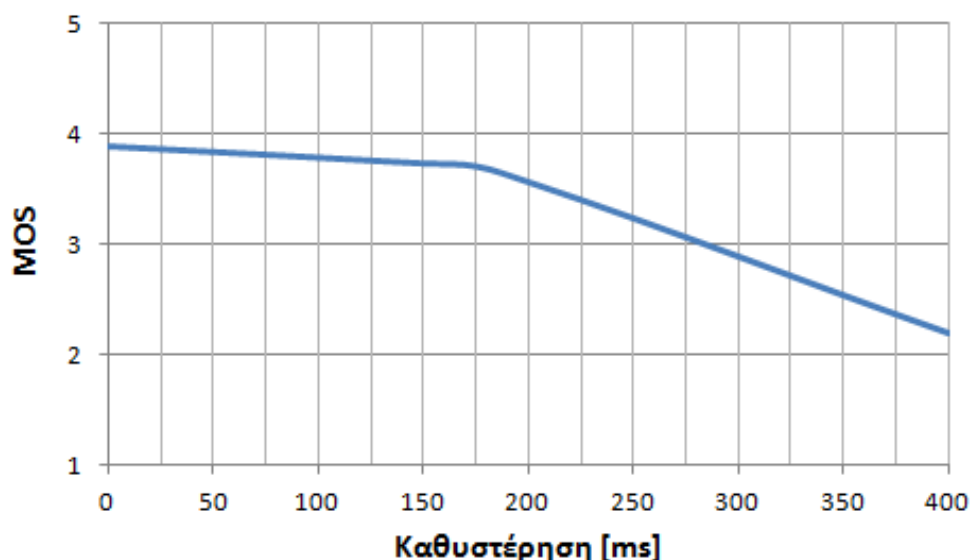
$$MOS = \begin{cases} 1 & \text{για } R < 0, \\ 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)7 \cdot 10^{-6} & \text{για } 0 \leq R \leq 100, \\ 4.5 & \text{για } R > 100 \end{cases}$$

όπου για την περίπτωση του codec G.729a και τυχαία απώλεια πακέτων ισχύει:

$$R = 93.2 - 0.024d - 0.11(d - 177.3)H(d - 177.3) - 11 - 40 \ln(1 + 10p) \text{ και}$$

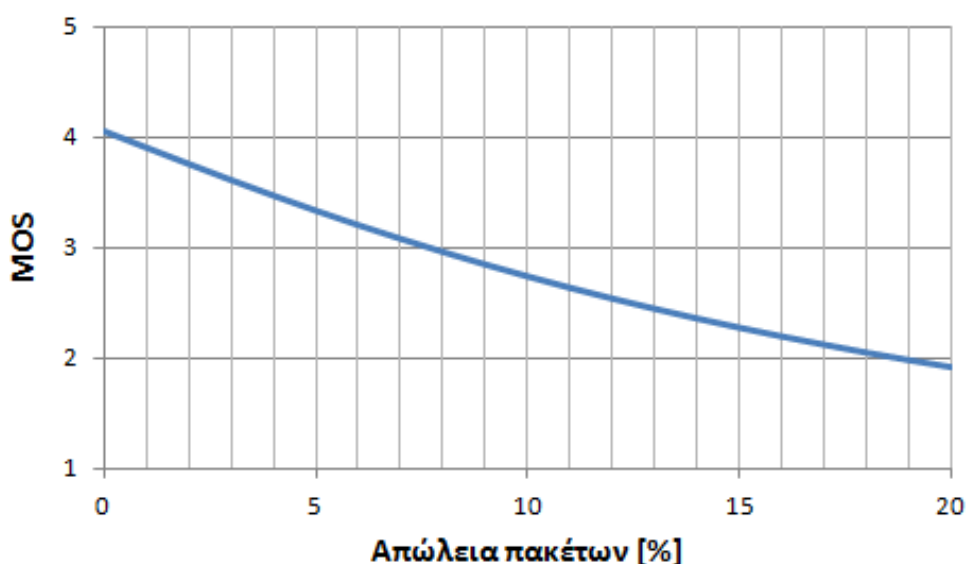
$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{για } x < 0 \\ 1 & \text{για } x \geq 0 \end{cases}$$

Θεωρώντας σταθερό το ρυθμό απώλειας πακέτων (συγκεκριμένα 1.5%), η επίδραση της καθυστέρησης στην εκτίμηση της MOS φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι έχει δύο σχεδόν γραμμικές περιοχές. Η καμπύλη εμφανίζει ένα σημείο καμπής στην καθυστέρηση των 177 ms. Σημειώνεται ότι το πρότυπο G.114 της ITU-T προτείνει μέγιστη μονόδρομη καθυστέρηση έως 150ms. Για καθυστερήσεις κάτω από 177 ms, οι συνομιλίες διεξάγονται φυσιολογικά, ενώ σε καθυστερήσεις άνω των 177 ms οι συνομιλίες αρχίζουν να καταρρέουν ή εκφυλίζονται σε μονόδρομη επικοινωνία [17].



Σχήμα 10. Η MOS συναρτήσει της καθυστέρησης

Αντιθέτως, η εξάρτηση της MOS από το ρυθμό απώλειας πακέτων είναι λογαριθμική, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Έχουμε θεωρήσει σταθερή καθυστέρηση ίση με 60 ms.



Σχήμα 11. Η MOS συναρτήσει του ρυθμού απώλειας πακέτων

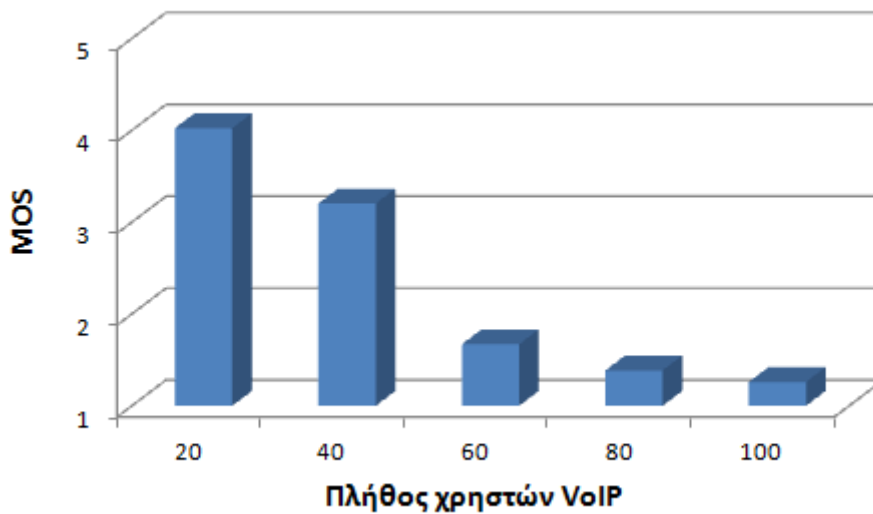
Στη βιβλιογραφία δεν έχει βρεθεί ανάλογη προσέγγιση για την αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας VoIP σε δίκτυα LTE με έμφαση στα femtocells. Μια σχετική ανάλυση πραγματοποιείται στο [36], όπου μελετάται ο αντίκτυπος της κίνησης βίντεο στην ποιότητα των κλήσεων VoIP σε LTE femtocells, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του Μοντέλου E, ωστόσο δίνεται έμφαση στην ενσύρματη ζεύξη. Οι συγγραφείς στο [37] εστιάζουν στην ασύρματη ζεύξη και χρησιμοποιούν το Μοντέλο E ώστε να προτείνουν ένα βελτιστοποιημένο αλγόριθμο μεταπομπών σε δίκτυα UMTS και WiMAX που βασίζεται στην εκτιμώμενη ποιότητα εμπειρίας VoIP.

6.1 Υλοποίηση δικτύου χωρίς τη συμμετοχή femtocells

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε ένα δίκτυο που αποτελείται αποκλειστικά από macrocells και μελετώνται τρία σενάρια:

- **Σενάριο 1**

Θεωρούμε ότι οι χρήστες είναι ακίνητοι και ότι κάθε MUE πραγματοποιεί μία VoIP κλήση. Εξετάζουμε την εξάρτηση της MOS από το πλήθος των χρηστών.

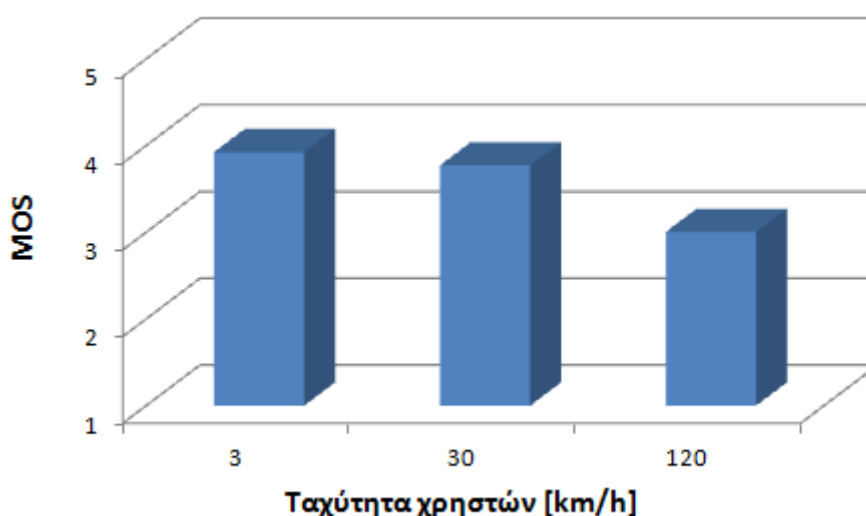


Σχήμα 12. Η MOS συναρτήσεϊ του πλήθους χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο περισσότερη επιβάρυνση επέρχεται στο δίκτυο από την προσθήκη επιπλέον χρηστών VoIP, τόσο υποβαθμίζεται η ποιότητα ομιλίας. Η υποβάθμιση μάλιστα είναι τόσο ραγδαία που από τους 60 χρήστες και άνω, η επικοινωνία προκαλεί την πλήρη δυσαρέσκεια των χρηστών. Σημειώνεται ότι οι κλήσεις πραγματοποιούνται ταυτόχρονα κατά την προσομοίωση, οπότε το σχήμα 12 δίνει και μια αίσθηση για το μέγιστο πλήθος ταυτόχρονων VoIP κλήσεων που μπορούν να υποστηριχθούν.

- **Σενάριο 2**

Σε αυτό το σενάριο θεωρούμε 30 χρήστες οι οποίοι κινούνται. Κάθε χρήστης πραγματοποιεί μία VoIP κλήση. Εξετάζουμε την επίδραση της ταχύτητας των χρηστών στη MOS.

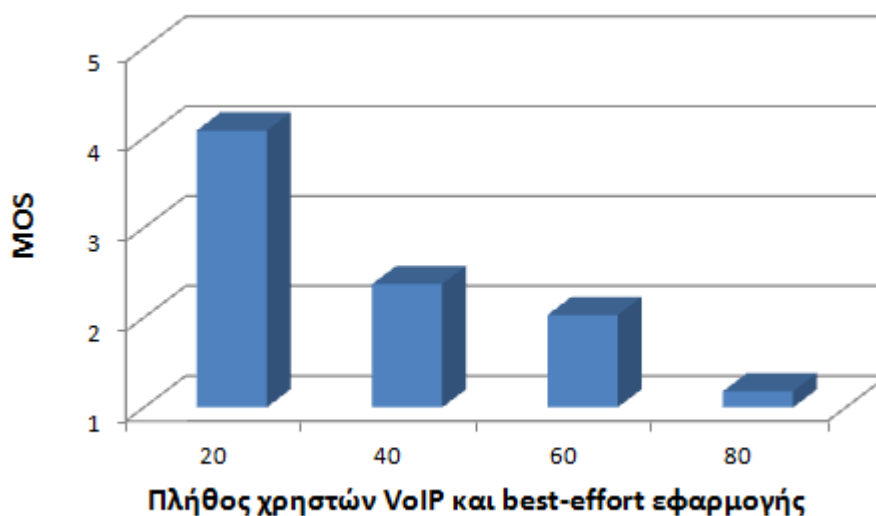


Σχήμα 13. Η MOS συναρτήσει της ταχύτητας χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells

Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα ομιλίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η κίνηση είναι τυχαία και έτσι ενώ κάποιοι χρήστες απομακρύνονται από το σταθμό βάσης υπομένοντας χειροτέρευση του σήματός τους, άλλοι πλησιάζουν απολαμβάνοντας μια βελτίωση σε αυτό. Η διαχείριση των μεταπομπών, ένα ερευνητικό κομμάτι που βρίσκεται έξω από το σκοπό της εργασίας, αναμένεται να δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα σε σχέση με το επίπεδο MOS κινούμενων χρηστών.

- **Σενάριο 3**

Εδώ επικεντρωνόμαστε στην επίδραση του φορτίου κίνησης στην ποιότητα εμπειρίας. Θεωρούμε ότι οι χρήστες βρίσκονται σε σταθερές θέσεις και πραγματοποιούν από μία κλήση VoIP σε συνδυασμό με μια εφαρμογή βέλτιστης προσπάθειας (best effort).



Σχήμα 14. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP και μιας best effort εφαρμογής στο σενάριο προσομοίωσης χωρίς τη συμμετοχή femtocells

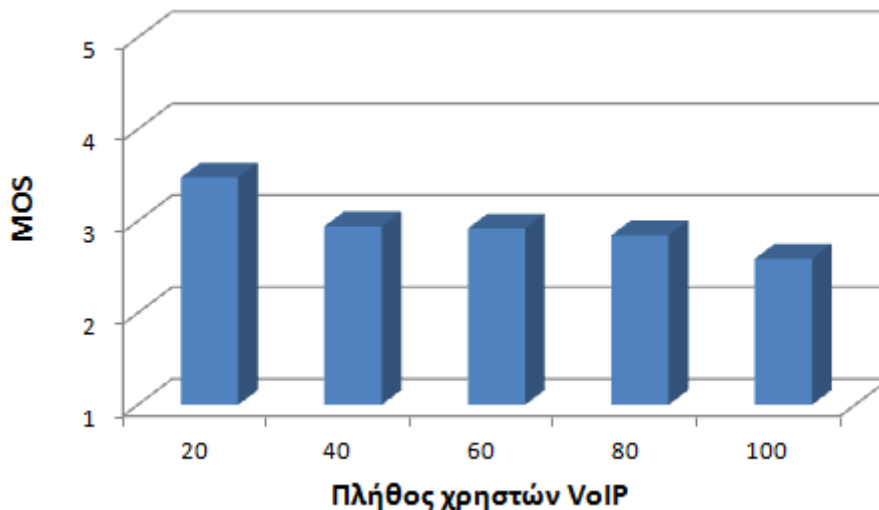
Δεδομένου ότι τα VoIP πακέτα έχουν προτεραιότητα, διαπιστώνουμε ότι το μοτίβο της έντονης υποβάθμισης είναι παρόμοιο με εκείνο του πρώτου σεναρίου όπου είχαμε μόνο κίνηση VoIP. Επομένως η αύξηση του φορτίου λόγω της επιπλέον best effort εφαρμογής δε δείχνει να επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα VoIP.

6.2 Υλοποίηση δικτύου με τη συμμετοχή femtocells

Στην ενότητα αυτή μελετάμε ένα δίκτυο όπου συνυπάρχουν macrocells και femtocells και εστιάζουμε σε τρία σενάρια ανάλογα με την πυκνότητα των femtocells. Έχουμε θεωρήσει femtocells κλειστής πρόσβασης λόγω της υψηλής διεύθυνσης που αναμένεται να έχουν σε οικιακές εγκαταστάσεις.

- **Σενάριο 1**

Εδώ οι χρήστες είναι στο σύνολό τους στατικοί και πραγματοποιούν από μία VoIP κλήση ο καθένας. Το 50% εξυπηρετούνται από HeNBs που βρίσκονται στο εσωτερικό 10 κτιρίων. Μας ενδιαφέρει η επίπτωση που έχει η αύξηση του συνολικού αριθμού χρηστών στην ποιότητα ομιλίας.

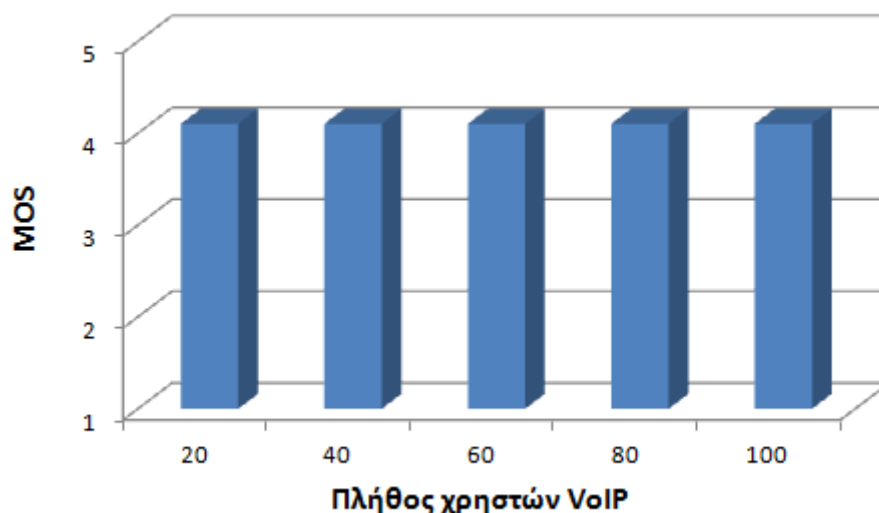


Σχήμα 15. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP (50% HUEs) στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells

Η αύξηση του πλήθους των χρηστών επιφέρει αναπόφευκτη υποβάθμιση της ποιότητας ομιλίας λόγω της επιβάρυνσης του δικτύου. Παρόλα αυτά, η μείωση έχει εξομαλυνθεί σημαντικά σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο της μη ύπαρξης femtocells. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη χρησιμότητα των femtocells στην αποσυμφόρηση των macrocells.

- **Σενάριο 2**

Το σενάριο αυτό είναι παρόμοιο με το προηγούμενο με τη διαφορά ότι το 100% των χρηστών εξυπηρετούνται από HeNBs που βρίσκονται στο εσωτερικό 10 κτιρίων, συνεπώς δεν υπάρχουν καθόλου MUEs.



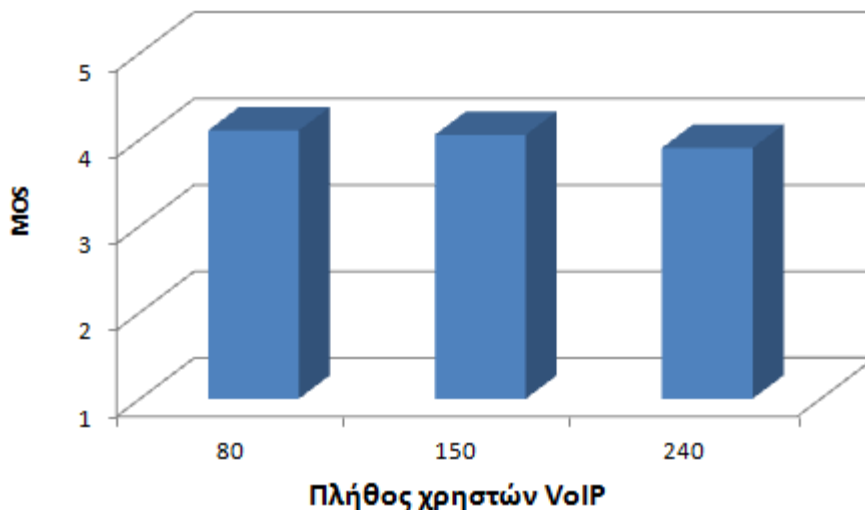
Σχήμα 16. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP (100% HUEs) στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells

Δεδομένου ότι κάθε HeNB εξυπηρετεί ένα χρήστη, είναι φανερό ότι δεν υπάρχει ανταγωνισμός πρόσβασης άρα η ποιότητα εμπειρίας είναι σταθερά βέλτιστη. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στο προηγούμενο σενάριο όπου συνυπήρχαν MUEs και HUEs, η υποβάθμιση στην ποιότητα καθώς αυξανόταν ο αριθμός των χρηστών οφειλόταν αποκλειστικά στην αύξηση των MUEs.

• **Σενάριο 3**

Εδώ κάθε HeNB εξυπηρετεί ένα χρήστη, ο οποίος είναι στατικός και πραγματοποιεί μία VoIP κλήση, ενώ δεν υπάρχουν MUEs. Στο σενάριο αυτό διακρίνουμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις πυκνότητας femtocells.

- Περίπτωση Α: Υπάρχουν 20 κτίρια με 4 HeNBs/κτίριο άρα 80 HUEs
- Περίπτωση Β: Υπάρχουν 25 κτίρια με 6 HeNBs/κτίριο άρα 150 HUEs
- Περίπτωση Γ: Υπάρχουν 30 κτίρια με 8 HeNBs/κτίριο άρα 240 HUEs



Σχήμα 17. Η MOS συναρτήσει του πλήθους χρηστών VoIP στο σενάριο προσομοίωσης με τη συμμετοχή femtocells για διαφορετικές πυκνότητες femtocells

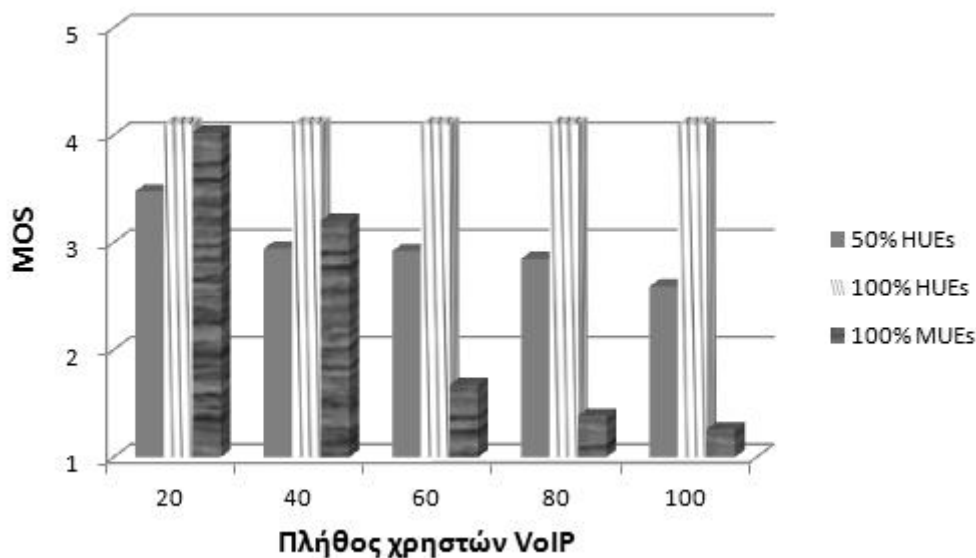
Εδώ παρατηρούμε μια πολύ μικρή μείωση της ποιότητας, η οποία δικαιολογείται αφού όσο πυκνώνουν τα femtocells, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών femtocells. Θα μπορούσαν να εφαρμοστούν κάποιες τεχνικές αυτο-βελτιστοποίησης των femtocells με σκοπό τον περιορισμό των ομο-επίπεδων παρεμβολών.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η ταχύτερη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στις κινητές επικοινωνίες έχει καταστήσει αναγκαία την αξιολόγηση της ποιότητας ομιλίας. Η αξιολόγηση μπορεί να αναδείξει σημαντικές αδυναμίες του συστήματος που οι πάροχοι υπηρεσιών θα κληθούν να αντιμετωπίσουν.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μία μελέτη της ποιότητας εμπειρίας VoIP σε ένα LTE δίκτυο με τη χρήση του Μοντέλου E, μιας αντικειμενικής μεθόδου αξιολόγησης που είναι αρκετά δημοφιλής.

Αυτό που προκύπτει από την ανάλυση είναι η επιβεβαίωση ότι η εισαγωγή femtocells στο δίκτυο εγγυάται βελτίωση της ποιότητας ομιλίας σε σύγκριση με ένα δίκτυο που δεν περιλαμβάνει femtocells. Αυτό αποτυπώνεται στο ακόλουθο συγκριτικό διάγραμμα που συνοψίζει τα σενάρια αποκλειστικής ύπαρξης MUEs, αποκλειστικής ύπαρξης HUEs και συνύπαρξης MUEs (50%) και HUEs (50%).



Σχήμα 18. Συγκριτική απεικόνιση της MOS για διάφορα ποσοστά διείσδυσης femtocells

Στην υλοποίηση δικτύου χωρίς τη συμμετοχή femtocells παρατηρήσαμε ότι η αύξηση της ταχύτητας των χρηστών καθώς και η επιβάρυνση της κίνησης με μια best effort εφαρμογή δεν επηρέασε ιδιαίτερα την αναμενόμενη ποιότητα VoIP. Αντιθέτως η ποιότητα υποβαθμίστηκε έντονα με την αύξηση του αριθμού των χρηστών. Όταν εισάγαμε τα femtocells στο δίκτυο η συνολική υποβάθμιση της ποιότητας μετριάστηκε σημαντικά. Η αποσυμφόρηση των macrocells όμως είχε ένα κόστος. Αποδείχθηκε ότι όσο πιο πυκνό γίνεται το δίκτυο ως προς την εγκατάσταση femtocells, τόσο αυξάνονται οι ομο-επίπεδες παρεμβολές, γεγονός που επιφέρει μείωση της ποιότητας ομιλίας.

Τέλος, μια μελλοντική επέκταση θα μπορούσε να είναι η ανάλυση της ποιότητας υπηρεσιών δεδομένων, όπως το video streaming, που έχει ιδιαίτερα αυξανόμενη ζήτηση στις τεχνολογίες 3G και άνω. Επιπλέον, η ανάπτυξη των HetNets επιτρέπει ένα ευρύ πεδίο μελετών. Θα μπορούσαν να διερευνηθούν οι επιπτώσεις στην εκτιμώμενη ποιότητα εμπειρίας από την εισαγωγή πολλών και διαφορετικών κόμβων (picocells, femtocells, αναμεταδότες).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος Όρος	Ελληνικός Όρος
Absolute Category Rating	Απόλυτη Διαβάθμιση Κατηγορίας
Absolute Delay	Απόλυτη Καθυστέρηση
Acceptability	Αποδεκτότητα
Acoustic Echo	Ακουστική Ηχώ
Advantage Factor	Παράγοντας Πλεονεκτήματος
Almost Blank Subframes	Σχεδόν Κενά Υποπλαίσια
Ambient Noise	Θόρυβος Περιβάλλοντος
Audio Level	Στάθμη Ήχου
Average Revenue per User	Μέσο Έσοδο Ανά Χρήστη
Backhaul	Οπισθόζευξη
Beam Subset Selection Strategy	Στρατηγική Επιλογής Υποσυνόλου Δέσμης
Bearer	Κομιστής
Best-Effort Service	Υπηρεσία Βέλτιστης Προσπάθειας
Buffering	Αποθήκευση
Bursty Traffic	Ριπαία Κίνηση
Capacity	Χωρητικότητα
Capital Expenditure	Κεφαλαιουχικά Έξοδα
Carrier Aggregation	Συνάθροιση Φερουσών
Channel State Information	Πληροφορίες Κατάστασης Διαύλου
Circuit Noise	Κυκλωματικός Θόρυβος
Circuit Switched Fall Back	Επαναφορά Μεταγωγής Κυκλώματος
Circuit Switched Network	Δίκτυο Μεταγωγής Κυκλώματος
Closed Access Mode	Λειτουργία Κλειστής Πρόσβασης
Closed Loop Power Setting	Λειτουργία Κλειστού Βρόχου Ισχύος
Closed Subscriber Group	Κλειστή Ομάδα Συνδρομητή
Cluster	Ομάδα
Clustering of Femtocells	Ομαδοποίηση των Femtocells
Co-channel Interference	Ομοδιαυλική Παρεμβολή
Codec	Κωδικοαποκωδικοποιητής
Cognitive Approach	Γνωσιακή Προσέγγιση
Coherent Transmission/Reception	Συνεκτική Εκπομπή/Λήψη
Collaborative Frequency Scheduling	Συνεργατικός Προγραμματισμός Συχνότητας
Comparison Category Rating	Διαβάθμιση Κατηγορίας Σύγκρισης
Complexity	Πολυπλοκότητα
Component Carrier	Συνιστώσα Φέρουσα
Conjugate Structure Algebraic Code	Αλγεβρική Κωδικοδιεγειρόμενη Γραμμική
Excited Linear Prediction	Πρόλεξη Συζυγούς Δόμησης
Consecutive Subframe Blanking	Συνεχόμενη Κάλυψη Υποπλαισίου
Coordinated Beamforming	Συντονισμένη Διαμόρφωση Δέσμης
Coordinated Multipoint Transmission/Reception	Συντονισμένη Εκπομπή/Λήψη Πολλαπλών Σημείων
Coordinated Scheduling	Συντονισμένος Προγραμματισμός
Core Network	Δίκτυο Πυρήνα
Co-tier Interference	Ομο-επίπεδη Παρεμβολή
Cross-tier Interference	Δια-επίπεδη Παρεμβολή
Dead Zone	Νεκρή Ζώνη
Degradation Category Rating	Βαθμός Κατηγορίας Υποβάθμισης
Delay Variation	Μεταβολή Καθυστέρησης

Dynamic Point Selection	Δυναμική Επιλογή Σημείου
Efficiency	Αποδοτικότητα
Equipment Impairment Factor	Παράγοντας Χειροτέρευσης Εξοπλισμού
Enhanced Universal Terrestrial Radio Access	Βελτιωμένη Παγκόσμια Επίγεια Ραδιοπρόσβαση
Femto-Aware Spectrum Arrangement Scheme	Femto-Ενήμερο Σχήμα Ρύθμισης του Φάσματος
Femtocell	Φεμτοκυψέλη
Fixed Mobile Convergence	Σύγκλιση Σταθερής και Κινητής Τηλεφωνίας
Fractional Frequency Reuse	Κλασματική Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
Frequency Partitioning	Διαμέριση Συχνοτήτων
Full Frequency Reuse	Πλήρης Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
Fully Persistent Scheduling	Πλήρως Εμμένων Προγραμματισμός
Generic Access Network	Δίκτυο Γενικής Πρόσβασης
Handover	Μεταπομπή
Hard Frequency Reuse	Ισχυρή Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
Heterogeneous Network	Ετερογενές Δίκτυο
High Interference Indicator	Δείκτης Υψηλής Παρεμβολής
Hybrid Access Mode	Υβριδική Λειτουργία Πρόσβασης
Interactive	Διαδραστικό
Intercell Interference Coordination	Συντονισμός Διακυψελικών Παρεμβολών
Interconnect Network Network Interface	Διεπαφή Διασύνδεσης Δικτύου-Δικτύου
Interworking	Διαλειτουργικότητα
Intrusive Method	Παρεισφρητική Μέθοδος
Joint Transmission	Κοινή Εκπομπή
Latency	Καθυστέρηση
Link Adaptation	Προσαρμογή ζεύξης
Listener Sidetone Rating	Βαθμός Πλάγιου Τόνου Ακροατή
Macrocell	Μακροκυψέλη
Managed Service	Υπο Διαχείριση Υπηρεσία
Mean Opinion Score	Μέση Γνωμοβαθμολογία
Mobility	Κινητικότητα
Mouth-to-ear delay	Καθυστέρηση από στόμα προς αυτί
Network Accessibility	Προσβασιμότητα Δικτύου
Network Availability	Διαθεσιμότητα Δικτύου
Non-coherent Transmission/Reception	Μη συνεκτική Εκπομπή/Λήψη
Non-critical	Μη κρίσιμο
Non-intrusive Method	Μη παρεισφρητική Μέθοδος
OFDM Symbol Shift	Μετατόπιση Συμβόλου OFDM
One Voice	Ενιαία Φωνή
One-Way Delay	Μονόδρομη Καθυστέρηση
Open Access Mode	Λειτουργία Ανοικτής Πρόσβασης
Open Loop Power Setting	Λειτουργία Ανοιχτού Βρόχου Ισχύος
Operational Expenditure	Λειτουργικά Έξοδα
Outage	Διακοπή Υπηρεσίας
Overload Indicator	Δείκτης Υπερφόρτωσης
Packet Loss Ratio	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων
Packet Loss Robustness Factor	Παράγοντας Ευρωστίας Απώλειας Πακέτου
Packet Switched Network	Δίκτυο Μεταγωγής Πακέτου

Path Loss	Απώλειες Διαδρομής
Power Control	Έλεγχος Ισχύος
Quality of Experience	Ποιότητα Εμπειρίας
Quality of Service	Ποιότητας Υπηρεσίας
Quantization Distortion	Παραμόρφωση Κβαντισμού
Radio Link Control	Έλεγχος Ραδιοζεύξης
Radio Resource Management	Διαχείριση Ραδιοπόρων
Range Expansion	Επέκταση Εύρους
Receive Loudness Rating	Βαθμός Ακουστότητας Λήψης
Received Signal Strength	Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος
Relative Narrowband Transmit Power	Δείκτης Σχετικής Εκπεμπόμενης Ισχύος Στενής Ζώνης
Relay	Αναμεταδότης
Release	Έκδοση
Recommendation	Σύσταση
Remote Radioheads	Απομακρυσμένες Ραδιο-Κεφαλές
Resource Block	Μπλοκ Πόρων
Responsive	Ανταποκριτικό
Roaming	Περιοδεία
Roaming Network Network Interface	Διεπαφή Περιοδείας Δικτύου-Δικτύου
Room Noise	Θόρυβος Χώρου
Round-Trip Delay	Καθυστερήση μετ' επιστροφής
Scheduling	Προγραμματισμός
Sector	Τομέας
Self-Configuration	Αυτο-Ρύθμιση
Self-Healing	Αυτο-Ίαση
Self-Optimization	Αυτο-Βελτιστοποίηση
Self-Organization	Αυτο-Οργάνωση
Semi-Persistent Scheduling	Ημι-Εμμένων Προγραμματισμός
Send Loudness Rating	Βαθμός Ακουστότητας Αποστολής
Sensing	Ανίχνευση
Service Accessibility	Προσβασιμότητα Δικτύου
Service Integrity	Ακεραιότητα Υπηρεσίας
Service Retainability	Διατηρησιμότητα Υπηρεσίας
Shared-Channel Symbol Muting	Σίγαση Συμβόλου Διαμοιραζόμενου Καναλιού
Sidetone	Πλάγιος Τόνος
Sidetone Masking Rating	Βαθμός Επικάλυψης Πλάγιου Τόνου
Simultaneous Voice LTE	Ταυτόχρονη Φωνή LTE
Single Radio Voice Call Continuity	Ενιαία Συνέχιση Κλήσεων
Soft Frequency Reuse	Ήπια Επαναχρησιμοποίηση Συχνοτήτων
Subframe Alignment	Ευθυγράμμιση Υποπλασίου
Talker Echo Loudness Rating	Βαθμός Ακουστότητας Ηχούς Ομιλητή
Threshold Method	Μέθοδος Κατωφλίου
Timely	Έγκαιρο
Transmission Time Interval	Χρονικό Διάστημα Μετάδοσης
User Equipment	Κινητό Τερματικό
User Network Interface	Διεπαφή Χρήστη-Δικτύου
Voice over LTE	Φωνή Μέσω LTE
Voice over LTE Via Generic Access	Φωνή Μέσω LTE Μέσω Γενικής Πρόσβασης

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ABSF	Almost Blank Subframe
ACR	Absolute Category Rating
AMR	Adaptive Multi-Rate
ARPU	Average Revenue Per User
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CAPEX	Capital Expenditure
CC	Component Carrier
CCR	Comparison Category Rating
C/I	Carrier to Interference Ratio
CLPS	Closed Loop Power Setting
CoMP	Coordinated Multi Point
CP	Cyclic Prefix
CS-ACELP	Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction
CSFB	Circuit Switched Fall Back
CSG	Closed Subscriber Group
CSI	Channel State Information
DCR	Degradation Category Rating
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution
eICIC	enhanced Inter-cell Interference Coordination
eNB	enhanced Node B
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FAP	Femtocells Access Point
FDD	Frequency Division Duplex
FER	Frame Erasure Rate
FFR	Fractional Frequency Reuse
FM	Frequency Modulation
FMC	Fixed Mobile Convergence
FSC	Femtocell System Controller

GAN	Generic Access Network
GPRS	General Packet Radio System
GSM	Global System for Mobile Communications
HeNB	Home enhanced Node B
HetNet	Heterogeneous Network
HII	High Interference Indicator
HSPA	High speed Packet Access
HUE	HeNB User Equipment
ICIC	Inter-cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications - Advanced
I-NNI	Interconnect Network Network Interface
IP	Internet Protocol
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MeNB	Macrocell enhanced Node B
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MOS	Mean Opinion Score
MSC	Mobile Switching Center
MUE	Macrocell User Equipment
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OI	Overload Indicator
OLPS	Open Loop Power Setting
OPEX	Operational Expenditure
PAMS	Perceptual Analysis/Measurement System
PCC	Policy and Charging Control
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDU	Protocol Data Unit

PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality
PLR	Packet Loss Ratio
PRB	Physical Resource Block
PSQM	Perceptual Speech Quality Measure
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RLC	Radio Link Control
R-NNI	Roaming Network Network Interface
RNTP	Relative Narrowband Transmit Power
RRH	Remote Radio Head
RRM	Radio Resource Management
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indication
SGW	Serving Gateway
SID	Silence Insertion Descriptor
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SMS	Short Message Service
SR-VCC	Single Radio Voice Call Continuity
SV-LTE	Simultaneous Voice LTE
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNI	User Network Interface
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
VANC	VoLGA Access Network Controller
VoIP	Voice over IP
VoLGA	Voice over LTE via Generic Access
VoLTE	Voice over LTE
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Qualcomm Incorporated, “LTE-Advanced: Heterogeneous Networks”, January 2011; <http://www.qualcomm.com/media/documents/lte-heterogeneous-networks>.
- [2] D. Lopez-Perez, I. Guvenc, G. De La Roche, M. Kountouris, T. Q. S. Quek, J. Zhang, “Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges In Heterogeneous Networks”, *Wireless Communications, IEEE*, vol.18, no.3, pp.22-30, June 2011.
- [3] V. Pauli, J. D. Naranjo, E. Seidel, “Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination”, Nomor Research, December 2010; http://www.nomor.de/uploads/a4/81/a4815c4dc585be33c81f0ec7a15deed7/2010-12-WhitePaper_LTE_HetNet_ICIC.pdf.
- [4] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, D. Malladi, “A survey on 3GPP Heterogeneous Networks”, *Wireless Communications, IEEE*, vol.18, no.3, pp.10-21, June 2011.
- [5] N. Saquib, E. Hossain, L. Bao Le, D. In Kim, “Interference Management in OFDMA Femtocell Networks: Issues and Approaches”, *Wireless Communications, IEEE*, vol.19, no.3, pp.86-95, June 2012.
- [6] P. Bhat, S. Nagata, L. Campoy, I. Berberana, T. Derham, G. Liu, X. Shen, P. Zong, J. Yang, “LTE-Advanced An Operator Perspective”, *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.2, pp.104-114, February 2012.
- [7] ITU-T Rec. X.902, “Information Technology-Open Distributed Processing-Reference Model: Foundations”, International Telecommunication Union, Geneva, 2009.
- [8] ETSI TS 102 250-1, “Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 1: Identification of Quality of Service criteria”, V1.2.1, Technical Specification, 2007.
- [9] ITU-T Rec. P.10/G.100, “Amendment 2: New Definitions for Inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100”, International Telecommunication Union, Geneva, 2008.
- [10] ITU-T Rec. G.1080, “Quality of Experience Requirements for IPTV Services”, International Telecommunication Union, Geneva, 2008.
- [11] Ditech Networks, “Testing Wireless Voice Quality: Capturing the Customer Experience”, December 2006.
- [12] ITU-T Rec. P.800, “Methods for Subjective Determination of Transmission Quality”, International Telecommunication Union, Geneva, 1996.
- [13] A. W. Rix, “Comparison between subjective listening quality and P.862 PESQ score,” Psytechnics Limited, September 2003; http://82.165.4.28/com/docs/downloads/pesq/pdf/wp_sub_v_pesq.pdf.
- [14] J. Q. Walker, “Assessing VoIP Call Quality Using the E-model”, NetIQ Corporation, 2002.
- [15] ITU-T Rec. G.113, “Transmission Impairments Due to Speech Processing”, International Telecommunication Union, Geneva, 2007.
- [16] ITU-T Rec. G.107, “The E-Model: A Computational Model for Use in Transmission Planning”, International Telecommunication Union, Geneva, 2011.
- [17] R.G. Cole, J.H. Rosenbluth, “Voice over IP Performance Monitoring”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol.31, no.2, pp. 9-24, April 2001.
- [18] H. Werner, “Quality of service in IP telephony-an end to end perspective”, in Department of Signaler och system, vol. Master Thesis Project: Chalmers University of Technology, September 2003.
- [19] Global IP Sound, Inc., “Measuring Voice Quality”, December 2006.
- [20] Wikipedia, The Free Encyclopedia, “G.729”; <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=G.729&oldid=503963298>. [Προσπελάστηκε 20/8/2012]
- [21] T. Nakamura, “Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE-Advanced)”, October 2009; http://www.3gpp.org/IMG/pdf/2009_10_3gpp_IMT.pdf.
- [22] Rysavy Research, “Mobile Broadband Explosion, the 3GPP Wireless Evolution”, August 2012; http://www.rysavy.com/Articles/2012_09_Mobile_Broadband_Explosion.pdf.
- [23] K. Yang, “Interference Management In LTE Wireless Networks [Industry Perspectives]”, *Wireless Communications, IEEE*, vol.19, no.3, pp.8-9, June 2012.
- [24] N. Shah, “Femtocells & Relays in Advanced Wireless Networks”, January 2010; <http://shahneil.com/2010/01/femtocells-and-relays-in-adv-wireless-networks/>. [Προσπελάστηκε 20/9/2012]
- [25] J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, M. C. Reed, “Femtocells: Past, Present, and Future”, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol.30, no.3, pp.497-508, April 2012
- [26] Informa Telecoms & Media, “Femtocell Market Status”, Femtoforum, February 2011; http://www.dolcera.com/wiki/images/Informa_Femtocell_Market_Status_Q1_2011.pdf.

- [27] J. Puttonen, T. Henttonen, N. Kolehmainen, K. Aschan, M. Moisio, P. Kela, "Voice-over-IP Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink", *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp.2502-2506, May 2008.
- [28] Radio-Electronics.com, "Voice over LTE – VoLTE"; <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/lte-long-term-evolution/voice-over-lte-volte.php>. [Προσπελάστηκε 22/9/2012]
- [29] I. Cotanis, "Aspects Related to Voice Service on NGN/LTE Networks", Ascom, January 2011; <http://www.ascom.com/nt/en/aspects-related-to-voice-service-on-ngn-lte.pdf>.
- [30] ITU-T Rec. G.1010, "End-user multimedia QoS categories", International Telecommunication Union, Geneva, 2001.
- [31] Μ. Θεολόγου, "Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών", Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [32] T. Hoßfeld, P. Tran-Gia, M. Fiedler, "Quantification of Quality of Experience for Edge-Based Applications", in: 20th International Teletraffic Congress (ITC20), Ottawa, Canada, June 2007.
- [33] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [34] N. Unuth, "VoIP Cons - VoIP Problems and Pitfalls", online <http://voip.about.com/od/voipbasics/a/voipproblems.htm>. [Προσπελάστηκε 25/9/2012]
- [35] M. K. H. Chowdhury, "Measuring Impact of QoS on QoE in Mobile Web Services", Master's thesis, School of Information and Communication Technology, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), 2011.
- [36] C. Olariu, M.O. Foghlu, P. Perry, L. Murphy, "VoIP quality monitoring in LTE femtocells", *Integrated Network Management (IM), 2011 IFIP/IEEE International Symposium*, pp.501-508, 23-27 May 2011.
- [37] S. Jadhav, H. Zhang; Z. Huang, "MOS-based Handover Protocol for Next Generation Wireless Networks", *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2012 IEEE 26th International Conference*, pp.479-486, 26-29 March 2012.