



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ  
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ»**

***ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ  
ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ  
ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ  
ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ LTE-ADVANCED***

Σταυρούλα Μποχρίνη  
ΑΜ 762

*Υπεύθυνος Καθηγητής:*

**Χρήστος Μπούρας,  
Καθηγητής**

**ΠΑΤΡΑ,  
Οκτώβριος 2013**

---



# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ»

## ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥΜΕΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ LTE-ADVANCED

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

**Χρήστος Μπούρας**, Καθηγητής

**Τριμελής Επιτροπή:**

**Ιωάννης Γαροφαλάκης**, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών  
Η/Υ & Πληροφορικής

**Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης**, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα  
Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

**Χρήστος Μπούρας**, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ &  
Πληροφορικής



## ΕΠΙΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ

Τη σημερινή εποχή γινόμαστε καθημερινά μάρτυρες μίας ταχέως αναπτυσσόμενης αγοράς, που δεν είναι άλλη από αυτή των κινητών πολυμεσικών εφαρμογών, όπως του Mobile TV και του Mobile Streaming. Υπηρεσίες όπως αυτές έχουν ή αναμένεται να έχουν υψηλή διείσδυση στη βιομηχανία της κινητής πολυμεσικής επικοινωνίας. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις αυτών των υπηρεσιών για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, ο οργανισμός 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) ανέπτυξε το Long Term Evolution Advanced (LTE-A), μία τεχνολογία η οποία αποτελεί την εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών 3<sup>ης</sup> γενιάς. Το LTE-A χρησιμοποιεί την τεχνολογία Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να προσφέρει νέες υψηλής χωρητικότητας ευρυζωνικές εφαρμογές και υπηρεσίες, ενώ παρέχει αποτελεσματική, από πλευράς κόστους, καθολική κάλυψη.

Επιπλέον, ο οργανισμός 3GPP εισήγαγε την τεχνολογία Multimedia Broadcast / Multicast Service (MBMS), ως μέσο πανεκπομπής και πολυεκπομπής πληροφοριών στους χρήστες κινητών, με το Mobile TV να είναι η κύρια υπηρεσία που παρέχεται. Η υποδομή του LTE-A προσφέρει στο MBMS την επιλογή να χρησιμοποιήσει ένα uplink κανάλι για την αλληλεπίδραση μεταξύ της υπηρεσίας και του χρήστη, η οποία στα συνήθη δίκτυα πανεκπομπής δεν είναι απλό θέμα.

Στο πλαίσιο των LTE-A συστημάτων, το MBMS έχει εξελιχθεί σε e-MBMS (το "e-" αντιστοιχεί στη λέξη evolved, δηλαδή εξελιγμένο). Αυτό θα επιτευχθεί μέσα από την αυξημένη απόδοση της ασύρματης διεπαφής που περιλαμβάνει μία νέα τεχνολογία μετάδοσης που ονομάζεται MBMS over Single Frequency Network (MBSFN). Κατά τη λειτουργία του MBSFN, τα MBMS δεδομένα μεταδίδονται ταυτόχρονα μέσω του αέρα από πολλαπλά κελιά τα οποία είναι αυστηρά χρονο-συγχρονισμένα. Το σύνολο των κελιών που λαμβάνουν αυτά τα δεδομένα, καλείται MBSFN περιοχή. Δεδομένου ότι οι MBSFN μεταδόσεις ενισχύουν σημαντικά το λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο, μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές βελτιώσεις στη φασματική απόδοση σε σύγκριση με την πολυεκπομπή μέσω των συστημάτων 3<sup>ης</sup> γενιάς. Αυτό είναι εξαιρετικά επωφελές στα όρια των κελιών, όπου οι μεταδόσεις (που στα συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς, όπως το Universal Mobile Telecommunications System - UMTS, θεωρούνται ως παρεμβολή) μεταφράζονται σε χρήσιμη ενέργεια σήματος και ως εκ τούτου η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι αυξημένη, ενώ την ίδια στιγμή η ισχύς παρεμβολής μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

Για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας MBSFN και να βελτιωθεί η φασματική απόδοση, θα πρέπει να επιλεγεί με προσοχή το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη μετάδοση των δεδομένων. Η σχέση μεταξύ της απόδοσης του MBSFN και της επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης έχει μελετηθεί διεξοδικά σε προηγούμενες ερευνητικές εργασίες. Ωστόσο οι περισσότερες (αν όχι όλες) από τις εργασίες αυτές επικεντρώνονται μόνο στην πλευρά των χρηστών και ως εκ τούτου δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρεις. Μερικές φορές ο στόχος του παρόχου μπορεί να είναι η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης σε όλους τους χρήστες της τοπολογίας ή η παροχή της

υπηρεσίας σε όλους τους χρήστες ανεξάρτητα από τις συνθήκες που βιώνουν. Επίσης, οι περισσότερες από αυτές τις εργασίες καθορίζουν το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις εξετάζοντας μόνο την περίπτωση της μετάδοσης από ένα πομπό σε ένα δέκτη και δεν εξετάζουν τα οφέλη που μπορούν να προσφέρουν οι τεχνικές Multiple Input Multiple Output (MIMO) στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να επεκτείνει τις προηγούμενες ερευνητικές εργασίες και, επιπλέον, να προτείνει μια λύση στο πρόβλημα της επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Προς την κατεύθυνση αυτή, αναλύουμε πρώτα μία διαδικασία τριών βημάτων η οποία επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και υπολογίζει τη φασματική απόδοση στην περίπτωση ενός μόνο χρήστη. Στη συνέχεια, ακολουθεί η γενίκευση της υπόθεσης ενός χρήστη και προτείνονται τρεις προσεγγίσεις που επιλέγουν το σχήμα κωδικοποίησης για την μετάδοση των MBSFN δεδομένων σε σενάρια πολλαπλών χρηστών. Οι προσεγγίσεις αξιολογούνται για τρεις διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης, έτσι ώστε να εξεταστεί η επίδραση των τεχνικών MIMO στην επιλογή σχήματος διαμόρφωσης για διαφορετικές κατανομές χρηστών. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης δείχνουν ότι, ανάλογα με το στόχο που έχει θέσει ο πάροχος (π.χ. μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης ή επίτευξη μίας συγκεκριμένης τιμής φασματικής απόδοσης) κάθε προσέγγιση θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση.

## EXECUTIVE SUMMARY

Today we are witnesses of a rapidly increasing market for mobile multimedia applications, such as Mobile TV and Mobile Streaming. Services like these have or are expected to have high penetration in the mobile multimedia communications industry. In order to confront such high requirements for services that demand higher data rates, the 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) developed the Long Term Evolution Advanced (LTE-A) technology which constitutes the evolution of the 3<sup>rd</sup> Generation (3G) mobile telecommunications technologies. LTE-A utilizes Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA). This radio technology is optimized to enhance networks by enabling new high capacity mobile broadband applications and services, while providing cost efficient ubiquitous mobile coverage.

In addition, 3GPP has introduced the Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) as a means to broadcast and multicast information to mobile users, with Mobile TV being the main service offered. LTE-A infrastructure offers to MBMS an option to use an uplink channel for interaction between the service and the user, which is not a straightforward issue in usual broadcast networks.

In the context of LTE-A systems, the MBMS will evolve into e-MBMS (“e-” stands for evolved). This will be achieved through the increased performance of the air interface that will include a new transmission scheme called MBMS over Single Frequency Network (MBSFN). In MBSFN operation, MBMS data are transmitted simultaneously over the air from multiple tightly time-synchronized cells. A group of those cells, which are targeted to receive these data, is called MBSFN area. Since the MBSFN transmission greatly enhances the Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR), the MBSFN transmission mode leads to significant improvements in Spectral Efficiency (SE) in comparison to multicasting over 3G systems. This is extremely beneficial at the cell edge, where transmissions (which in 3G systems, like Universal Mobile Telecommunications System - UMTS, are considered as inter-cell interference) are translated into useful signal energy and hence the received signal strength is increased, while at the same time the interference power is largely reduced.

In order to fully exploit the benefits of MBSFN and to improve its performance in terms of SE, the Modulation and Coding Scheme (MCS) for the transmission of the data should be carefully selected. The relationship between MBSFN performance and MCS selection has been thoroughly studied in previous research works; however most (if not all) of these works focus only on the users’ side and therefore may not be sufficient. Sometimes the operator’s goal may be the maximization of the SE over all users of the topology or the provision of the service to all the users irrespectively of the conditions that they experience. In addition, most of these works determine the MCS scheme for MBSFN considering only the case of single antenna transmissions and they do not examine the benefits that Multiple Input Multiple Output (MIMO) transmissions may offer on the overall performance.

The goal of this thesis is to extend the previous research works and, furthermore, to tackle the problems addressed. To this direction, we first analyze a 3-

step procedure that selects the MCS and calculates the SE in the case of a single user. Then, we generalize the single-user case and we propose three approaches that select the MCS for the delivery of the MBSFN data in multiple-users scenarios. The approaches are evaluated for three different transmission modes, so as to examine the impact of multiple antennas techniques on the MCS selection, and for different users' distributions. The evaluation results indicate that depending on the target that the operator may set (i.e. SE maximization or achievement of a specific SE) each approach could lead to improved performance.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πριν προχωρήσω στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας, θεωρώ χρέος μου αλλά και ευχαρίστησή μου να αναφέρω και να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν, με συμβούλευσαν και μου συμπαρασταθήκαν ώστε να φέρω σε πέρας την εργασία αυτή.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου κ. Χρήστο Μπούρα (Καθηγητής του τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών), που ως επιβλέπων καθηγητής μου, μου παρείχε τις πολύτιμες συμβουλές του, την καθοδήγησή του και τη συμπαράστασή του ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τους Καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, κ. Ιωάννη Γαροφαλάκη και κ. Κωνσταντίνο Μπερμπερίδη, εξαιρετικούς καθηγητές με βαρύνουσα άποψη και κύρος, για την τιμή που μου έκαναν να αποτελέσουν μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Ακόμα θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στο Δρ. Βασίλη Κόκκινο, για τη πολύτιμη βοήθεια του. Είναι άριστος επιστήμονας με πλούσια πνευματικά προσόντα και σπουδαίο ήθος που με τις πολύτιμες και ουσιαστικές του συμβουλές με βοήθησε σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που χωρίς την ψυχική και υλική βοήθειά τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους, δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές σπουδές μου.

Πάτρα, Οκτώβριος 2013

Σταυρούλα Μποχρίνη



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΠΙΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΟΨΗ .....</b>	<b>5</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>7</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....</b>	<b>9</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>11</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>13</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>15</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ .....</b>	<b>17</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>19</b>
<b>2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Η εξέλιξη των κυψελωτών κινητών δικτύων .....</b>	<b>25</b>
2.1.1 Συστήματα πρώτης γενιάς.....	26
2.1.2 Συστήματα δεύτερης γενιάς .....	26
2.1.3 Συστήματα τρίτης γενιάς .....	28
2.1.4 Συστήματα τέταρτης γενιάς.....	30
<b>2.2 Σύνοψη .....</b>	<b>31</b>
<b>3 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ LTE-A .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Στάδια εξέλιξης .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Προδιαγραφές .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Αρχιτεκτονική .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Συσκευή χρήση.....	39
3.3.2 e-UTRAN.....	39
3.3.3 Κύριο δίκτυο .....	40
3.3.4 Άλλα συστατικά.....	41
<b>3.4 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων .....</b>	<b>41</b>
3.4.1 Επίπεδο χρήση .....	41
3.4.2 Επίπεδο ελέγχου .....	42
<b>3.5 Τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης .....</b>	<b>42</b>
<b>3.6 Μεταδόσεις MIMO .....</b>	<b>44</b>
3.6.1 Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO) .....	44
3.6.2 Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO).....	45
3.6.3 Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	45
<b>3.7 Η υπηρεσία MBSFN .....</b>	<b>46</b>
<b>4 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....</b>	<b>49</b>

<b>5</b>	<b>ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ .....</b>	<b>51</b>
5.1	Επιλογή σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και υπολογισμός SINR για ένα χρήστη .....	52
5.1.1	Βήμα 1: Υπολογισμός SINR .....	52
5.1.2	Βήμα 2: Επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης .....	52
5.1.3	Βήμα 3: Εκτίμηση ρυθμαπόδοσης .....	55
5.2	Προτεινόμενοι μηχανισμοί .....	56
5.2.1	1 <sup>η</sup> προσέγγιση - εξασφαλισμένη παροχή υπηρεσίας .....	56
5.2.2	2 <sup>η</sup> προσέγγιση - μεγιστοποίηση φασματικής απόδοσης .....	57
5.2.3	3 <sup>η</sup> προσέγγιση - προκαθορισμένη φασματική απόδοση .....	57
5.3	Μελέτη απόδοσης των προτεινόμενων μηχανισμών .....	59
5.3.1	Σενάριο 1: Σταθερός αριθμός χρηστών .....	60
5.3.2	Σενάριο 2: Μεταβλητός αριθμός χρηστών .....	63
5.3.3	Σενάριο 3: Κινητοί χρήστες .....	65
5.4	Σύνοψη .....	67
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....</b>	<b>71</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>73</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....</b>	<b>77</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ .....</b>	<b>81</b>
	Η συνάρτηση main (κύρια συνάρτηση) .....	81
	Η συνάρτηση υλοποίησης της 1 <sup>ης</sup> μεθόδου .....	89
	Η συνάρτηση υλοποίησης της 2 <sup>ης</sup> μεθόδου .....	91
	Η συνάρτηση υλοποίησης της 3 <sup>ης</sup> μεθόδου .....	93
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ .....</b>	<b>99</b>

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Συνολικός αριθμός συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και ποσοστό ανά 100 κατοίκους για τα έτη 2001-2013. ....	23
Εικόνα 2. Συνολικός αριθμός συνδρομητών ανά τεχνολογία για τα έτη 2001-2013. ....	24
Εικόνα 3. Χρονολογική εξέλιξη κινητών δικτύων έως το IMT-Advanced. .	25
Εικόνα 4. Μέγιστοι και πρακτικοί ρυθμοί μετάδοσης κινητών δικτύων επόμενης γενιάς. ....	31
Εικόνα 5. Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A. ..	34
Εικόνα 6. Στάδια εξέλιξης των εκδόσεων LTE και το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του LTE-A. ....	36
Εικόνα 7. Η αρχιτεκτονική του EPS.....	39
Εικόνα 8. Η στοίβα πρωτοκόλλων στο επίπεδο χρήστη.....	42
Εικόνα 9. Η στοίβα πρωτοκόλλων στο επίπεδο ελέγχου.....	42
Εικόνα 10. Ένα resource block στο OFDMA. ....	43
Εικόνα 11. Παράδειγμα συστήματος SISO.....	44
Εικόνα 12. Παράδειγμα συστήματος MISO. ....	45
Εικόνα 13. Παράδειγμα συστήματος MIMO. ....	45
Εικόνα 14. Εναλλακτικές μορφές αρχιτεκτονικής του e-MBMS.....	46
Εικόνα 15. Ορισμοί στο e-MBMS.....	47
Εικόνα 16. Καμπύλες SNR-BLER για τους τρεις τρόπους μετάδοσης.....	54
Εικόνα 17. Ρυθμαπόδοση (throughput) για όλα τα CQIs και για όλους τους τρόπους μετάδοσης. ....	55
Εικόνα 18. Ρυθμαπόδοση για όλα τα CQIs με βάση το χρήστη με το χαμηλότερο SINR και για τους 3 τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 1). ....	60
Εικόνα 19. Φασματική απόδοση για όλα τα CQIs για τους 3 τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 2). ....	61
Εικόνα 20. Φασματική απόδοση για τα διαθέσιμα CQIs για κάθε ένα από τους τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 3). ....	61
Εικόνα 21. Φασματική απόδοση και επιλεγμένα CQIs για τις 3 προσεγγίσεις και για όλους τους τρόπους μετάδοσης. ....	62
Εικόνα 22. Σενάριο 2: Φασματική απόδοση για όλους τους τρόπους μετάδοσης για τις 3 προσεγγίσεις. ....	64
Εικόνα 23. Σενάριο 2: Επιλεγμένα CQI για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.....	64
Εικόνα 24. Σενάριο 3: Φασματική απόδοση για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.....	66
Εικόνα 25. Σενάριο 3: Επιλεγμένα CQI για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.....	67



## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1. Κύριες προδιαγραφές IMT-Advanced.....</b>	<b>37</b>
<b>Πίνακας 2. Τα διαθέσιμα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. ....</b>	<b>53</b>
<b>Πίνακας 3. Παράμετροι εξομοίωσης. ....</b>	<b>59</b>
<b>Πίνακας 4. Σύγκριση των τριών προσεγγίσεων. ....</b>	<b>68</b>





## ΛΙΣΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

<b>Αλγόριθμος 1. 1<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.....</b>	<b>56</b>
<b>Αλγόριθμος 2. 2<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.....</b>	<b>57</b>
<b>Αλγόριθμος 3. 3<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.....</b>	<b>58</b>





## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συστήματα κινητής επικοινωνίας αποτελούν επανάσταση στον τρόπο που οι άνθρωποι επικοινωνούν, συνδυάζοντας επικοινωνία και κινητικότητα. Σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα έχει επιτευχθεί μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των κινητών επικοινωνιών. Η εξέλιξη των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης έχει φτάσει πια, την τέταρτη γενιά. Κοιτάζοντας το παρελθόν, οι τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης έχουν ακολουθήσει διαφορετικές πορείες εξέλιξης με έναν όμως ενιαίο στόχο: την υψηλή απόδοση, αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία. Στις μέρες μας, τα δύο κυρίαρχα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που μπόρεσαν να χαρακτηριστούν 4<sup>ης</sup> γενιάς είναι το Mobile WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) του WiMAX Forum και το Long Term Evolution Advanced (LTE-A) από τον οργανισμό 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP).

Παρά την εξέλιξη τους, ο ολοένα και αυξανόμενος αριθμός χρηστών αλλά και η υψηλή διείσδυση ακόμα πιο απαιτητικών κινητών πολυμεσικών υπηρεσιών, τονίζει την ανάγκη για επιπρόσθετα μέτρα εξοικονόμησης πόρων του δικτύου. Προς αυτή την κατεύθυνση, η τεχνολογία Multimedia Broadcast / Multicast Service (MBMS) που εισήχθη από τον οργανισμό 3GPP, αναμένεται να διαδραματίσει έναν αποφασιστικό ρόλο στην ομαλή εξέλιξη των κινητών δικτύων επόμενης γενιάς, θέτοντας τη βάση για την επιτυχή διαδικασία προτυποποίησής τους.

Το MBMS στοχεύει στην παροχή multicast (πολυεκπομπή) και broadcast (πανεκπομπή) υπηρεσιών, συνδυάζοντας ευελιξία και υψηλή αποδοτικότητα από την άποψη χρησιμοποίησης του φάσματος και εξασφαλίζοντας βελτιωμένη απόδοση συγκριτικά με τις συμβατικές μεταδόσεις. Τα παραπάνω θα επιτευχθούν μέσω της βελτιωμένης απόδοσης της ασύρματης διεπαφής, η οποία θα περιλάβει ένα νέο σχέδιο μετάδοσης, το αποκαλούμενο MBMS over Single Frequency Network (MBSFN), με το οποίο το MBMS θα είναι σε θέση να μεταδώσει το ίδιο σήμα σε συγχρονισμένα γειτονικά κελιά.

Στόχος της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι αρχικά η παρουσίαση της τεχνολογίας MBSFN στα δίκτυα LTE-A και αφετέρου ο σχεδιασμός και υλοποίηση μηχανισμών επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις που με τη σειρά τους θα βελτιστοποιήσουν την απόδοσή του.

Η διπλωματική δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

- Το Κεφάλαιο 2 κάνει μία σύντομη επισκόπηση της εξέλιξης των κινητών ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, από τα δίκτυα πρώτης γενιάς στα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μίας γενιάς ενώ επισημαίνονται και οι ανάγκες που οδήγησαν στις νέες γενιές κινητών δικτύων.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται διεξοδικά το σύστημα LTE-A. Παρουσιάζονται οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν κατά την σχεδίασή του, αναλύεται η αρχιτεκτονική και οι επίσημες προδιαγραφές του συστήματος, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες MBSFN και Multiple Input-Multiple Output (MIMO) στις οποίες επικεντρώθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής γύρω από το MBSFN και την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Επίσης, θα αναφερθούν λεπτομερειακά οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής και θα παρουσιαστούν τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούν τις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν στις εν λόγω εργασίες με την προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει την περιγραφή και το σχεδιασμό των μηχανισμών επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις. Αναλύει τις τρεις διαφορετικές προτεινόμενες προσεγγίσεις και παρέχει τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.
- Το Κεφάλαιο 6 συγκεντρώνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας και συνοψίζει τα κυριότερα ευρήματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των διαφορετικών προσεγγίσεων.
- Στο Κεφάλαιο 7 προτείνονται διάφορα ανοιχτά και νέα θέματα πάνω στο πεδίο αυτό, που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.
- Ακολουθεί η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ταξινομημένη κατά σειρά εμφάνισης μέσα στο κείμενο. Αναφέρουμε πως οι αναφορές στη βιβλιογραφία έχουν ενσωματωθεί στο κείμενο μέσα σε αγκύλες ([]).
- Στο Παράρτημα I παρουσιάζονται, για τη διευκόλυνση του αναγνώστη, τα ακρωνύμια-συντομογραφίες τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διπλωματική.
- Στο Παράρτημα II έχει προστεθεί ο κώδικας των συναρτήσεων που υλοποιούν τους μηχανισμούς επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον MATLAB. Παράλληλα, δίνονται και σύντομες οδηγίες για τον τρόπο που μπορούν να εκτελεστούν οι συναρτήσεις αυτές στο περιβάλλον MATLAB.

- Τέλος, στο Παράρτημα ΙΙΙ παρουσιάζονται οι εργασίες που δημοσιεύτηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

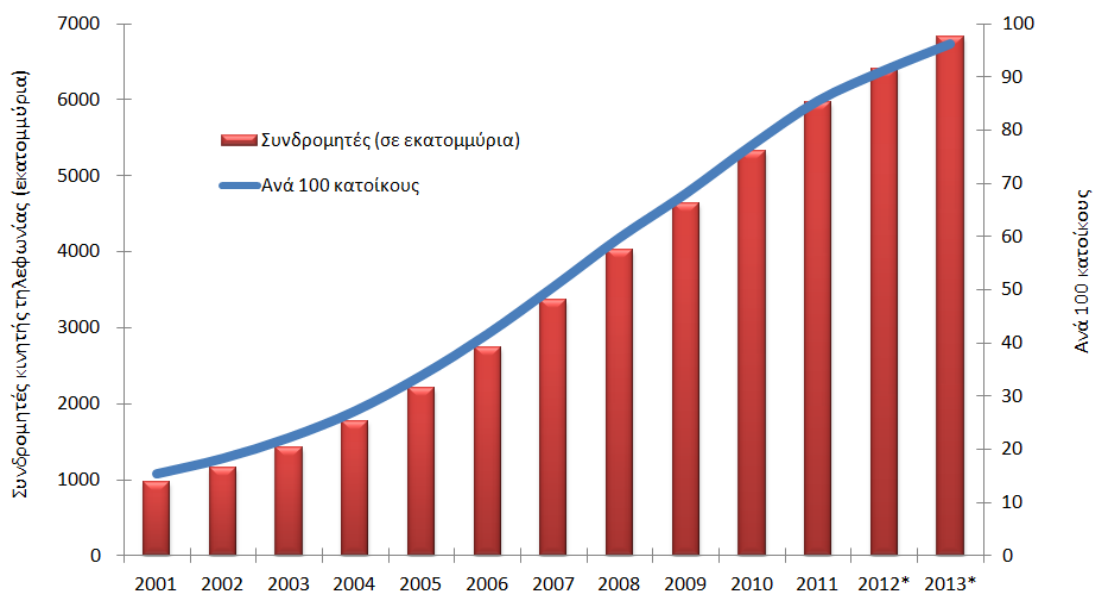


# Κεφάλαιο

# 2

## 2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

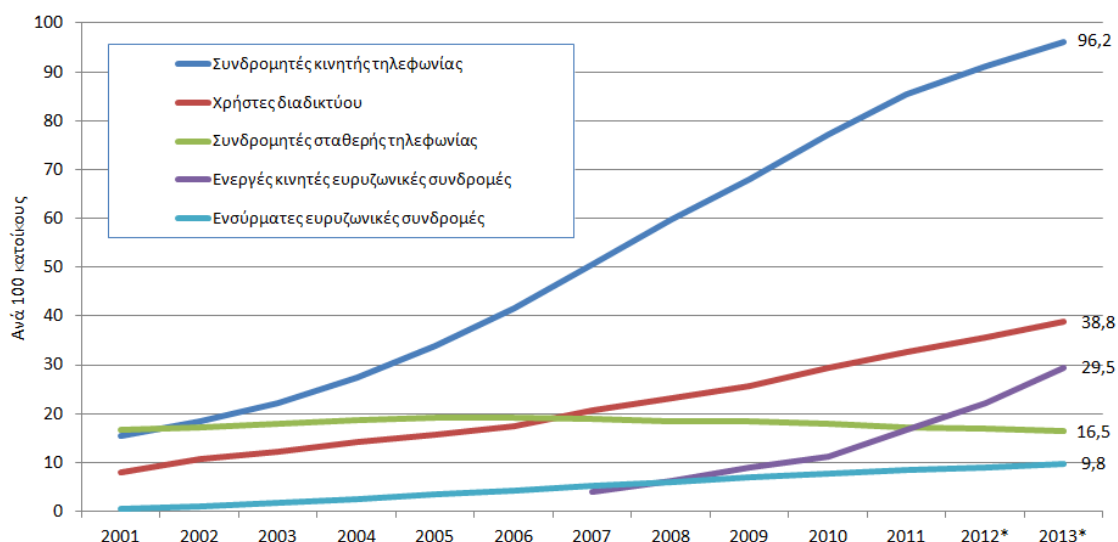
Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια εκπληκτική ανάπτυξη της βιομηχανίας της κινητής τηλεφωνίας, τόσο από άποψη τεχνολογίας όσο και από άποψη συνδρομητών (Εικόνα 1). Υπήρξε μια σαφής μετάβαση από τη σταθερή στην κινητή τηλεφωνία, ιδίως μετά την αλλαγή του αιώνα. Στις μέρες μας μάλιστα, σύμφωνα με τα στοιχεία του οργανισμού International Telecommunication Union (ITU) ο αριθμός των συνδρομητών της κινητής τηλεφωνίας εκτιμάται πως είναι περίπου έξι φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των γραμμών σταθερής τηλεφωνίας (Εικόνα 2) [1].



Σημείωση: \* Εκτίμηση

**Εικόνα 1. Συνολικός αριθμός συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και ποσοστό ανά 100 κατοίκους για τα έτη 2001-2013.**

(Πηγή: ITU World Telecommunication/ICT Indicators database)



Σημείωση: \* Εκτίμηση

### Εικόνα 2. Συνολικός αριθμός συνδρομητών ανά τεχνολογία για τα έτη 2001-2013.

(Πηγή: ITU World Telecommunication/ICT Indicators database)

Τόσο οι πάροχοι όσο και οι προμηθευτές κινητών δικτύων έχουν αισθανθεί τη σημασία των αποτελεσματικών δικτύων με εξίσου αποτελεσματικό σχεδιασμό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο σχεδιασμός των δικτύων και η βελτιστοποίηση των υπηρεσιών να είναι πλέον θέματα μεγάλης σημασίας. Με τη τεχνολογική πρόοδο και την συνύπαρξη των 2G, 2.5G και 3G δικτύων, ο αντίκτυπος των υπηρεσιών στην αποτελεσματικότητα των δικτύων γίνεται ακόμα πιο κρίσιμος. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί πολύ περισσότερα σενάρια για το σχεδιασμό όχι μόνον των 2G, αλλά και των 2.5G δικτύων ή ακόμα και των 3G δικτύων. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαλειτουργικότητα των δικτύων [2].

Με τον όρο 1G αναφερόμαστε στις αναλογικές κυψελωτές τεχνολογίες που έγιναν αρχικά διαθέσιμες στη δεκαετία του 1980. Το 2G υποδηλώνει τα αρχικά ψηφιακά συστήματα, τα οποία εισήγαγαν υπηρεσίες, όπως τα σύντομα μηνύματα και τις χαμηλές ταχύτητες δεδομένων. Το CDMA2000 1xRTT και το Global System for Mobile Communications (GSM) είναι οι βασικές 2G τεχνολογίες, αν και το CDMA2000 1xRTT αναφέρεται μερικές φορές και ως 3G τεχνολογία, διότι πληροί την απαίτηση των 3G δικτύων για ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 144 Kbps. Το ίδιο συμβαίνει και με το Enhanced Data for Global Evolution (EDGE). Οι τεχνολογίες 2G κατέστησαν διαθέσιμες στη δεκαετία του 1990. Οι απαιτήσεις των 3G δικτύων είχαν καθοριστεί από το ITU ως μέρος του International Mobile Telephone 2000 (IMT-2000) project, σύμφωνα με το οποίο τα ψηφιακά δίκτυα έπρεπε να παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης ίσους με 144 Kbps σε ταχέως κινούμενους χρήστες, 384 Kbps σε ταχύτητες πεζών και 2 Mbps σε εσωτερικούς χώρους. Το Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), το High Speed Packet Access (HSPA) και το CDMA2000 EV-DO είναι οι κύριες 3G τεχνολογίες, αν και πρόσφατα το WiMAX ορίστηκε επίσης ως επίσημη 3G τεχνολογία. Οι 3G τεχνολογίες άρχισαν να αναπτύσσονται κυρίως την τελευταία δεκαετία.

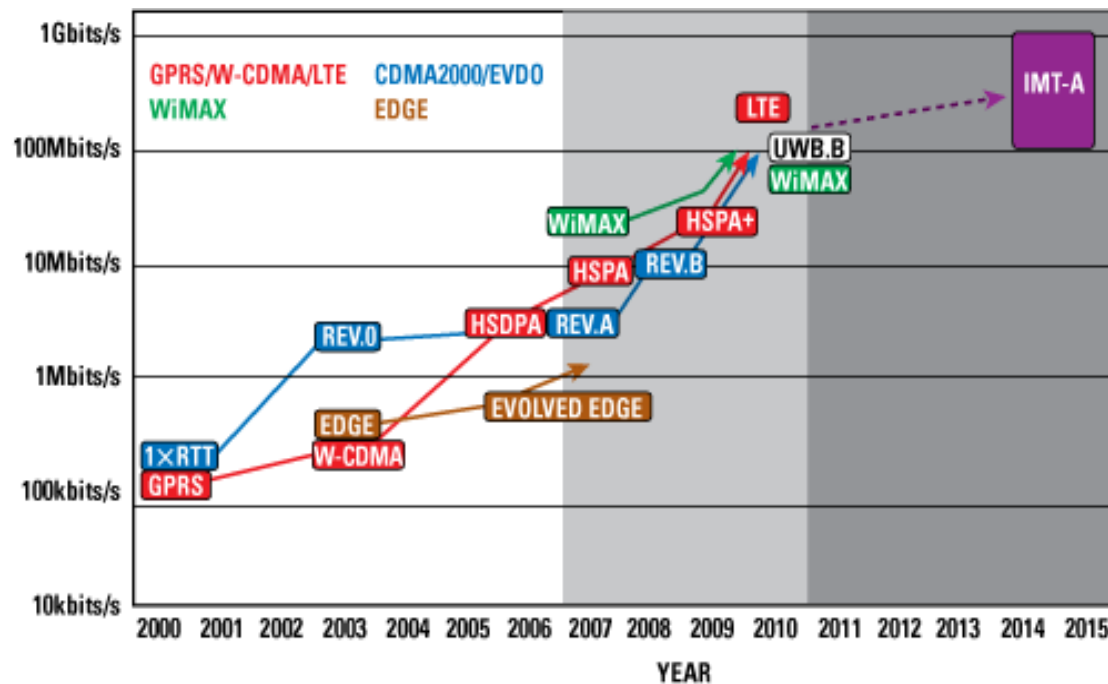


Το ITU πρόσφατα εξέδωσε τις απαιτήσεις για τα συστήματα International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced), τα οποία αποτελούν τον επίσημο ορισμό των 4G δικτύων. Οι απαιτήσεις που ορίστηκαν για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς περιλαμβάνουν τη λειτουργία ασύρματων καναλιών μέχρι 40 MHz και εξαιρετικά υψηλή φασματική απόδοση (spectral efficiency). Το ITU συνιστά τη λειτουργία ασύρματων καναλιών μέχρι 100 MHz και μέγιστη φασματική απόδοση 15 bps / Hz, με αποτέλεσμα ρυθμούς μετάδοσης που θεωρητικά είναι της τάξης των 1.5 Gbps. Ωστόσο, ως στόχος των δικτύων τέταρτης γενιάς σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης αναφέρεται συχνά το 1 Gbps.

Ωστόσο μέχρι σήμερα καμία διαθέσιμη τεχνολογία δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αυτές. Για το λόγο αυτό θα αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες όπως το LTE-A και το IEEE 802.16m. Κάποιοι προσπάθησαν να θεωρήσουν τις τρέχουσες εκδόσεις του WiMAX και LTE ως 4G, αλλά αυτό είναι ακριβές μόνο στο βαθμό που αυτός ο χαρακτηρισμός αναφέρεται στη γενική προσέγγιση ή την πλατφόρμα που θα πρέπει να ενισχυθεί ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις του 4G. Με το WiMAX και το HSPA να ξεπερνούν σημαντικά τις απαιτήσεις του 3G, το να συγκαταλέγονται στις τεχνολογίες 3G σαφώς δεν είναι αντιπροσωπευτικό των ικανοτήτων τους. Όμως, δεν είναι εξίσου σωστό να καλούνται 4G. Το γεγονός ότι η κατάταξη των τεχνολογιών σε γενιές πολλές φορές δεν αποτυπώνεται σωστά έχει δημιουργήσει σύγχυση στην αγορά [3]. Οι επόμενες παράγραφοι αυτού του κεφαλαίου επιχειρούν να ξεκαθαρίσουν σε ένα βαθμό τη σύγχυση αυτή.

## 2.1 Η εξέλιξη των κυψελωτών κινητών δικτύων

Η χρονολογική εξέλιξη των κινητών δικτύων φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 3. Χρονολογική εξέλιξη κινητών δικτύων έως το IMT-Advanced.

### 2.1.1 Συστήματα πρώτης γενιάς

Το 1980 είναι η εποχή όπου εισάγεται η κινητή τηλεφωνία, και έκτοτε οι κινητές επικοινωνίες έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές και τεράστια ανάπτυξη. Τα συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούν αναλογική μετάδοση για υπηρεσίες ομιλίας. Το 1979, το πρώτο κυψελωτό σύστημα στον κόσμο, άρχισε να λειτουργεί από την Nippon Telephone and Telegraph (NTT), στο Τόκυο. Δύο χρόνια αργότερα, τα κυψελωτά συστήματα έφτασαν στην Ευρώπη. Τα δύο πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα ήταν το Nordic Mobile Telephones (NMT) και το Total Access Communication Systems (TACS). Την ίδια δεκαετία κάποια ακόμα αναλογικά συστήματα εισήχθησαν σε όλη την Ευρώπη. Όλα αυτά τα συστήματα μπορούσαν να υποστηρίξουν μεταπομπή (handover) και είχαν τη δυνατότητα περιαγωγής (roaming), αλλά δεν ήταν σε θέση να προσφέρουν διαλειτουργικότητα μεταξύ των χωρών. Αυτή ήταν ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της πρώτης γενιάς κινητών δικτύων.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το 1982 αναπτύχθηκε το Advanced Mobile Phone System (AMPS). Στο σύστημα ανατέθηκε εύρος ζώνης της τάξεως των 40 MHz μέσα στο εύρος συχνοτήτων 800-900 MHz, από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών της Αμερικής (Federal Communications Commission - FCC). Το 1988, ένα πρόσθετο εύρος ζώνης 10 MHz, διατέθηκε στο AMPS. Το AMPS λειτούργησε για πρώτη φορά στο Σικάγο, με μια περιοχή κάλυψης 2.100 τετραγωνικών μιλίων. Το AMPS προσέφερε 832 κανάλια, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 10 Kbps. Παρότι στις πρώτες εφαρμογές του AMPS χρησιμοποιήθηκαν πολυκατευθυντικές κεραιές, στη συνέχεια έγινε αντιληπτό ότι η χρήση κατευθυντικών κεραιών θα απέφερε καλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στα κελιά. Στην πραγματικότητα, ο μικρότερος παράγοντας επαναχρησιμοποίησης που είχε τη δυνατότητα να προσφέρει λόγο σήματος προς παρεμβολή (Signal-to-Interference Ratio - SIR) ίσο με 18dB χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραιές 120 μοιρών υπολογίστηκε ότι είναι 7. Ως εκ τούτου, υιοθετήθηκε για το AMPS ένα μοτίβο επαναχρησιμοποίησης 7 κελιών. Οι μεταδόσεις από τους σταθμούς βάσης προς κινητά πραγματοποιούνται μέσω του forward channel χρησιμοποιώντας τις συχνότητες στο εύρος 869-894 MHz. Το reverse channel χρησιμοποιείται για τις μεταδόσεις από τα κινητά προς το σταθμό βάσης, χρησιμοποιώντας συχνότητες μεταξύ 824-849 MHz.

Τα συστήματα AMPS και TACS χρησιμοποιούν για την ασύρματη μετάδοση την τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας (Frequency Modulation - FM). Η κίνηση πολυπλέκεται σε ένα σύστημα Frequency Division Multiple Access (FDMA) [4], [5].

### 2.1.2 Συστήματα δεύτερης γενιάς

Τα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) εισήχθησαν στο τέλος της δεκαετίας του 1980. Εκτός από την παραδοσιακή υπηρεσία ομιλίας υποστηρίζονται επίσης και υπηρεσίες δεδομένων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς, τα συστήματα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, όπως η τεχνολογία Time Division Multiple Access (TDMA) και τη τεχνολογία Code Division Multiple Access (CDMA). Κατά συνέπεια, εν συγκρίσει με τα συστήματα 1G, τα συστήματα 2G προσφέρουν υψηλότερη

φασματική απόδοση, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο προηγμένες υπηρεσίες περιαγωγής. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκε το σύστημα GSM για να παρέχει ένα ενιαίο πρότυπο. Αυτό επέτρεψε την αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών εντός της Ευρώπης μέσω της διεθνούς περιαγωγής. Το GSM, χρησιμοποιεί την τεχνολογία TDMA για την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών πάνω από 20 χρόνια και συνεχώς βελτιώνεται έτσι ώστε να προσφέρει συνεχώς καλύτερες υπηρεσίες στην αγορά. Νέες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί με βάση το αρχικό σύστημα GSM, οι οποίες οδήγησαν σε πιο προηγμένα συστήματα γνωστά και ως συστήματα 2.5 γενιάς (2.5 G).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, υπήρξαν τρεις διαφορετικές εκδόσεις συστημάτων δεύτερης γενιάς. Το πρώτο ψηφιακό σύστημα, το οποίο εισήχθη το 1991, ήταν το IS-54, ενώ μία νέα έκδοσή του που υποστηρίζει πρόσθετες υπηρεσίες (IS-136) εισήχθη το 1996. Εν τω μεταξύ, το 1993 αναπτύχθηκε το σύστημα IS-95 (CDMA One). Η επιτροπή FCC δημοπράτησε ένα νέο τμήμα του φάσματος στη ζώνη των 1900 MHz, επιτρέποντας στο σύστημα GSM1900 να εισέλθει στην αγορά των ΗΠΑ. Τέλος, στην Ιαπωνία, ορίστηκε το 1990 το σύστημα Personal Digital Cellular (PDC) [5].

Δεδομένου ότι τα πρώτα δίκτυα εμφανίστηκαν στις αρχές του 1991, η τεχνολογία GSM σταδιακά εξελίχθηκε ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις της κίνησης των δεδομένων και των νέων υπηρεσιών που είχαν εμφανιστεί. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος αυτού είναι το Base Station Subsystem (BSS), στο οποίο υπάρχουν τα Base Transceiver Station (BTS) και Base Station Controllers (BSC) και το Network Switching Subsystem (NSS), στο οποίο βρίσκονται τα: Mobile Switching Center (MSC), Visitor Location Register (VLR), Home Location Register (HLR), Authentication Center (AC) και Equipment Identity Register (EIR). Το δίκτυο είναι ικανό να παρέχει όλες τις βασικές υπηρεσίες έως 9.6 Kbps, όπως fax κλπ. Αυτό το δίκτυο GSM έχει επίσης μια επέκταση για το δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας. Ένας νέος σχεδιασμός εισήχθη στο MSC των συστημάτων δεύτερης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των BSCs απαλλάσσει το MSC από το φορτίο με το οποίο επιβαρύνεται στα συστήματα πρώτης γενιάς. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει τη σταθεροποίηση της διεπαφής μεταξύ του MSC και του BSC. Ως εκ τούτου, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη διαλειτουργικότητα και τη σταθεροποίηση στα συστήματα δεύτερης γενιάς, με αποτέλεσμα ο πάροχος να μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικούς κατασκευαστές για το MSC και τα BSCs. Εκτός από τις βελτιώσεις στο σχεδιασμό του MSC, εισήχθη ο υποβοηθούμενος από το κινητό μηχανισμός μετάβασης (handoff). Λαμβάνοντας σήματα από γειτονικούς σταθμούς βάσης, ένα κινητό μπορεί να προκαλέσει μετάβαση μέσω σηματοδότησης με το δίκτυο. Η επόμενη εξέλιξη στο σύστημα GSM ήταν η προσθήκη δύο πλατφορμών, της πλατφόρμας Voice Mail Service (VMS) και της Short Message Service Center (SMSC). Το SMSC αποτέλεσε μεγάλη εμπορική επιτυχία, μάλιστα τόσο πολύ έτσι ώστε σε ορισμένα δίκτυα η κίνηση των SMSs να αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής κίνησης. Οι «έξυπνες» υπηρεσίες έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στο σύστημα GSM, προσφέροντας στους παρόχους τη δυνατότητα να δημιουργήσουν ένα ολόκληρο φάσμα νέων υπηρεσιών. Ένα αποτέλεσμα των «έξυπνων» υπηρεσιών είναι οι «προπληρωμένες» υπηρεσίες.

Καθώς η απαίτηση για αποστολή δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής συνεχώς αυξανόταν, νέοι κόμβοι όπως ο Servicing General Packet Radio Services

(SGSN) και το Gateway GPRS (GGSN) προστέθηκαν στο υπάρχον GSM σύστημα. Οι κόμβοι αυτοί κατέστησαν δυνατή την αποστολή πακέτων δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής. Το μέρος του δικτύου το οποίο χειρίζεται τα πακέτα δεδομένων ονομάζεται κύριο δίκτυο πακέτων. Εκτός από τους κόμβους SGSN και GGSN, το κύριο δίκτυο πακέτων περιέχει επίσης τους δρομολογητές IP, τους firewall servers και τους Domain Name Servers (DNS). Αυτές οι προσθήκες δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο internet με ρυθμό μετάδοσης που φτάνει τα 150 Kbps υπό καλές συνθήκες.

Η μετάβαση στη γενιά 2.5G ξεκίνησε με το General Packet Radio Service (GPRS). Το GPRS είναι μια ασύρματη τεχνολογία για τα GSM δίκτυα που προσθέτει πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων, μικρότερο χρόνο εγκαθίδρυσης ISP συνδέσεων, καθώς και δυνατότητα χρέωσης όγκου δεδομένων που αποστέλλονται, και όχι χρόνου σύνδεσης. Η μεταγωγή πακέτων είναι μια τεχνική με την οποία η πληροφορία (φωνή ή δεδομένα) αποστέλλεται διαιρεμένη σε πακέτα, το καθένα από τα οποία αποτελείται από, το πολύ, λίγα Kbytes και τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται από το δίκτυο σε διάφορους προορισμούς οι οποίοι επιλέγονται με βάση κάποια συγκεκριμένα δεδομένα που βρίσκονται μέσα σε κάθε πακέτο. Η χρήση των πόρων του δικτύου έχει βελτιστοποιηθεί καθώς οι πόροι απασχολούνται μόνο κατά τη διάρκεια χειρισμού του κάθε πακέτου. Το GPRS υποστηρίζει ευέλικτους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, καθώς και συνεχή σύνδεση στο δίκτυο. Έτσι το GPRS αποτελεί το πιο σημαντικό βήμα προς την τρίτη γενιά κινητών δικτύων.

Από τη στιγμή που το σύστημα υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, παρουσιάστηκε η ανάγκη να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Αυτό έγινε με τη χρήση πιο εξελιγμένων μεθόδων κωδικοποίησης μέσω του διαδικτύου, αυξάνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων έως τα 384 Kbps. Η εφαρμογή του EDGE ήταν σχετικά ανώδυνη και απαιτούσε μικρές αλλαγές στο υλικό και το λογισμικό του δικτύου αφού χρησιμοποιείται και πάλι η ίδια TDMA δομή του πλαισίου, τα ίδια κανάλια και φορείς εύρους ζώνης 200 KHz όπως στα σημερινά δίκτυα GSM. Καθώς το EDGE εξελίσσεται συνυπάρχοντας με το 3G Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA), είναι διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 2 Mbps [2], [4]. Τα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς εξακολουθούν να κυριαρχούν στη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας ακόμα και στις μέρες μας. Ωστόσο, παράλληλα έχουν εισαχθεί στην αγορά και τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G) των οποίων η διεϊόδυση έχει αρχίσει να αυξάνεται σημαντικά.

### 2.1.3 Συστήματα τρίτης γενιάς

Στο EDGE, ήταν δυνατή η κίνηση υψηλού όγκου δεδομένων, αλλά η μετάδοση πακέτων στην ασύρματη διεπαφή εξακολουθούσε να συμπεριφέρεται όπως στην μεταγωγή κυκλώματος. Επομένως, τμήμα της απόδοσης λόγω της μεταγωγής πακέτων χανόταν εξαιτίας του περιβάλλοντος μεταγωγής κυκλώματος στην ασύρματη διεπαφή. Ένα ακόμη μειονέκτημα, ήταν πως τα πρότυπα για την ανάπτυξη των δικτύων ήταν διαφορετικά σε διάφορα μέρη του κόσμου. Ως εκ τούτου, γεννήθηκε η ανάγκη για ένα δίκτυο που παρέχει υπηρεσίες ανεξάρτητα από την πλατφόρμα που χρησιμοποιείται και του οποίου τα πρότυπα σχεδιασμού είναι

ίδια σε παγκόσμιο επίπεδο. Με άλλα λόγια, γεννήθηκε η ανάγκη για την τρίτη γενιά κινητών δικτύων [2].

Ο οργανισμός ITU καθόρισε τις απαιτήσεις για τα κινητά δίκτυα 3G σύμφωνα με το πρότυπο IMT-2000. Το έργο αυτό το συνέχισε ο οργανισμός 3GPP καθορίζοντας ένα σύστημα που πληροί το πρότυπο IMT-2000. Στην Ευρώπη, το σύστημα αυτό είναι το UMTS. Το IMT-2000 είναι το όνομα δόθηκε από το ITU στα συστήματα τρίτης γενιάς, ενώ CDMA2000 είναι το όνομα της αμερικανικής παραλλαγής για τα 3G συστήματα. Η τεχνολογία για την ασύρματη διεπαφή του UMTS είναι το WCDMA. Τα κύρια συστατικά του είναι ο σταθμός βάσης ή αλλιώς NodeB, το Radio Network Controller (RNC), το Wideband CDMA Mobile Switching Center (WMSC) και οι κόμβοι SGSN/GGSN. Τα δίκτυα 3<sup>ης</sup> γενιάς επιτρέπουν στους παρόχους να προσφέρουν ένα ευρύτερο φάσμα προηγμένων υπηρεσιών και μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου μέσω της βελτιωμένης φασματικής απόδοσης. Μεταξύ των προηγμένων υπηρεσιών είναι οι ευρυζωνικές ασύρματες φωνητικές υπηρεσίες, οι βίντεο-κλήσεις, καθώς και η ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων. Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά του συστήματος περιλαμβάνουν τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων με την τεχνολογία HSPA, η οποία είναι ικανή να προσφέρει ταχύτητες έως 14.4 Mbps στο downlink και 5.8 Mbps στο uplink.

Το πρώτο εμπορικό 3G δίκτυο ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2001 από την NTT DoCoMo στην Ιαπωνία με το όνομα FOMA, και ήταν βασισμένο στην τεχνολογία WCDMA [6]. Το δεύτερο δίκτυο που λειτούργησε ήταν από την SK Telecom στη Νότια Κορέα τον Ιανουάριο του 2002 ενώ ακολούθησε ένα ακόμη 3G δίκτυο στη Νότια Κορέα (το KTF) το Μάιο του 2002. Στην Ευρώπη, οι υπηρεσίες 3G ξεκίνησαν να προσφέρονται το Μάρτιο του 2003 από την εταιρία 3 στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιταλία. Στις Ηνωμένες Πολιτείες το πρώτο 3G δίκτυο δημιουργήθηκε από την εταιρία Monet Mobile Networks, βασισμένο στο CDMA2000, ενώ ο δεύτερος πάροχος 3G δικτύου ήταν η Verizon Wireless τον Οκτώβριο του 2003. Το πρώτο εμπορικό δίκτυο 3G στο νότιο ημισφαίριο ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2003 από την Hutchison Telecommunications με την επωνυμία «Three» χρησιμοποιώντας την τεχνολογία UMTS. Τέλος, στην Αφρική η πρώτη υλοποίηση 3G δικτύου έγινε από την EMTEL στο Μαυρίκιο χρησιμοποιώντας το πρότυπο WCDMA.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η εγκατάσταση των 3G δικτύων καθυστέρησε σε αρκετές χώρες λόγω του τεράστιου κόστους που απαιτούνταν για τις άδειες φάσματος συχνοτήτων. Σε πολλές χώρες, τα δίκτυα 3G δεν χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες με τα δίκτυα δεύτερης γενιάς και επομένως οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έπρεπε να υλοποιήσουν εντελώς νέα δίκτυα και να αποκτήσουν άδειες για εντελώς νέες συχνότητες. Εξαίρεση αποτελούν οι Ηνωμένες Πολιτείες, όπου τα δίκτυα 3G λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες με άλλες υπηρεσίες. Άλλες καθυστερήσεις οφείλονταν στα έξοδα αναβάθμισης του εξοπλισμού των νέων συστημάτων. Τέλος, υπάρχουν χώρες, όπως η Ινδονησία, στις οποίες δεν έχουν χορηγηθεί ακόμα άδειες για 3G και επομένως δεν έχει ακόμα ξεκινήσει η υλοποίηση των δικτύων τρίτης γενιάς.

### 2.1.4 Συστήματα τέταρτης γενιάς

Η εμφάνιση νέων τεχνολογιών στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση οδήγησε στα συστήματα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G) [7]. Τα συστήματα 4G αυξάνουν την ικανότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών υπηρεσιών ενσωματώνοντας όλες τις ασύρματες τεχνολογίες που υπάρχουν (π.χ. το GSM, το GPRS, το IMT-2000, το Wi-Fi, το Bluetooth) σε μία «all-IP» πλατφόρμα [8]. Η μετάβαση στο «all-IP» γίνεται προκειμένου να υπάρχει μία κοινή πλατφόρμα για όλες τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα με αποτέλεσμα ο χρήστης να έχει την ελευθερία και την ευελιξία να επιλέξει οποιαδήποτε υπηρεσία επιθυμεί με λογική ποιότητα υπηρεσίας και σε προσιτή τιμή, οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Οι υπηρεσίες 4G ξεκίνησαν το 2010, αλλά αναμένεται να γίνουν ευρέως διαδεδομένες περίπου το 2014-15.

Σύμφωνα με τον οργανισμό ITU, τα IMT-Advanced 4G πρότυπα θα εγκαινιάσουν μια νέα εποχή κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών, με ταχύτερη πρόσβαση σε δεδομένα και ενισχυμένες δυνατότητες περιαγωγής. Αυτός είναι μάλιστα ο στόχος γιατί σύμφωνα με το ITU: *“Τα ευρυζωνικά δίκτυα έχουν καταστεί ζωτικής σημασίας εθνικές υποδομές - όπως ακριβώς και τα δίκτυα μεταφοράς, ενέργειας και ύδρευσης - αλλά και με επιπτώσεις που μπορεί να είναι ακόμα πιο ισχυρές και πέρα από κάθε φιλοδοξία. Αυτές οι βασικές βελτιώσεις στον τομέα των ασύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων μπορεί να οδηγήσουν σε κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, καθώς και στην επιτάχυνση της προόδου προς την επίτευξη των Αναπτυξιακών Στόχων του Ο.Η.Ε για τη Χιλιετία”* [9]. Οι τρέχουσες συμφωνίες σχετικά με τις απαιτήσεις όσον αφορά το IMT-Advanced είναι:

- Μέγιστος ρυθμός δεδομένων της τάξεως του 1 Gbps για το downlink και 500 Mbps για το uplink.
- Όσον αφορά την καθυστέρηση, ο χρόνος μετάβασης από κατάσταση αδράνειας σε κατάσταση σύνδεσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 100 ms.
- Η μέγιστη φασματική απόδοση για το downlink θα πρέπει να είναι έως και 15 bps/Hz και για το uplink 6.75 bps/Hz, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα μετάδοσης 4 x 4 (4 κεραιές στον πομπό και 4 στον δέκτη) ή μικρότερο στο downlink και 2 x 4 ή μικρότερο στο uplink.
- Η μέση φασματική απόδοση των χρηστών στο downlink πρέπει να είναι 2.2 bps/Hz/κελί με τρόπο μετάδοσης MIMO 4 x 2, ενώ στο uplink ο στόχος για τη μέση φασματική απόδοση είναι 1.4 bps/Hz/κελί με MIMO 2 x 4.
- Στο σενάριο με 10 χρήστες, φασματική απόδοση για τους χρήστες στα όρια των κελιών θα είναι 0.06 bps/Hz στο downlink με τρόπο μετάδοσης MIMO 4 x 2. Στο uplink, η αντίστοιχη φασματική απόδοση πρέπει να είναι 0.03 με MIMO 2 x 4.
- Υποστήριξη κινητικότητας έως 350 km/h.
- Το σύστημα IMT-Advanced θα υποστηρίξει κλιμακωτό εύρος ζώνης και συνάθροιση φάσματος με εύρος ζώνης μετάδοσης μεγαλύτερο από 40MHz για το downlink και το uplink.

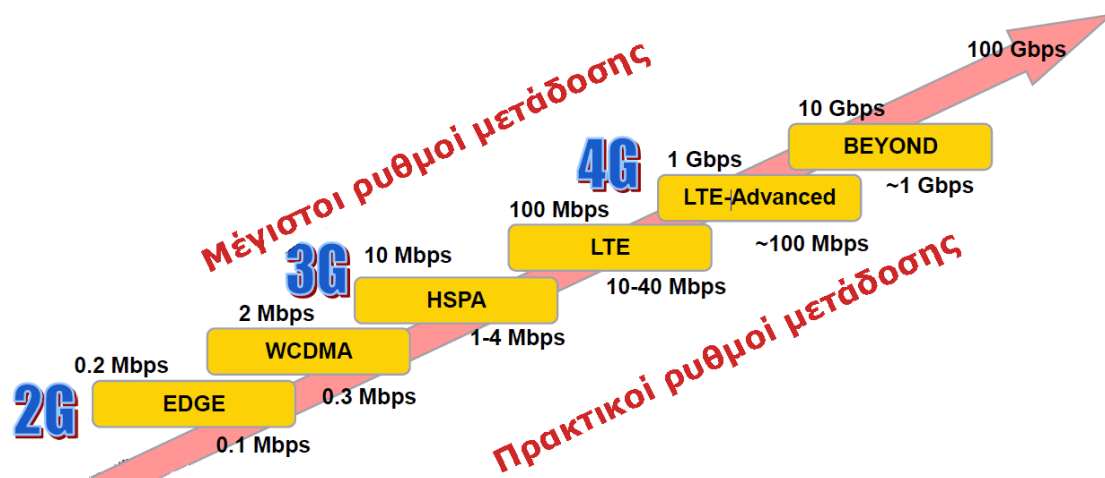
- Συμβατότητα και διαλειτουργικότητα με τα προηγούμενα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Μετά την ολοκλήρωση των προδιαγραφών της όγδοης έκδοσης, ο οργανισμός 3GPP έχει ήδη προγραμματίσει εργασίες ώστε το LTE-A να καλύψει τις απαιτήσεις του IMT-Advanced για τα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Παράλληλα, το WiMAX Forum και ο οργανισμός IEEE εξελίσσουν το WiMAX μέσω του IEEE 802.16m ή WiMAX-m προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του 4G.

## 2.2 Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη στην ασύρματη βιομηχανία. Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών έχουν προκαλέσει ερευνητές και βιομηχανίες να καταλήξουν σε μια ολοκληρωμένη έκδοση της επερχόμενης τέταρτης γενιάς κινητών συστημάτων. Όπως δείχνει η ιστορία των κινητών επικοινωνιών, έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη τεχνολογιών σύμφωνα με ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο. Η πρώτη γενιά εκπλήρωσε τη βασική ανάγκη της κινητής φωνητικής τηλεφωνίας, ενώ η δεύτερη γενιά εισήγαγε της έννοιες της χωρητικότητας και της κάλυψης. Ακολουθεί η τρίτη γενιά, η οποία παρέχει δεδομένα σε υψηλότερες ταχύτητες και ανοίγει τις πύλες για την πραγματικά «Mobile Broadband» εμπειρία, η οποία θα πραγματοποιηθεί από τη τέταρτη γενιά.

Τα δίκτυα 4G θα περιλαμβάνουν όλα τα συστήματα από διάφορα δίκτυα, τόσο δημόσια όσο και ιδιωτικά, από τα ευρυζωνικά δίκτυα των παρόχων στα ιδιωτικά και ad-hoc δίκτυα. Παράλληλα, τα 4G συστήματα θα λειτουργούν σε συνεργασία με τα 2G και 3G συστήματα, καθώς και με τα ψηφιακά ευρυζωνικά συστήματα πολυεκπομπής. Τέλος, τα συστήματα 4G θα είναι πλήρως βασισμένα σε IP, γεγονός το οποίο θα δίνει τη δυνατότητα για παροχή ευρέως φάσματος τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών που μέχρι σήμερα υποστηρίζονταν μόνο από τα ενσύρματα δίκτυα.



Εικόνα 4. Μέγιστοι και πρακτικοί ρυθμοί μετάδοσης κινητών δικτύων επόμενης γενιάς.

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει με τον καλύτερο τρόπο την εξέλιξη των κινητών δικτύων, ξεκινώντας από την δεύτερη γενιά και καταλήγοντας στα μετά-4G κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Στην εικόνα, φαίνονται τόσο οι θεωρητικοί μέγιστοι όσο και οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης που πετυχαίνει κάθε τεχνολογία.

Αν και στις προηγούμενες παραγράφους έγινε μία σύντομη εισαγωγή στα δίκτυα τέταρτης γενιάς, στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί διεξοδικά το σύστημα LTE-A. Θα αναλυθεί η αρχιτεκτονική και οι επίσημες προδιαγραφές του συστήματος, ενώ θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις τεχνολογίες MBSFN και MIMO στις οποίες επικεντρώθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.





## 3 Το ΣΥΣΤΗΜΑ LTE-A

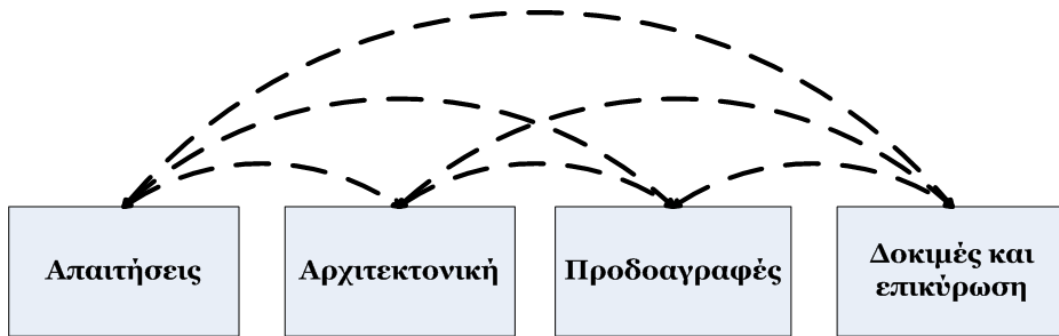
Τα συστήματα LTE έχουν ξεκινήσει να υιοθετούνται σε όλο τον κόσμο ως η κύρια τεχνολογία κινητής επικοινωνίας. Ειδικότερα η έκδοση 10 του LTE ήταν η πρώτη που κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-Advanced ώστε να θεωρηθεί τέταρτης γενιάς και για το λόγο αυτό ονομάστηκε LTE-Advanced (ή LTE-A). Καθώς οι τεχνολογίες δεύτερης και τρίτης γενιάς ξεκινούν σταδιακά να καταργούνται, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν σε πολλές χώρες προχωρήσει στην κατασκευή νέων LTE-A δικτύων. Σίγουρα θα περάσουν χρόνια μέχρι να ολοκληρωθεί η μετάβαση στα συστήματα τέταρτης γενιάς και στο μεσοδιάστημα τα δίκτυα LTE-A θα συνυπάρχουν με παλαιότερες τεχνολογίες, όπως το GSM και το CDMA.

Το LTE-A είναι πιθανόν το πιο σύνθετο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών που αναπτύχθηκε ποτέ. Ενσωματώνει χαρακτηριστικά που θα ήταν οικονομικά πολύ δύσκολο να εφαρμοστούν μέχρι πριν από μια δεκαετία. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας τα χαρακτηριστικά του LTE-A μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στους σταθμούς βάσης και τις κινητές συσκευές.

Υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών για το LTE-A είναι αποκλειστικά ο οργανισμός 3GPP. Ο οργανισμός αυτός παράγει προδιαγραφές όχι μόνο για το LTE αλλά και για κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς, εξυπηρετώντας περισσότερες από 5 δισεκατομμύρια συνδέσεις. Για το λόγο αυτό έχει θεσπίσει σαφείς κανονισμούς ως προς τη διαδικασία της προτυποποίησης όπως και αυστηρή δομή στην ανάθεση των αρμοδιοτήτων.

Η διαδικασία προτυποποίησης είναι συνεχής διαδικασία, εξελίσσοντας αδιάκοπα τα υφιστάμενα πρότυπα ώστε να καλύψουν νέες ανάγκες για υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Τα στάδια της διαδικασίας, σύμφωνα και με την Εικόνα 5, αποτελούνται από:

- τον αρχικό καθορισμό των απαιτήσεων,
- την αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται οι δομικές μονάδες και οι διεπαφές,
- το λεπτομερή καθορισμό των προδιαγραφών, και τέλος
- τη δοκιμαστική περίοδο και επικύρωση.



Εικόνα 5. Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE/LTE-A.

Τα στάδια αυτά μπορεί να είναι διαδοχικά, αλλά και με φάσεις επικάλυψης όταν κρίνεται απαραίτητο. Παραδειγματος χάριν, αλλαγές στις τεχνικές λεπτομέρειες μπορεί να αποδειχτούν αναγκαίες μέσω της δοκιμαστικής διαδικασίας. Η τελευταία κάποιες φορές δε θεωρείται μέρος της διαδικασίας προτυποποίησης παρόλα αυτά γίνεται παράλληλα με άλλα στάδια και η συνεισφορά της στην τελική μορφή του προτύπου είναι εξαιρετικά σημαντική. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν από τη δοκιμαστική διαδικασία έχουν προκύψει σταθερά αποτελέσματα, οπότε είναι δυνατό να αρχίσει και η διαδικασία υλοποίησης.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή που το πρότυπο ολοκληρώνεται μέχρι την εμπορική εκμετάλλευσή του είναι περίπου ένα με δύο χρόνια, αν και αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως αν πρόκειται για νέο πρότυπο ή αποτελεί επέκταση προϋπάρχοντος.

Αξίζει να σημειωθεί πως, αν και ανεξάρτητη, η 3GPP λαμβάνει υπόψη τις συστάσεις του οργανισμού ITU, καθώς και τους περιορισμούς που μπορεί να επιβάλλει μια συγκεκριμένη γεωγραφική ζώνη, όπως λειτουργία σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων ή ειδικές συνθήκες ασφάλειας. Οι προδιαγραφές αναπτύσσονται με το σκεπτικό της απροβλημάτιστης παγκόσμιας περιαγωγής και την εύκολη διακίνηση των τερματικών. Αυτό, δυστυχώς, σημαίνει πως πολλές, τοπικά επιβαλλόμενες προδιαγραφές μετατρέπονται σε καθολικές προδιαγραφές αφού ένα τερματικό πρέπει να καλύπτει τις αυστηρότερες των προδιαγραφών που ενδεχομένως συναντήσει για να εξασφαλιστεί η απροβλημάτιστη περιαγωγή.

Τη στιγμή αυτή έχει οριστικοποιηθεί η έκδοση 11, ενώ η έκδοση 12 είναι στο στάδιο της ανάπτυξης με εκτιμώμενη ημερομηνία οριστικοποίησης τον Σεπτέμβριο του 2014.

### 3.1 Στάδια εξέλιξης

Το LTE στην πρώτη επίσημη έκδοση του (Έκδοση 8) επιτυγχάνει θεωρητικά ταχύτητες της τάξης των 100 Mbps, αν και τέτοια επίπεδα αφορούν ιδανικές συνθήκες που σπάνια συναντώνται. Το κύριο δίκτυό του, αποτελεί εξέλιξη του κύριου δικτύου στο GPRS και ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC), ενώ η ασύρματη διεπαφή είναι η εξέλιξη του Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) των UMTS δικτύων και ονομάζεται evolved-UTRAN (e-UTRAN). Το δίκτυο του LTE στο σύνολό του είναι αποκλειστικά δίκτυο μεταγωγής πακέτου, και υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας, καθώς και σχήματα Frequency Division Duplex (FDD) και Time

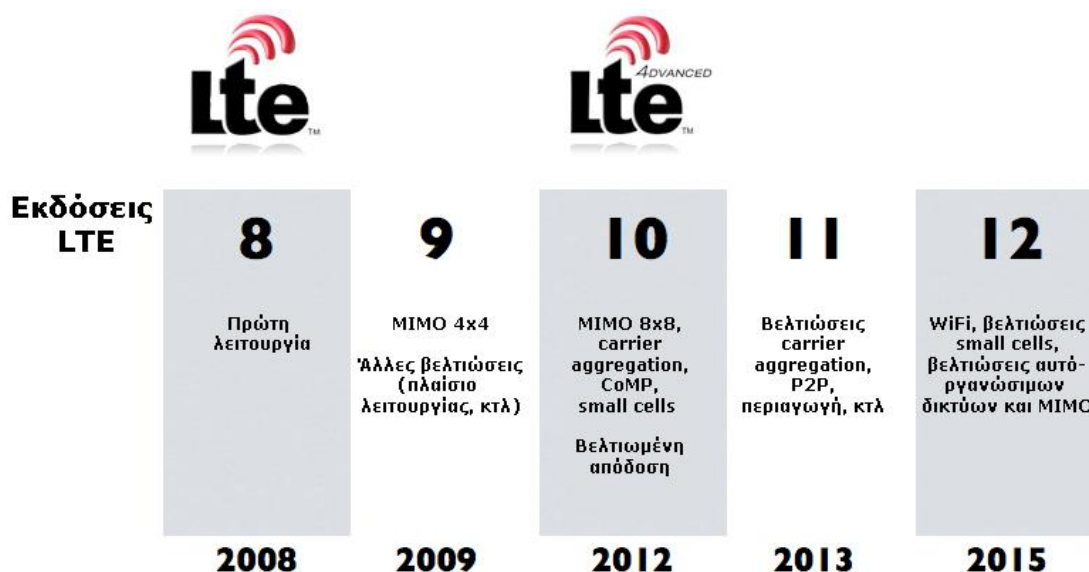
Division Duplex (TDD). Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η χαμηλή καθυστέρηση, η μεγάλη φασματική ευελιξία και απόδοση, και η χρήση τεχνολογίας Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) στο downlink και Single-carrier FDMA (SC-FDMA) στο uplink.

Η έκδοση που ακολούθησε (Έκδοση 9), εμπλούτισε την προϋπάρχουσα έκδοση, χωρίς τροποποιήσεις στην υποδομή και αρχιτεκτονική. Με την βελτίωση της δυνατότητας μεταδόσεων MIMO 4x4, δηλαδή τέσσερις κεραιές παράλληλης μετάδοσης στο δέκτη και τέσσερις στον πομπό, τριπλασίασε σχεδόν τη μέγιστη ταχύτητα, αγγίζοντας τα 300 Mbps στο downlink, και 75 Mbps στο uplink. Η έκδοση αυτή, εισήγαγε ακόμα το MBSFN για υπηρεσίες όπως Mobile TV, και έθεσε συγκεκριμένες προδιαγραφές για την υποστήριξη αυτό-οργανώσιμων (self-organizing) και ετερογενών δικτύων (femtocells, picocells).

Οι εκδόσεις αυτές δεν κάλυπταν πλήρως τις προδιαγραφές του IMT-Advanced, και για αυτό αρχικά χαρακτηρίστηκαν 3.9G τεχνολογίες. Όμως, υπό την πίεση του μάρκετινγκ, τελικά κατάφεραν να χαρακτηριστούν και να προωθηθούν εμπορικά ως συστήματα τέταρτης γενιάς, με τις μετέπειτα ανώτερες και επαρκείς βάσει IMT-Advanced εκδόσεις να διαφοροποιούνται με τον όρο «πραγματικό 4G».

Η έκδοση 10 που ακολούθησε, κατατέθηκε για έγκριση το 2009, οριστικοποιήθηκε το 2011, και βελτιώνει αρκετά στοιχεία των προηγούμενων εκδόσεων. Η έκδοση αυτή επέτρεπε βελτιωμένες τεχνικές MIMO έως 8x8, και εισήγαγε τη δυνατότητα συνάθροισης των φορέων (carrier aggregation), αυξάνοντας το μέγιστο εύρος ζώνης από τα 20 MHz στα 100 MHz. Με αυτό τον τρόπο, η μέγιστη ταχύτητα της έκδοσης αυτής φθάνει και ξεπερνάει το 1 Gbps στο downlink και τα 500 Mbps στο uplink. Πέραν των παραπάνω, η νέα έκδοση εισάγει ή βελτιώνει αρκετά ακόμα χαρακτηριστικά. Τα σημαντικότερα από αυτά, είναι η δυνατότητα Coordinated Multipoint (CoMP) μετάδοσης και λήψης, η αναβάθμιση της δυνατότητας του δικτύου για συντονισμό, με στόχο την αντιμετώπιση παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα, η διασύνδεση μεταξύ των eNodeBs (evolved NodeBs), την εξέλιξη δηλαδή των NodeBs στη νέα έκδοση, η υποστήριξη relaying, καθώς και σαφείς προδιαγραφές των HeNBs (Home eNodeBs), δηλαδή των σταθμών βάσης των femtocells για την τεχνολογία LTE-A.

Η έκδοση αυτή ήταν η πρώτη που κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-Advanced ώστε να θεωρηθεί 4G. Για αυτό το λόγο, η έκδοση ονομάστηκε LTE-Advanced και τέθηκε υποψήφια στον οργανισμό ITU για το παγκόσμιο πρότυπο 4G. Στην Εικόνα 6 διακρίνονται τα στάδια εξέλιξης του LTE χρονικά, μαζί με τις κυριότερες επεκτάσεις που σηματοδοτούσε κάθε έκδοση.



Εικόνα 6. Στάδια εξέλιξης των εκδόσεων LTE και το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης του LTE-A.

Οι διεργασίες για την εξέλιξη και βελτίωση του LTE-A φυσικά δε σταμάτησαν εκεί και ήδη βρισκόμαστε στην Έκδοση 11. Αντίθετα, η εξέλιξη είναι συνεχής και υποστηρίζεται έντονα από την ισχυρή αποδοχή παγκοσμίως του LTE-A ως πρότυπο 4G. Μαζί με το Mobile WiMAX του WiMAX Forum, το LTE του 3GPP αποτελούν τα πλέον κυρίαρχα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που μπόρεσαν να χαρακτηριστούν 4<sup>ης</sup> γενιάς. Ωστόσο, αν και το Mobile WiMAX προηγήθηκε του LTE (2006-2008), άργησε να υλοποιηθεί και έχασε σύντομα έδαφος εμπορικά, με αποτέλεσμα την προτίμηση των παρόχων ή και την μετακίνησή τους από Mobile WiMAX σε LTE. Οι ανώτερες υπηρεσίες που προσφέρει το LTE και το μικρότερο κόστος σε σχέση με τον ανταγωνισμό, το έχουν καταστήσει τον ισχυρότερο υποψήφιο τεχνολογίας 4G, και λόγω της σχεδόν καθολικής αποδοχής του, πιθανότατα το πρώτο παγκόσμια υιοθετημένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας.

### 3.2 Προδιαγραφές

Οι σχεδιαστικοί στόχοι του IMT-Advanced ήταν αυτοί που καθόρισαν τη βάση της θέσπισης των ελάχιστων προδιαγραφών του LTE-A. Το 3GPP τις ανανεώνει, προσαρμόζει και ενημερώνει όποτε κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο. Οι προδιαγραφές αρχειοθετούνται στο [10] και ο Πίνακας 1 απεικονίζει τις βασικότερες εξ' αυτών.

Αν και ο πρωταρχικός στόχος ήταν να καλυφθούν οι απαιτήσεις του IMT-Advanced, σε πολλά στοιχεία οι επιδόσεις ξεπερνούν κατά πολύ τις προδιαγραφές αυτές, αποτελώντας μια μακροπρόθεσμη εγγύηση για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών στο χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα τέθηκε να είναι τουλάχιστον το 1 Gbps για το downlink, ενώ για χρήστες με υψηλή κινητικότητα η ταχύτητα αναμένεται να φτάνει στα 100 Mbps. Ο στόχος για το uplink τέθηκε να είναι 500 Mbps. Η μέγιστη ταχύτητα χρήστη που υποστηρίζεται φτάνει τα 350 km/h.

**Πίνακας 1. Κύριες προδιαγραφές IMT-Advanced.**

Παράμετρος	Τιμή
Εύρος ζώνης καναλιού	5-20 MHz, με δυνατότητα έως 40 MHz, Κλιμακωτό
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (σταθερός χρήστης)	Downlink: 1 Gbps Uplink: 500 Mbps
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (κινούμενος με υψηλή ταχύτητα χρήστης)	100 Mbps
Μέγιστη φασματική απόδοση	Downlink: 15 bps/Hz (μέγιστο MIMO 4 x 4) Uplink: 6.75 bps/Hz (μέγιστο MIMO 2 x 4)
Μέση φασματική απόδοση χρηστών	Downlink: 2.2 bps/Hz/κελί (μέγιστο MIMO 4 x 2) Uplink: 1.4 bps/Hz/κελί (μέγιστο MIMO 2 x 4)
Φασματική απόδοση χρηστών στα όρια των κελιών	Downlink: 0.06 bps/Hz (μέγιστο MIMO 4 x 2) Uplink: 0.03 bps/Hz (μέγιστο MIMO 2 x 4)
Χρόνος μετάβασης από κατάσταση αδράνειας σε κατάσταση σύνδεσης	< 100 ms
Χρόνος μετάβασης από κατάσταση αναμονής σε ενεργή κατάσταση	< 10 ms
Χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> <li>• All-IP δίκτυο μεταγωγής πακέτων</li> <li>• Συμβατότητα και διαλειτουργικότητα με ασύρματα πρότυπα προηγούμενης γενιάς</li> <li>• Δυναμικός διαμοιρασμός και χρήση πόρων δικτύου</li> <li>• Παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών με υψηλή ποιότητα υπηρεσίας</li> <li>• Αδιάκοπη συνδεσιμότητα</li> <li>• Παγκόσμια περιαγωγή μεταξύ διάφορων δικτύων με ομαλή μετάβαση</li> <li>• Υποστήριξη κινητικότητας έως 350 km/h</li> </ul>

Πέρα από τη μέγιστη ταχύτητα, ορίστηκε η ελάχιστη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, που εκφράζεται μέσω του βαθμού εκμετάλλευσης του φάσματος. Η μετρική αυτή ονομάζεται spectral efficiency ή φασματική απόδοση, μετριέται σε bps/Hz, και τέθηκαν στόχοι τόσο για το σύνολο του κελιού όσο και για τις περιοχές στα όριά του. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ιδανικές συνθήκες και με ανάθεση όλων των

διαθέσιμων πόρων στον υπό εξέταση σύνδεσμο, το σύστημα οφείλει να υποστηρίζει φασματική απόδοση της τάξης των 15 bps/Hz στο downlink και 6.75 bps/Hz στο uplink.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε και στη μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση ώστε να διευκολυνθούν διαδραστικές εφαρμογές και άλλες υπηρεσίες για τις οποίες η καθυστέρηση είναι κρίσιμης σημασίας. Συγκεκριμένα, για μετάβαση από κατάσταση αδράνειας σε κατάσταση σύνδεσης η μέγιστη καθυστέρηση ορίστηκε στα 100 ms, ενώ αντίστοιχα για μετάβαση από κατάσταση αναμονής σε ενεργή κατάσταση στα 10 ms.

Οι απαιτήσεις για κάλυψη δικτύου, συγχρονισμό δικτύου καθώς και διαχείριση των πόρων συχνοτήτων ακολουθούν τις απαιτήσεις του LTE (Έκδοση 8). Έμφαση δόθηκε και στη συμβατότητα των τερματικών, αφού κρίθηκε απαραίτητο ένα τερματικό έκδοσης 8 ή έκδοσης 10 να λειτουργεί απροβλημάτιστα και ανεξάρτητα από το αν το περιβάλλον είναι LTE ή LTE-A. Το ίδιο σημαντικό είναι και η αρμονική συνύπαρξη μεταξύ των συστημάτων, δηλαδή η λειτουργία LTE και LTE-A στο ίδιο φάσμα, όπως και η ύπαρξη συστημάτων GSM EDGE Radio Access Network (GERAN)/UTRA/e-UTRA σε γειτονικά κανάλια. Η ευελιξία χρήσης φάσματος του LTE ισχύει και για το LTE-A με την προσθήκη της δυνατότητας χρήσης φάσματος μεγαλύτερου των 20MHz μέσω της συνάθροισης φορέων (carrier aggregation). Κατά αυτόν τον τρόπο, το μέγιστο φάσμα που μπορεί να ανατεθεί σε ένα μοναδικό χρήστη γίνεται πλέον 100 MHz.

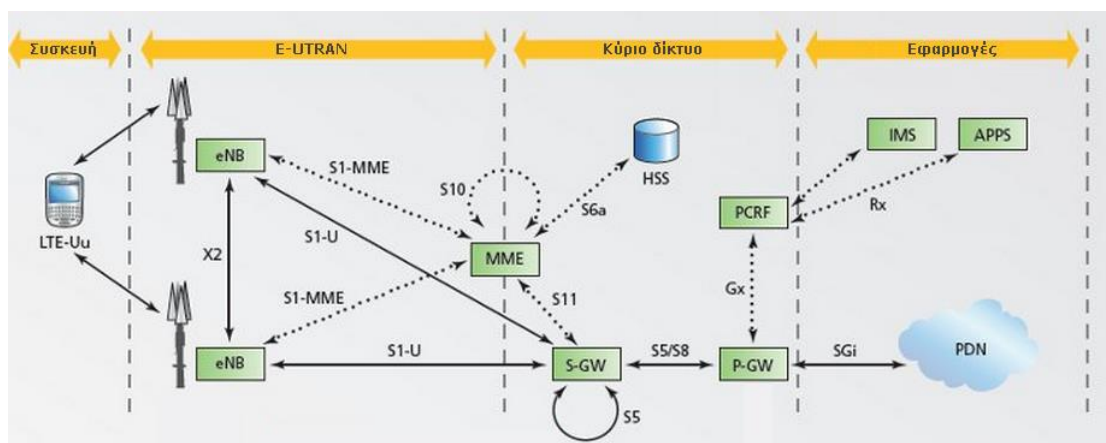
### **3.3 Αρχιτεκτονική**

Σε αντίθεση με τα δίκτυα που βασίζονται στο μοντέλο μεταγωγής κυκλώματος, το LTE σχεδιάστηκε να υποστηρίζει αποκλειστικά υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Κύρια μέριμνα είναι να παρέχει στο χρήστη αδιάλειπτη IP σύνδεση, μεταξύ του χρήστη και του δικτύου πακέτου δεδομένων (Packet Data Network ή PDN).

Παράλληλα με την ανάπτυξη του εξελιγμένου δικτύου ασύρματης πρόσβασης UMTS για το LTE μέσω του e-UTRAN, πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητες διεργασίες με στόχο την εξέλιξη και του κύριου δικτύου, έργο που πήρε την ονομασία System Architecture Evolution (SAE). Η εξέλιξη του κύριου δικτύου οδήγησε στη δημιουργία του δικτύου EPC [11]. Ο συνδυασμός LTE και SAE ονομάζεται Evolved Packet System (EPS).

Η IP κίνηση ανάμεσα σε μια πύλη (gateway) του PDN και της συσκευής χρήστη, εκφράζεται μέσω της έννοιας του EPS ασύρματου φορέα μετάδοσης (EPS bearer). Ένα bearer είναι μια ροή πακέτων IP μεταξύ της πύλης και της συσκευής χρήστη με καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας. Το EPC και το e-UTRAN μαζί διευθετούν και απελευθερώνουν bearers όταν απαιτείται από τις εφαρμογές.

Το EPS παρέχει στον χρήστη συνδεσιμότητα σε ένα PDN για πρόσβαση στο Internet, αλλά και για υπηρεσίες όπως Voice over IP (VoIP), με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Επίσης παρέχει ασφάλεια και ιδιωτικότητα για το χρήστη αλλά και προστασία του ίδιου του δικτύου από κακόβουλη χρήση.



Εικόνα 7. Η αρχιτεκτονική του EPS.

Η Εικόνα 7 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συνολικού δικτύου μαζί με τα ξεχωριστά στοιχεία του και τις προτυποποιημένες διεπαφές. Αν και κάθε στοιχείο και η διασύνδεσή του με τα άλλα έχουν καθοριστεί σαφώς μέσω προτυποποίησης, η φυσική υλοποίηση επαφίεται στην κρίση του διαχειριστή του δικτύου, όπως και η δυνατότητα συγχώνευσης στοιχείων.

Όσον αφορά τα βασικά συστατικά της αρχιτεκτονικής, όπως φαίνονται και στην Εικόνα 7, είναι τα εξής: η συσκευή χρήστη, το e-UTRAN και το κύριο δίκτυο ενώ εκτός του δικτύου υπάρχει και το πεδίο των εφαρμογών.

### 3.3.1 Συσκευή χρήστη

Ο όρος συσκευή χρήστη (user equipment ή UE) θα λέγαμε ότι ταυτίζεται με την έννοια της φορητής συσκευής. Για παράδειγμα, συσκευή χρήστη μπορεί να αποτελέσει ένα κινητό τηλέφωνο, μία συσκευή Personal Digital Assistant (PDA) ή ένας φορητός υπολογιστής. Η συσκευή χρήστη συνδέεται με το e-UTRAN μέσω της διεπαφής LTE-Uu, η οποία είναι βασισμένη στην τεχνολογία OFDM. Μία συσκευή χρήστη μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα με περισσότερα του ενός κελιού.

### 3.3.2 e-UTRAN

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE e-UTRAN αποτελείται αποκλειστικά από ένα δίκτυο από eNodeBs. Σε κανονική χρήση (δηλαδή όχι σε πολυεκπομπή/πανεκπομπή), δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής. Αντίθετα τα eNodeBs συντονίζονται μεταξύ τους επικοινωνώντας μέσω της διεπαφής X2. Για το λόγο αυτό η αρχιτεκτονική του e-UTRAN θεωρείται επίπεδη. Με το EPC επικοινωνούν μέσω της διεπαφής S1, και συγκεκριμένα με το S1-MME για τη σύνδεση με τη μονάδα Mobility Management Entity (MME) και με το S1-U για τη σύνδεση με το Serving Gateway (S-GW).

Το e-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις σχετικές με την ασύρματη μετάδοση λειτουργίες. Αυτές χωρίζονται σε:

- Radio resource management (RRM): με τον όρο αυτό ονομάζουμε όλες τις λειτουργίες σχετικά με τα bearers, όπως ο έλεγχός τους, ο χρονοπρογραμματισμός και η δυναμική ανάθεση πόρων στις συσκευές των χρηστών.

- **Header Compression:** Η συγκεκριμένη λειτουργία εξυπηρετεί στην αποδοτική χρήση της ασύρματης διεπαφής μέσω της συμπίεσης των κεφαλίδων των IP πακέτων, που ειδιάλλως θα αποτελούσαν εξαιρετική επιβάρυνση, ειδικά για μικρού μεγέθους πακέτα.
- **Ασφάλεια:** Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου, όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται μέσω της ασύρματης διεπαφής είναι κρυπτογραφημένα.
- **Συνδεσιμότητα με το EPC:** η συγκεκριμένη λειτουργία αναφέρεται στη σηματοδότηση για τη σύνδεση με τη μονάδα MME και τη S-GW.

Από την πλευρά του δικτύου, αυτές οι λειτουργίες γίνονται αποκλειστικά στα eNodeBs, καθένα από τα οποία μπορεί να είναι υπεύθυνο για πολλαπλά κελιά. Σε αντίθεση με προηγούμενες τεχνολογίες, στο LTE το eNodeB περιλαμβάνει το ραδιοελεγκτή. Αυτό επιτρέπει τη στενή διασύνδεση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση. Η κατανομημένη φύση του ελέγχου που προκύπτει, εξαλείφει την ανάγκη για απαιτητικούς ελεγκτές, μειώνοντας σημαντικά και το κόστος. Συνέπεια της έλλειψης κεντρικού ελεγκτή, είναι πως στην περίπτωση που ο χρήστης μετακινηθεί, το δίκτυο πρέπει να μεταφέρει όλη τη σχετική πληροφορία στο αντίστοιχο eNodeB. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της διεπαφής X2.

Την ίδια στιγμή, ένα eNodeB μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλαπλά MME/S-GWs. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος πως αντί για την ανάθεση ενός MME/S-GW σε ένα eNodeB, αποφασίστηκε ένα σύνολο MME/S-GWs να ανατίθεται για την εξυπηρέτηση μιας κοινής περιοχής. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στις κινητές συσκευές σε ένα ή περισσότερα κελιά που ελέγχονται από ένα eNodeB, να μοιράζονται μεταξύ πολλαπλών μονάδων κύριου δικτύου, με στόχο την κατανομή φόρτου, και την ευρωστία του συστήματος απέναντι σε ενδεχόμενη αστοχία των μονάδων του κύριου δικτύου. Η αναγκαία πληροφορία για τις συσκευές χρήστη παραμένει στην ίδια MME για όσο διάστημα ο χρήστης παραμένει στην περιοχή αυτή.

### 3.3.3 Κύριο δίκτυο

Το κύριο δίκτυο συνδέει το δίκτυο LTE με δίκτυα δεδομένων PDNs όπως το Internet. Συνοπτικά, είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο των κινητών συσκευών και την εγκαθίδρυση των bearers. Οι βασικές λογικές μονάδες του EPC είναι οι παρακάτω:

- **PDN Gateway (P-GW):** Η μονάδα P-GW είναι υπεύθυνη για την ανάθεση διεύθυνσης IP στους χρήστες και για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας. Εξυπηρετεί επίσης ως το συνδετικός κρίκος για λειτουργίες με μη 3GPP τεχνολογίες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα CDMA2000 και WiMAX.
- **Serving Gateway (S-GW):** Όλα τα πακέτα IP μεταφέρονται διαμέσου της S-GW, λειτουργώντας ως ο τοπικός συνδετικός κρίκος για τους bearers όταν ο χρήστης μετακινείται μεταξύ των eNodeB. Επίσης, διατηρεί τις πληροφορίες για τους



bearers όταν το τερματικό είναι σε αδρανή κατάσταση (idle) και προσωρινά αποθηκεύει τα δεδομένα στο downlink όσο η μονάδα MME κάνει τη σελιδοποίηση (paging) των κινητών συσκευών. Πέραν των παραπάνω, η μονάδα S-GW εκτελεί λειτουργίες όπως παραδείγματος χάριν η συλλογή πληροφοριών για την χρέωση. Τέλος, χρησιμοποιείται ως συνδετικός κρίκος για λειτουργίες με άλλες 3GPP τεχνολογίες όπως το GPRS και το UMTS.

- **Mobility Management Entity (MME):** Πρόκειται για τη μονάδα που ελεγχεται τη σηματοδότηση μεταξύ της συσκευής χρήστη και του κύριου δικτύου.
- **Home Subscriber Server (HSS):** Η μονάδα αυτή περιέχει τα στοιχεία των συνδρομητών, όπως τα προφίλ ποιότητας υπηρεσίας και τους περιορισμούς πρόσβασης. Διατηρεί επίσης πληροφορίες σχετικά με τα PDNs που επιχειρεί να συνδεθεί ο χρήστης, όπως και πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα της μονάδας MME που εξυπηρετεί εκείνη τη στιγμή το χρήστη.
- **Policy Control and Charging Rules Function (PCRF):** Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για τις αποφάσεις σχετικά με τον έλεγχο των πολιτικών, όπως και για τον έλεγχο των λειτουργιών χρέωσης. Παρέχει την εξουσιοδότηση για την ποιότητα υπηρεσίας, κρίνει πως θα αντιμετωπιστεί μια ροή δεδομένων και αν κάτι τέτοιο είναι ευθυγραμμισμένο με το προφίλ συνδρομής του χρήστη.

### 3.3.4 Άλλα συστατικά

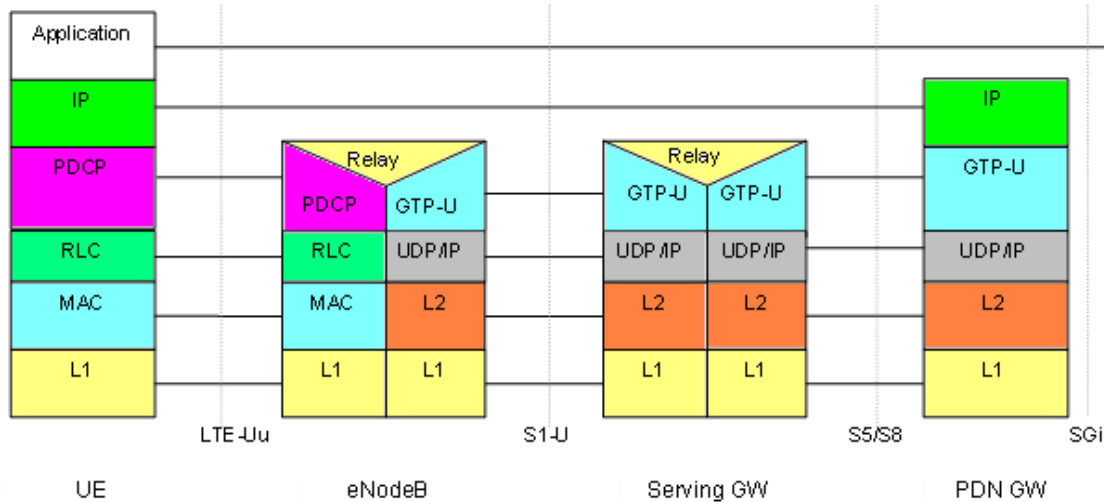
Πέραν των παραπάνω λειτουργικών μονάδων, υπάρχει και η μονάδα IP Multimedia Subsystem (IMS) με αρμοδιότητα τον έλεγχο πολυμεσικών εφαρμογών όπως VoIP. Όμως η συγκεκριμένη μονάδα δε θεωρείται μέρος του EPS.

## 3.4 Αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων

### 3.4.1 Επίπεδο χρήστη

Ένα IP πακέτο για ένα χρήστη ενθυλακώνεται σε ένα συγκεκριμένο EPC πρωτόκολλο και μεταφέρεται από την πύλη P-GW προς το eNodeB για μετάδοση στο χρήστη. Διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές διεπαφές. Πάνω από τις διεπαφές S1 και S5/S8 του δικτύου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο GPRS Tunneling Protocol (GTP) [12].

Η στοίβα πρωτοκόλλων του LTE στο επίπεδο χρήστη απεικονίζεται στην Εικόνα 8, και αποτελείται από τα Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) και Medium Access Control (MAC) υποστρώματα που τερματίζουν στο eNodeB από την πλευρά του δικτύου.

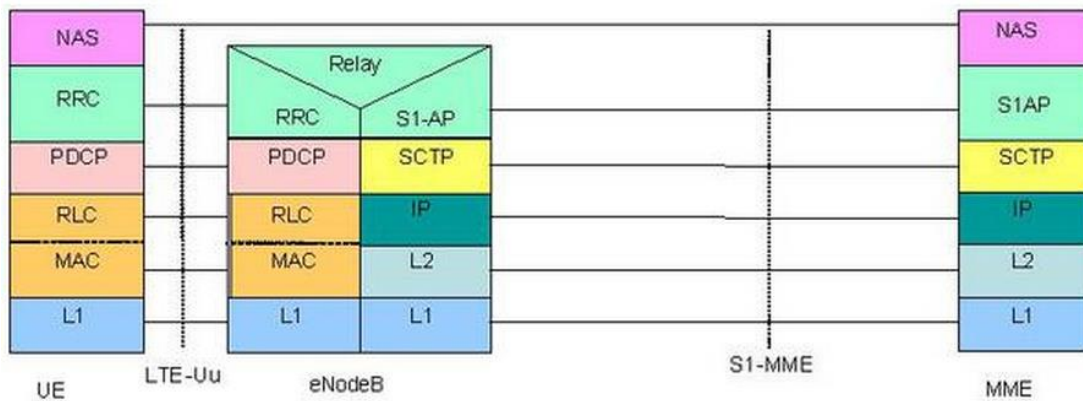


Εικόνα 8. Η στοίβα πρωτοκόλλων στο επίπεδο χρήστη.

### 3.4.2 Επίπεδο ελέγχου

Στο επίπεδο ελέγχου, η στοίβα πρωτοκόλλων μεταξύ της συσκευής χρήστη (UE) και της μονάδας MME απεικονίζεται στην Εικόνα 9. Τα κατώτερα στρώματα έχουν τις ίδιες λειτουργίες με τα αντίστοιχα του επιπέδου χρήστη, με την εξαίρεση πως στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει λειτουργία συμπίεσης κεφαλίδων.

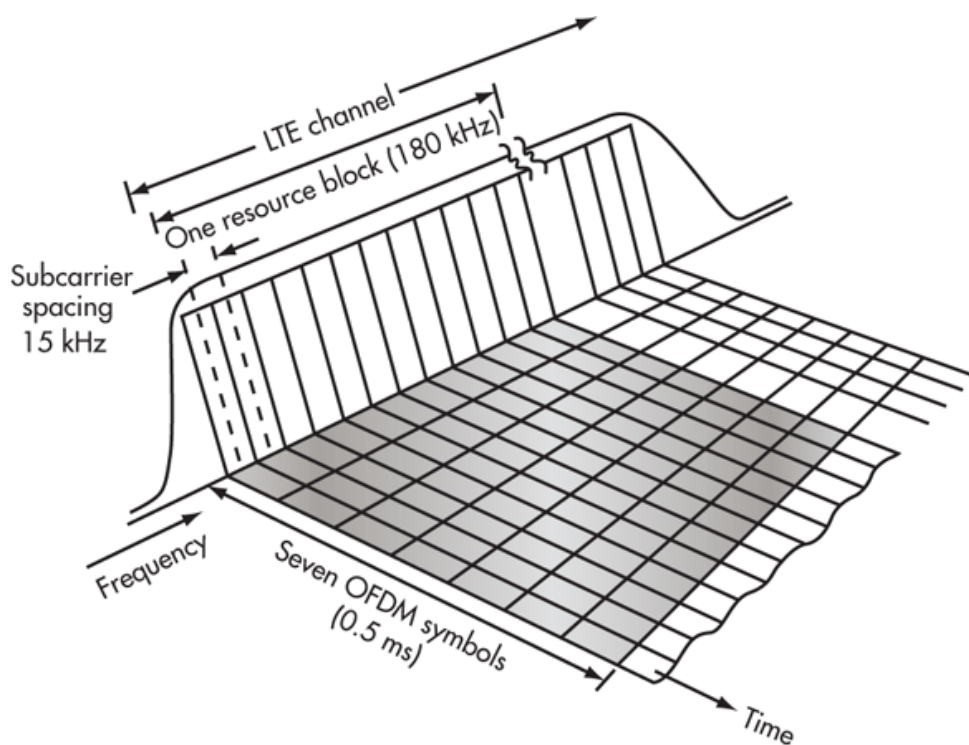
Το πρωτόκολλο Radio Resource Control (RRC) είναι γνωστό ως “layer 3” στη στοίβα πρωτοκόλλων. Αποτελεί την κύρια λειτουργία ελέγχου, όντας υπεύθυνο για την εγκατάσταση των bearers, και ρυθμίζοντας όλα τα κατώτερα στρώματα χρησιμοποιώντας σηματοδοσία μεταξύ του eNodeB και της συσκευής χρήστη.



Εικόνα 9. Η στοίβα πρωτοκόλλων στο επίπεδο ελέγχου.

## 3.5 Τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης

Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDM για το downlink. Αυτό σημαίνει πως ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα στο τερματικό μέσω πολλαπλών φορέων μικρού εύρους, αντί της μεταφοράς μέσω ενός μοναδικού σήματος που καλύπτει το σύνολο του εύρους ζώνης. Οι φορείς αυτοί ονομάζονται υποφέρουσες (subcarriers) και είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, ούτως ώστε είτε ξεχωριστά είτε ως γκρουπ να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές δεδομένων.



**Εικόνα 10. Ένα resource block στο OFDMA.**

Η τεχνολογία OFDMA επεκτείνει την τεχνολογία OFDM ώστε να παράγει ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Οι υποφέρουσες ομαδοποιούνται σε resource blocks (12 subcarriers). Τα resource blocks έχουν μέγεθος 180 KHz στο πεδίο της συχνότητας και 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου (Εικόνα 10). Σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας αριθμός από resource blocks. Όσο περισσότερα resource blocks/χρήστη και όσο ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης υιοθετηθεί, τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται. Την ανάθεση των resource blocks στους χρήστες στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αναλαμβάνει ένα σύνολο μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού. Στο LTE-A, ο διαθέσιμος αριθμός των resource blocks έχει προτυποποιηθεί και εξαρτάται από το διαθέσιμο φάσμα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα του OFDMA είναι τα παρακάτω:

- Διευκολύνει τη δυνατότητα λειτουργίας του LTE σε διαφορετικά διαθέσιμα εύρη φάσματος, μέσω της προσαρμογής του αριθμού των υποφερουσών, απλοποιώντας την ανάπτυξη και υλοποίηση των τερματικών.
- Παρέχει υψηλή φασματική απόδοση, δεδομένου ότι οι υποφέρουσες είναι ορθογώνιες μεταξύ τους και επομένως μπορούν να ομαδοποιηθούν κοντά μεταξύ τους (διάστημα 15KHz μεταξύ υποφερουσών).
- Επιτρέπει την κάλυψη του δικτύου με ενιαία συχνότητα (Single Frequency Network coverage), γεγονός που μπορεί να μετατρέψει μία περιοχή προβληματικής κάλυψης σε περιοχή άριστης κάλυψης.
- Παρέχει μεγάλη ευρωστία απέναντι σε φαινόμενα πολυδιάδευσης.
- Διευκολύνει την υλοποίηση τεχνικών MIMO.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν καταστήσει την τεχνολογία OFDM/OFDMA εξαιρετικά δημοφιλή, με αποτέλεσμα η τελευταία να έχει υιοθετηθεί από πλήθος σύγχρονων δικτύων, μεταξύ των οποίων και το δεύτερο κυρίαρχο σύστημα τέταρτης γενιάς, το mobile WiMAX.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία OFDM/OFDMA έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα που δεν είναι άλλο από το υψηλό Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR απαιτεί αφενός ακριβούς και μη αποδοτικούς ενισχυτές ισχύος, και αφετέρου απαιτεί τερματικά υψηλού κόστους και με μικρό σχετικά χρόνο ζωής της μπαταρίας. Η τεχνολογία SC-FDMA χρησιμοποιείται από τα δίκτυα LTE-A στο uplink για να λύσει αυτό το πρόβλημα μειώνοντας την κατανάλωση ισχύος. Το χαμηλό PAPR βελτιώνει επίσης την κάλυψη και την απόδοση στην άκρη του κελιού.

### 3.6 Μεταδόσεις MIMO

Η ασύρματη μετάδοση παρουσιάζει απώλειες στην ποιότητα του σήματος λόγω των διαλείψεων που δημιουργούνται από την πολυδιάδοση (multipath) του μέσου διάδοσης και των παρεμβολών από άλλους χρήστες. Μια ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και χωρητικότητα στο LTE-A είναι γνωστή ως Multiple Input Multiple Output (ή πιο απλά MIMO). Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό-σταθμό βάσης όσο και στο δέκτη-συσκευή του χρήστη. Για την περίπτωση του LTE, σε πρώτη φάση η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραιές στο σταθμό βάσης και δύο κεραιές στη συσκευή του χρήστη) θεωρείται απαραίτητο στοιχείο για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Σε μεταγενέστερη φάση ανάπτυξης είναι δυνατόν να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4, ακόμα και 8x8 [13].

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν εξομοιώσεις για 3 διαφορετικές περιπτώσεις MIMO μεταδόσεων, οι οποίες και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

#### 3.6.1 Η περίπτωση Single Input Single Output (SISO)

Ο όρος SISO, όπως εφαρμόζεται στις ασύρματες τεχνολογίες, αναφέρεται στην τεχνολογία κεραιών, που χρησιμοποιεί μία μόνο κεραιά τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και στον δέκτη. Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11. Παράδειγμα συστήματος SISO.

Τα συστήματα SISO είναι η πιο απλή τεχνολογία κεραιών. Επειδή όμως οι μονές συχνότητες είναι ευάλωτες στα φαινόμενα space limit και frequency fading

(εξασθένιση) τα συστήματα αυτά μερικές φορές αντιμετωπίζουν προβλήματα από φαινόμενα πολλαπλής διάδοσης του σήματος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταδίδονται, διασκορπίζονται όταν αντιμετωπίζουν εμπόδια στην διαδρομή τους (όπως κτίρια, λόφους, κτλ). Στις περιπτώσεις αυτές, τα διασκορπισμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ακολουθούν πολλές διαφορετικές διαδρομές για να φτάσουν στον προορισμό τους. Το γεγονός αυτό όμως προκαλεί προβλήματα εξασθένισης. Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών αυτό συνεπάγεται τη μείωση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και την αύξηση του αριθμού σφαλμάτων.

### 3.6.2 Η περίπτωση Multiple Input Single Output (MISO)

Ο όρος MISO αναφέρεται στην τεχνολογία έξυπνων κεραιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στον πομπό και μια μόνο κεραιά στην πλευρά του δέκτη με στόχο να βελτιωθεί η ταχύτητα μετάδοσης και να μειωθούν τα προβλήματα που προκαλούνται από το φαινόμενο της πολυδιάδοσης του σήματος. Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ένα τέτοιο σύστημα. Ειδικότερα στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η περίπτωση ενός MISO συστήματος 2x1.



Εικόνα 12. Παράδειγμα συστήματος MISO.

### 3.6.3 Η περίπτωση Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Ο όρος MIMO είναι η ασύρματη τεχνολογία κεραιών που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές τόσο στην πλευρά του πομπού όσο και στην πλευρά του δέκτη και σε γενικές γραμμές μπορεί να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ρυθμιαπόδοση σε σχέση με τα απλά, SISO συστήματα. Ένα παράδειγμα MIMO συστήματος φαίνεται στην Εικόνα 13.

Η τεχνολογία MIMO εκμεταλλεύεται ουσιαστικά το φαινόμενο της πολυδιάδοσης (multipath), κατά το οποίο ένα σήμα από τον πομπό μέσω ανακλάσεων φτάνει σε πολλαπλά αντίγραφα στον δέκτη. Η χρήση πολλαπλών κεραιών δίνει τη δυνατότητα συλλογής και οργάνωσης των επιμέρους σημάτων, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος.

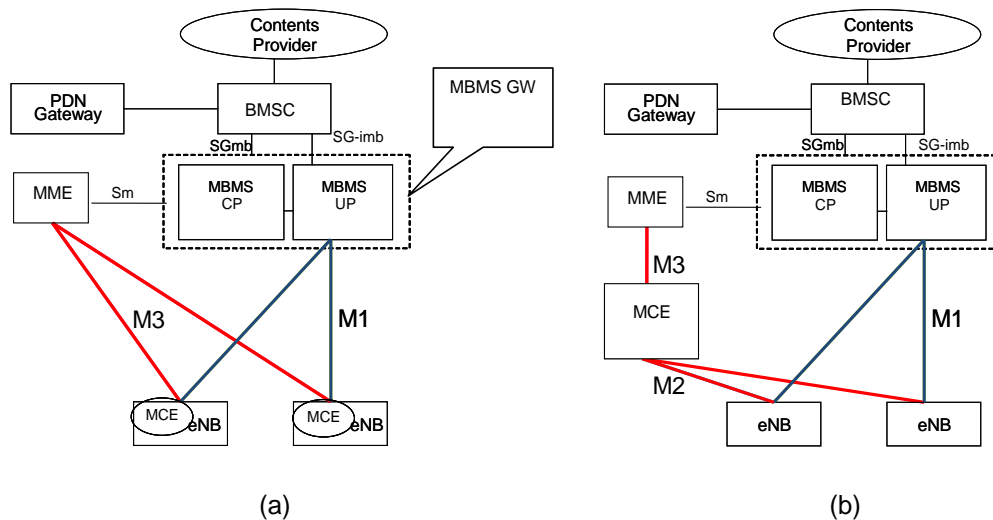


Εικόνα 13. Παράδειγμα συστήματος MIMO.

### 3.7 Η υπηρεσία MBSFN

Το 3GPP εισήγαγε αρχικά το MBMS ως μία τεχνολογία μέσω της οποίας θα μπορούσε να μεταδώσει δεδομένα πολυεκπομπής (multicast) και πανεκπομπής (broadcast) στους 3G UMTS χρήστες [14], [15], [16]. Το MBMS παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία από άλλα συστήματα πανεκπομπής, όπως παραδείγματος χάριν το Digital Video Broadcasting - Handheld (DVB-H), επειδή περιλαμβάνει ένα κανάλι επιστροφής και επομένως είναι σε θέση να αποστέλλει πληροφορίες είτε προς μια ομάδα χρηστών (πολυεκπομπή) είτε προς όλους τους χρήστες ενός κελιού (πανεκπομπή).

Στο πλαίσιο των LTE-A συστημάτων, το MBMS έχει εξελιχθεί στο e-MBMS (όπου το «e» αναφέρεται στο evolved, δηλαδή εξελιγμένο). Το e-MBMS στοχεύει στην παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής και πανεκπομπής, συνδυάζοντας ευελιξία και υψηλή αποδοτικότητα από την άποψη χρησιμοποίησης του φάσματος και εξασφαλίζοντας βελτιωμένη απόδοση συγκριτικά με το DVB-H. Τα παραπάνω καθίστανται δυνατά μέσω της βελτιωμένης απόδοσης της ασύρματης διεπαφής, η οποία περιλαμβάνει ένα νέο σχέδιο μετάδοσης, το αποκαλούμενο MBMS over Single Frequency Network (MBSFN), με το οποίο το e-MBMS θα είναι σε θέση να μεταδώσει το ίδιο σήμα σε συγχρονισμένα γειτονικά κελιά.



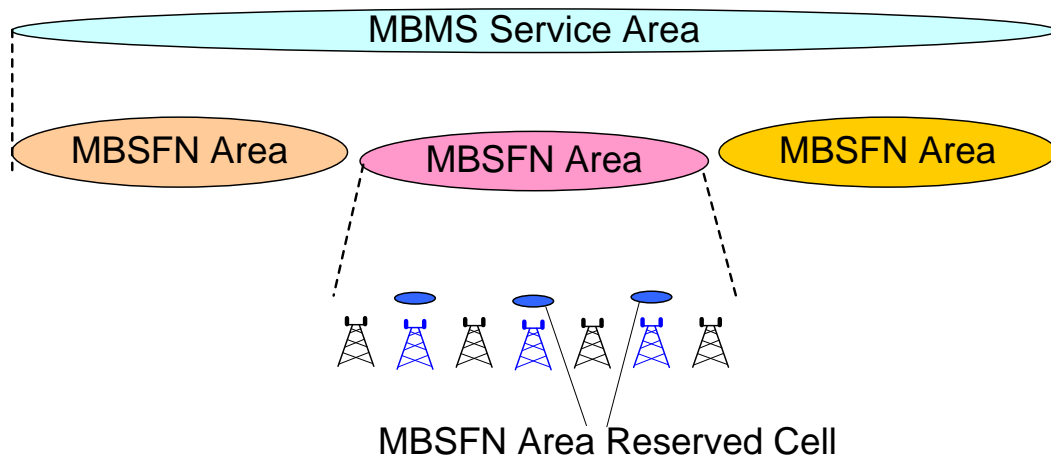
Εικόνα 14. Εναλλακτικές μορφές αρχιτεκτονικής του e-MBMS.

Εκτός από τις σημαντικές βελτιώσεις στην ασύρματη διεπαφή, το e-MBMS προβλέπει και μία σχετικά απλή αρχιτεκτονική. Οι εναλλακτικές προτεινόμενες μορφές της αρχιτεκτονικής του e-MBMS παρουσιάζονται στην Εικόνα 14. Ο κόμβος e-BM-SC αποτελεί τον υπεύθυνο κόμβο για την εισαγωγή του πολυμεσικού περιεχομένου στο δίκτυο. Το e-MBMS GW αποτελεί τη «ρίζα» του δέντρου διανομής για το πολυμεσικό περιεχόμενο και χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων προς τους χρήστες μέσω του e-UTRAN. Στο e-UTRAN, οι σταθμοί βάσης συλλέγουν τις πληροφορίες που πρέπει να μεταδώσουν στους χρήστες μέσω της ασύρματης διεπαφής. Ο κόμβος Multi-cell/multicast Coordination Entity (MCE) είναι νέος κόμβος που απαιτείται για το συντονισμό της μετάδοσης των συγχρονισμένων σημάτων που εκπέμπονται από διαφορετικά κελιά. Παράλληλα, ο κόμβος MCE

αποφασίζει για τις λεπτομέρειες της διαμόρφωσης, όπως π.χ. το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 14, το e-MBMS GW χωρίζεται σε δύο επίπεδα: το επίπεδο ελέγχου (control plane - CP) και το επίπεδο χρήστη (user plane - UP). Επιπρόσθετα, έχουν καθοριστεί δύο διακριτές διεπαφές μεταξύ του e-MBMS GW και του e-UTRAN. Η διεπαφή M1, η οποία θα εκμεταλλεύεται το IP multicast για τη διανομή του πολυμεσικού περιεχομένου και προορίζεται για το επίπεδο χρήστη και η διεπαφή M3 η οποία προορίζεται για το επίπεδο ελέγχου. Αναφέρουμε στο σημείο αυτό πως για την αρχιτεκτονική του e-MBMS έχουν προταθεί δύο εναλλακτικές μορφές, όπως άλλωστε παρουσιάζεται στην Εικόνα 14. Στην πρώτη μορφή (Εικόνα 14a) ο κόμβος MCE εντοπίζεται εντός του eNodeB, ενώ μια άλλη λύση που εξετάζεται από το 3GPP είναι η τοποθέτηση του MCE εκτός του eNodeB (Εικόνα 14b). Στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται μία πρόσθετη διεπαφή (η M2) μεταξύ των κόμβων MCE και eNodeB.

Ειδικότερα, για το e-MBMS, εισάγονται οι ακόλουθοι ορισμοί (βλ. Εικόνα 15) [17]:

- **Περιοχή MBSFN Συγχρονισμού (MBSFN Synchronization Area):** Μία περιοχή του δικτύου όπου όλα τα eNodeBs μπορούν να είναι συγχρονισμένα και να εκτελούν MBSFN μεταδόσεις. Οι Περιοχές MBSFN Συγχρονισμού μπορούν να υποστηρίξουν μία ή περισσότερες MBSFN Περιοχές. Κάθε eNodeB μπορεί να ανήκει σε μία μόνο Περιοχή MBSFN Συγχρονισμού.
- **MBSFN Μετάδοση (MBSFN Transmission):** Μία τεχνική μετάδοσης που πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη μετάδοση παρόμοιων κυματομορφών σε πολλαπλά κελιά. Ο χρήστης αντιλαμβάνεται μία MBSFN Μετάδοση από πολλαπλά κελιά της ίδιας MBSFN Περιοχής ως μία μετάδοση.
- **MBSFN Περιοχή (MBSFN Area):** Μία MBSFN Περιοχή αποτελείται από μία ομάδα κελιών μέσα σε μία Περιοχή MBSFN Συγχρονισμού, οι οποίες συντονίζονται για να επιτύχουν μια MBSFN Μετάδοση. Όλα τα κελιά που ανήκουν σε μία MBSFN Περιοχή, εκτός από τα Εφεδρικά Κελιά MBSFN Περιοχής, συμβάλλουν στην MBSFN Μετάδοση και διαφημίζουν τη διαθεσιμότητά της. Ένα κελί σε μια Περιοχή MBSFN Συγχρονισμού ανήκει μόνο σε μια MBSFN Περιοχή για όλες τις e-MBMS υπηρεσίες.



**Εικόνα 15. Ορισμοί στο e-MBMS.**

- MBSFN Area Reserved Cell (Εφεδρικό Κελί MBSFN Περιοχής): Ένα κελί μέσα σε μια MBSFN Περιοχή που δεν συμβάλλει στην MBSFN Μετάδοση. Το κελί αυτό επιτρέπεται να μεταδώσει άλλες υπηρεσίες αλλά χωρίς να χρησιμοποιεί τους πόρους που έχουν διατεθεί για την MBSFN Μετάδοση.





## 4 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η απόδοση του MBSFN έχει εξεταστεί διεξοδικά σε προηγούμενες ερευνητικές εργασίες. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές, χαρακτηριστικές εκ των οποίων είναι οι εργασίες [18], [19] και [20], συγκρίνουν την απόδοση του MBSFN με τις συμβατικές Point-to-Point (PTP) και Point-to-Multipoint (PTM) μεταδόσεις, στις οποίες τα δεδομένα αποστέλλονται σε κάθε κελί ξεχωριστά με τη χρήση PTP ή PTM καναλιών μεταφοράς αντίστοιχα. Επιπλέον, οι εργασίες αυτές δεν λαμβάνουν υπόψη την προσαρμογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, η οποία μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη λειτουργία του MBSFN.

Τεχνικές μετάδοσης, οι οποίες δεν προσαρμόζονται στην εξασθένιση του καναλιού απαιτούν μία σταθερή κωδικοποίηση για να έχουν αποδεκτή απόδοση σε μεγάλες εξασθενίσεις. Οι τεχνικές αυτές σχεδιάζονται ώστε να είναι αποτελεσματικές ακόμα και όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι πολύ άσχημες, με αποτέλεσμα ωστόσο την ανεπαρκή χρησιμοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού [21]. Για την καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας του καναλιού, πολλές εργασίες έχουν προτείνει την τεχνική Adaptive Modulation and Coding (AMC) κατά την οποία το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης προσαρμόζεται ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Μάλιστα, στις συνθήκες εξασθένισης, η τεχνική αυτή έχει αποδειχτεί πολύ πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη μη προσαρμοστική διαμόρφωση [22].

Τέλος, αρκετές είναι οι εργασίες που έχουν δείξει ότι η φασματική απόδοση συνδέεται άμεσα με το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επιλέγεται για τη μετάδοση των δεδομένων. Ορισμένες από τις πιο χαρακτηριστικές είναι οι εργασίες [23], [24], [25], [26] και [27]. Επίσης, στην εργασία [28] οι συγγραφείς προτείνουν μια προσέγγιση η οποία επιλέγει το χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις που επιτρέπει στο 95% των χρηστών να επιτύχουν μία προκαθορισμένη φασματική απόδοση. Ωστόσο, η εστίαση μόνο στην πλευρά των χρηστών μπορεί να μην είναι επαρκής. Μερικές φορές ο στόχος του παρόχου μπορεί να είναι η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος ή η παροχή της υπηρεσίας σε όλους τους χρήστες ανεξάρτητα από τις συνθήκες του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, στην εργασία [29] προτείνεται μία προσέγγιση προσαρμοζόμενου σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που βασίζεται στο feedback από τους χρήστες. Με την προσέγγιση αυτή, σύμφωνα με τα

αποτελέσματα της εργασίας, επιτυγχάνεται η βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Τέλος, στην εργασία [30], αναπτύσσονται και εξετάζονται διάφορες αποτελεσματικές μέθοδοι επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που βασίζονται στη χρήση του Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) με κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του downlink. Ωστόσο, καμία από τις παραπάνω εργασίες δεν επικεντρώνεται στις MBSFN μεταδόσεις και επιπλέον, δεν εξετάζει τον αντίκτυπο των τεχνικών MIMO στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επεκτείνει και συμπληρώνει τις παραπάνω εργασίες, προτείνοντας τρεις προσεγγίσεις επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις, κάθε μία από τις οποίες είναι σε θέση να επιτύχει διαφορετικό στόχο όσον αφορά τη φασματική απόδοση. Παράλληλα, κάθε μία προσέγγιση εξετάζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους MIMO μετάδοσης ώστε να εξεταστεί η βελτίωση που μπορούν να προσφέρουν οι τεχνικές πολλαπλών κεραιών.



## 5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Με βάση τη σχετική βιβλιογραφία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει άμεση εξάρτηση μεταξύ της φασματικής απόδοσης και του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων. Μάλιστα, το καταλληλότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη μετάδοση επιλέγεται σύμφωνα με το λόγο του σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (SINR) του παραλήπτη της MBSFN πληροφορίας, ώστε να ικανοποιείται ένας συγκεκριμένος στόχος για το ρυθμό σφαλμάτων block (Block Error Rate - BLER) των MBSFN μεταδόσεων [31]. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εστιάζουμε σε μία δυναμική τοπολογία χρηστών, με τους χρήστες να κατανέμονται τυχαία στην MBSFN περιοχή, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικά SINR. Βασιζόμενοι στα διαφορετικά SINR που έχουν οι χρήστες μιας MBSFN περιοχής, στόχος μας είναι να επιλέξουμε το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης με το οποίο ο σταθμός βάσης πρέπει να μεταδίδει τα MBSFN δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, θεωρούμε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, όπου σε κάθε προσέγγιση έχει τεθεί διαφορετικός στόχος για τη φασματική απόδοση. Οι τρεις αυτές προσεγγίσεις είναι οι εξής:

- 1<sup>η</sup> προσέγγιση: Η προσέγγιση αυτή επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης το οποίο διασφαλίζει ότι ακόμα και οι χρήστες με το χαμηλότερο SINR θα λαμβάνουν την MBSFN υπηρεσία (προσέγγιση εξασφαλισμένης παροχής υπηρεσίας).
- 2<sup>η</sup> προσέγγιση: Η δεύτερη προσέγγιση επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης το οποίο διασφαλίζει τη μέγιστη μέση φασματική απόδοση για όλους τους χρήστες μιας τοπολογίας (προσέγγιση μεγιστοποίησης φασματικής απόδοσης).
- 3<sup>η</sup> προσέγγιση: Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης το οποίο επιτυγχάνει ένα προκαθορισμένο στόχο όσον αφορά τη φασματική απόδοση (προσέγγιση προκαθορισμένης φασματικής απόδοσης).

## 5.1 Επιλογή σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και υπολογισμός SINR για ένα χρήστη

Για την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και τον υπολογισμό της φασματικής απόδοσης στην περίπτωση του ενός χρήστη, ακολουθείται η διαδικασία που αναλύεται στη συνέχεια και η οποία αποτελείται από τα εξής 3 διακριτά βήματα: (α) τον υπολογισμό του SINR, (β) την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και (γ) την εκτίμηση της ρυθμαπόδοσης και της φασματικής απόδοσης που επιτυγχάνονται.

### 5.1.1 Βήμα 1: Υπολογισμός SINR

Υποθέτουμε ότι η MBSFN περιοχή που μελετάμε αποτελείται από  $N$  κελιά. Κατά τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων σε ένα μόνο χρήστη, λόγω του φαινομένου της πολλαπλής διόδευσης (multipath) φτάνουν σε αυτόν σήματα από τα  $N$  κελιά μέσω  $M$  διαφορετικών μονοπατιών. Συνεπώς, το SINR στο σημείο που βρίσκεται ο χρήστης ισούται με:

$$SINR(m) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{w(\tau_i(m) + \delta_j) P_j}{q_i(m)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(1 - w(\tau_i(m) + \delta_j)) P_j}{q_i(m)} + N_o} \quad (1)$$

όπου

$$w(\tau) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tau < T_{CP} \\ 1 - \frac{\tau - T_{CP}}{T_u} & T_{CP} \leq \tau < T_{CP} + T_u \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, το  $P_j$  είναι η μέση ισχύς που σχετίζεται με την  $j$ -οστή διαδρομή,  $\tau_i(m)$  η καθυστέρηση διάδοσης από το σταθμό βάσης  $i$ ,  $\delta_j$  είναι η επιπρόσθετη καθυστέρηση που εισάγει το μονοπάτι  $j$ ,  $q_i(m)$  είναι η απώλεια ισχύος από το σταθμό βάσης  $i$ ,  $T_{cp}$  είναι το μήκος του cyclic prefix και  $T_u$  είναι το μήκος του χρήσιμου πλαισίου.

### 5.1.2 Βήμα 2: Επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης

Για να επιλεγεί το σχήμα διαμόρφωσης για τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων σε ένα χρήστη πρέπει αρχικά το SINR να χαρτογραφηθεί στους διαθέσιμους Δείκτες Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Indicators - CQI) [32].

Τα 15 διαφορετικά σετ για τα CQI και τα αντίστοιχα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2. Τα διαθέσιμα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.**

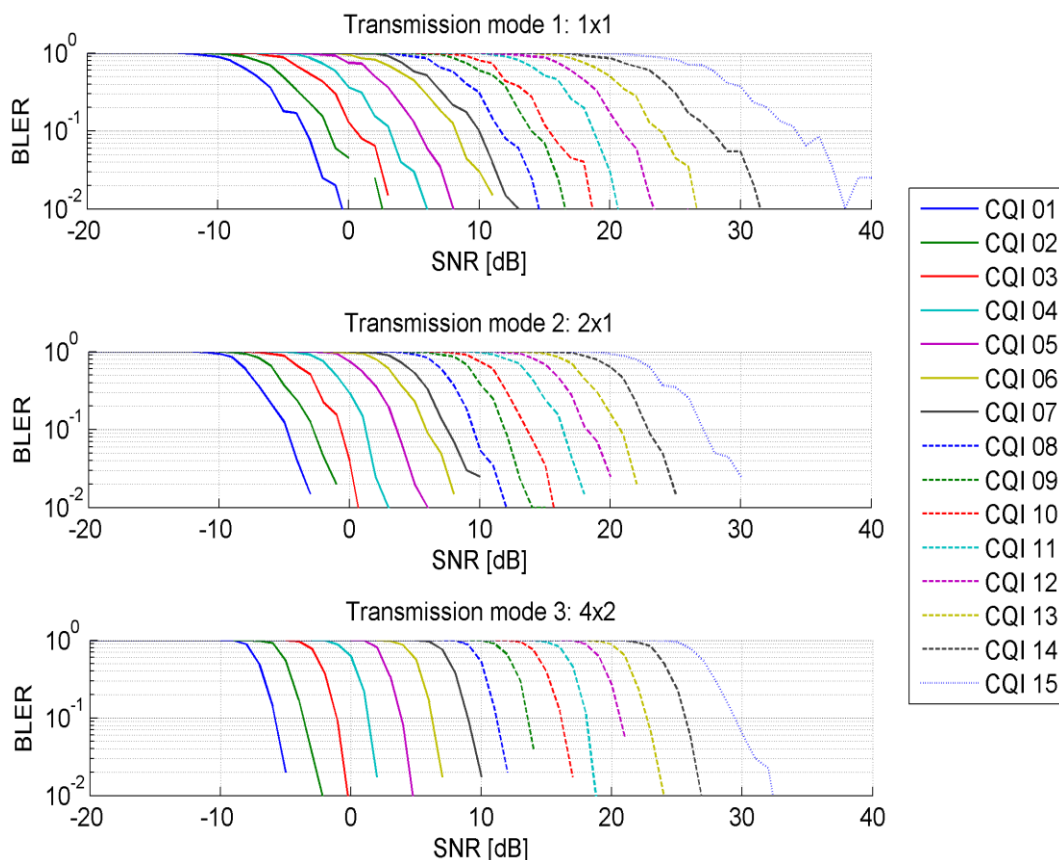
Δείκτης CQI	Κωδικοποίηση	code rate x 1024	Απόδοση
0	Εκτός εμβέλειας		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

Γενικότερα, όταν υπάρχουν καλές συνθήκες στο κανάλι, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, όπως το 64 - Quadrature Amplitude Modulation (QAM) το οποίο ελαχιστοποιεί την πλεονάζουσα πληροφορία κατά τη μετάδοση. Ωστόσο, εάν το κανάλι υποφέρει από κακές συνθήκες, θα πρέπει να επιλεγεί ένα χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης, όπως το Quadrature Phase Shift Keying (QPSK). Με το QPSK αποστέλλονται περισσότερα bits προκειμένου να αυξηθεί η πιθανότητα να ληφθούν σωστά τα δεδομένα. Η επιλογή του ιδανικού σχήματος διαμόρφωσης έχει μεγάλο αντίκτυπο στη συνολική απόδοση. Όταν το ποσοστό απώλειας πακέτων είναι πολύ χαμηλό, τότε είτε χρησιμοποιείται υψηλό σχήμα διαμόρφωσης είτε χρησιμοποιούνται πολλά πλεονάζοντα bits. Αυτό ωστόσο οδηγεί στη μείωση του μεγέθους του μπλοκ μετάδοσης με αποτέλεσμα να μειώνεται τελικά η απόδοση. Επιπλέον, αν το πακέτο μετάδοσης είναι μεγάλο, τότε αυξάνεται το ποσοστό σφαλμάτων των πακέτων γεγονός που και πάλι οδηγεί σε μειωμένη απόδοση. Επομένως, για την ιδανική επιλογή είναι απαραίτητο ο σταθμός βάσης να ενημερώνεται για την ποιότητα του καναλιού που βιώνει ο χρήστης. Αυτό γίνεται μέσω των CQIs, που αποστέλλονται από το χρήστη στο uplink.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στα LTE δίκτυα το αποδεκτό BLER πρέπει να είναι μικρότερο από 10% [33], από το διάγραμμα BLER-SNR, που απεικονίζεται στην Εικόνα 16, μπορούμε να εντοπίσουμε ποια καμπύλη του SNR επιτυγχάνει το αποδεκτό BLER και χρησιμοποιώντας τη να βρεθεί το CQI που πρέπει να χρησιμοποιήσουν οι σταθμοί βάσης.

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην Εικόνα 16 έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας το link level simulator που περιγράφεται στην εργασία [33], υποθέτοντας ότι το εύρος ζώνης του δικτύου είναι ίσο με 5.0 MHz. Σκοπός μας όμως είναι να εξετάσουμε και τον αντίκτυπο της χρήσης τεχνικών πολλαπλών κεραιών στην επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Έτσι, στην Εικόνα 16 κάθε ένα διάγραμμα αναφέρεται σε διαφορετικό τρόπο μετάδοσης. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι τρεις ακόλουθοι τρόποι μετάδοσης:

- Τρόπος μετάδοσης 1: Μετάδοση 1x1. Αντιστοιχεί στις Single Input Single Output (SISO) μεταδόσεις όπου ο πομπός και ο δέκτης έχουν από μία κεραία ο καθένας.
- Τρόπος μετάδοσης 2: Μετάδοση 2x1. Αποτελεί τις Multiple Input Single Output (MISO) μεταδόσεις όπου ο πομπός έχει 2 κεραιές και ο δέκτης μία.
- Τρόπος μετάδοσης 3: Μετάδοση 4x2. Πρόκειται για τις Multiple Input Multiple Output (MIMO) μεταδόσεις όπου έχουμε τέσσερις κεραιές εκπομπής στο σταθμό βάσης και 2 κεραιές λήψης στην κινητή συσκευή.



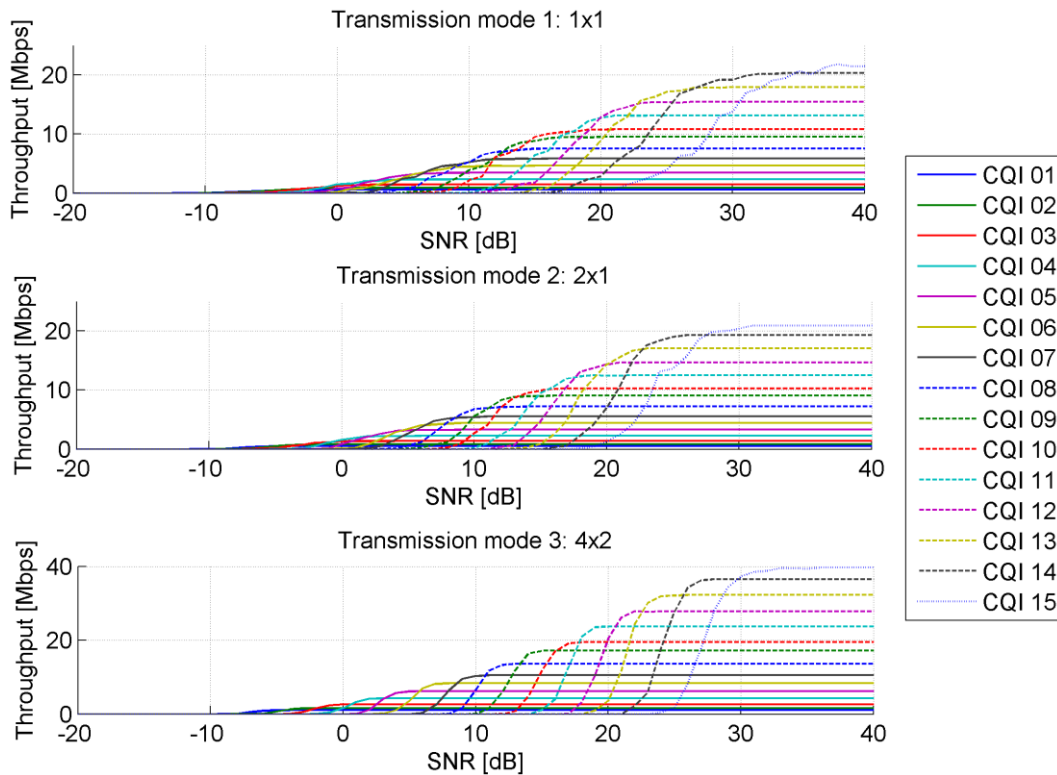
**Εικόνα 16. Καμπύλες SNR-BLER για τους τρεις τρόπους μετάδοσης.**

### 5.1.3 Βήμα 3: Εκτίμηση ρυθμαπόδοσης

Για την εκτίμηση της ρυθμαπόδοσης που επιτυγχάνεται για το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επιλέχθηκε χρησιμοποιείται η εξίσωση (3), στην οποία το  $BW$  είναι το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος,  $e(SINR)$  είναι το effective code rate του επιλεγμένου σχήματος κωδικοποίησης, και  $BLER(SINR)$  το block error rate:

$$Throughput = BW \cdot e(SINR) \cdot (1 - BLER(SINR)) \quad (3)$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας το SINR και το σχήμα διαμόρφωσης που έχουν υπολογιστεί από τα βήματα 1 και 2 αντίστοιχα, μπορεί να βρεθεί η συνολική ρυθμαπόδοση. Στην Εικόνα 17 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της ρυθμαπόδοσης που επιτυγχάνεται και του SINR για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης και για τους τρεις τρόπους μετάδοσης που εξετάζονται.



**Εικόνα 17. Ρυθμαπόδοση (throughput) για όλα τα CQIs και για όλους τους τρόπους μετάδοσης.**

Μετά τον υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης, μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί και η φασματική απόδοση καθενός σχήματος διαμόρφωσης, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση που βασίζεται στον ορισμό της φασματικής απόδοσης:

$$SE = \frac{Throughput}{BW} \quad (4)$$

## 5.2 Προτεινόμενοι μηχανισμοί

Η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και ο υπολογισμός της φασματικής απόδοσης στην περίπτωση πολλαπλών χρηστών προκύπτει από τη προσέγγιση για ένα χρήστη που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1. Σε αυτή τη παράγραφο θα εξετάσουμε τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τη μετάδοση μιας MBSFN υπηρεσίας σε περισσότερους του ενός χρήστες.

### 5.2.1 1<sup>η</sup> προσέγγιση - εξασφαλισμένη παροχή υπηρεσίας

Η πρώτη προσέγγιση διασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες, ακόμα και αυτοί που έχουν πολύ χαμηλό SINR, θα λαμβάνουν την MBSFN υπηρεσία. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος ο αλγόριθμος βρίσκει το μικρότερο SINR, και επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που αντιστοιχεί στο μικρότερο SINR σύμφωνα με το βήμα 2 της παραγράφου 5.1.2. Στη συνέχεια, από την εξίσωση (3) ή την Εικόνα 17 υπολογίζεται η αντίστοιχη μέση ρυθμαπόδοση και φασματική απόδοση. Η συγκεκριμένη προσέγγιση εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες της MBSFN περιοχής θα λαμβάνουν την υπηρεσία ανεξάρτητα από τις συνθήκες SINR που βιώνουν. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου προκύπτει από το γεγονός ότι το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης καθορίζεται από το χρήστη με το χαμηλότερο SINR, με αποτέλεσμα οι χρήστες με μεγαλύτερο SINR (που οι συνθήκες τους επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουν υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης εξασφαλίζοντας ακόμα μεγαλύτερη ρυθμαπόδοση) να δεσμεύονται σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στον παρακάτω αλγόριθμο με τη μορφή ψευδοκώδικα.

#### Αλγόριθμος 1. 1<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.

---

##### Algorithm of the 1<sup>st</sup> Approach

---

```

1: Define MBSFN topology
2: for i = 1:total_users           % SINR calculation for all users
3:   Calculate SINR(i)
4: end
5: min_SINR = min(SINR)         % find the lowest SINR among all users
6: % choose the MCS that corresponds to the minimum SINR
7: selected_MCS =  $f_{MCS}$ (min_SINR)
8: % calculate the throughput for the selected MCS
9: throughput =  $f_{throughput}$ (selected_MCS, min_SINR)
10: Calculate SE                 % spectral efficiency calculation

```

---



### 5.2.2 2<sup>η</sup> προσέγγιση - μεγιστοποίηση φασματικής απόδοσης

Η δεύτερη προσέγγιση επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης το οποίο εγγυάται τη μέγιστη μέση ρυθμαπόδοση, και κατ' επέκταση μέγιστη φασματική απόδοση, για όλους τους χρήστες της MBSFN περιοχής. Αρχικά ο αλγόριθμος υπολογίζει τις τιμές του SINR για κάθε χρήστη κάνοντας χρήση της εξίσωσης (1). Εν συνεχεία ο αλγόριθμος διατρέχει όλα τα σχήματα διαμόρφωσης που φαίνονται στην Εικόνα 17. Για κάθε σχήμα υπολογίζει τη ρυθμαπόδοση ανά χρήστη, ανάλογα με τα υπολογισμένα SINRs και καταλήγει στη μέση ρυθμαπόδοση και συνολική φασματική απόδοση. Από όλα τα σχήματα διαμόρφωσης, επιλέγεται τελικά αυτό που διασφαλίζει τη μέγιστη μέση ρυθμαπόδοση και άρα τη μέγιστη φασματική απόδοση. Ο ψευδοκώδικας της συγκεκριμένης προσέγγισης παρουσιάζεται στον παρακάτω αλγόριθμο:

#### Αλγόριθμος 2. 2<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.

---

#### Algorithm of the 2<sup>nd</sup> Approach

---

```

1: Define MBSFN topology
2: for i = 1:total_users           % SINR calculation for all users
3:   Calculate SINR(i)
4: end
5: % for each MCS calculate the average throughput and SE
6: for MCS = 1:15
7:   for j = 1:total_users
8:     throughput(MCS, j) =  $f_{throughput}(MCS, SINR(j))$ 
9:   end
10:  avg_throughput(MCS) = average(throughput(MCS, :))
11:  Calculate SE(MCS)
12: end
13: % find the max spectral efficiency that can be achieved and select
14: % the corresponding MCS
15: SE = max(SE(:))

```

---

### 5.2.3 3<sup>η</sup> προσέγγιση - προκαθορισμένη φασματική απόδοση

Ο στόχος της τρίτης προσέγγισης είναι η εύρεση ενός σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που να μπορεί να επιτύχει μία προκαθορισμένη φασματική απόδοση (η οποία συνήθως επιλέγεται να είναι ίση με 1 bps/Hz) για μία MBSFN περιοχή. Η λειτουργία αυτής της προσέγγισης είναι παρόμοια με αυτή της δεύτερης προσέγγισης, με τη μόνη διαφορά ότι ο αλγόριθμος δεν διατρέχει απαραίτητα όλα τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Αναλυτικά, ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει την τιμή του SINR για κάθε χρήστη. Στη συνέχεια, διατρέχει τα σχήματα

διαμόρφωσης ξεκινώντας από το μικρότερο και υπολογίζει για το κάθε ένα τη ρυθμαπόδοση ανά χρήστη, τη μέση ρυθμαπόδοση και τη συνολική φασματική απόδοση. Αν κατά την διάρκεια του «σκαναρίσματος» των σχημάτων διαμόρφωσης βρεθεί ένα σχήμα που να διασφαλίσει συνολική φασματική απόδοση ίση ή μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη, τότε η διαδικασία σταματά και ο αλγόριθμος επιλέγει για τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων το συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης, χωρίς να χρειαστεί να διατρέξει τα υπόλοιπα. Με άλλα λόγια, ο σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι να βρεθεί το χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης το οποίο κατορθώνει να επιτύχει την προκαθορισμένη συνολική φασματική απόδοση. Η διαδικασία «σκαναρίσματος» έχει επιλεγεί να ξεκινάει από το χαμηλότερο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για να μπορέσουν να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες.

### Αλγόριθμος 3. 3<sup>η</sup> προσέγγιση σε μορφή ψευδοκώδικα.

---

#### Algorithm of the 3<sup>rd</sup> Approach

---

```

1: Define MBSFN topology
2: Define target_SE
3: for i = 1:total_users           % SINR calculation for all users
4:   Calculate SINR(i)
5: end
6: % Scan the MCSs so as calculate the SE over the MBSFN area
7: for MCS = 1:15
8:   for j = 1:total_users
9:     throughput(MCS, j) =  $f_{\text{throughput}}(\text{MCS}, \text{SINR}(j))$ 
10:   end
11: avg_throughput(MCS) = average(throughput(MCS, :))
12: Calculate SE(MCS)
13: % examine if target SE is achieved
14: if SE(MCS) >= target_SE then % target is achieved
15:   break;
16: else % target is not achieved
17:   SE = max(SE(:))
18: end
19: end
20: % select the MCS that achieves the target SE or that maximizes
21: % the SE (if target SE is not achieved)
22: SE = SE(MCS)

```

---

Αν επιλεγόταν το αντίθετο και ο αλγόριθμος διέτρεχε τα σχήματα διαμόρφωσης ξεκινώντας από το μεγαλύτερο τότε η επιθυμητή φασματική απόδοση θα επιτυγχανόταν γρήγορα και χρησιμοποιώντας υψηλό σχήμα διαμόρφωσης. Κάτι τέτοιο όμως, θα επέτρεπε μόνο στους χρήστες με υψηλό SINR να λαμβάνουν την MBSFN υπηρεσία. Στην περίπτωση που η προκαθορισμένη φασματική απόδοση δεν μπορεί να επιτευχθεί, η προσέγγιση αυτή έχει παρόμοια συμπεριφορά με τη δεύτερη μέθοδο, δηλαδή επιλέγεται το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που εγγυάται τη μέγιστη φασματική απόδοση. Ο Αλγόριθμος 3 απεικονίζει την παραπάνω διαδικασία με τη μορφή ψευδοκώδικα.

### 5.3 Μελέτη απόδοσης των προτεινόμενων μηχανισμών

Αυτή η ενότητα παρέχει τα αποτελέσματα της εξομοίωσης των τριών προσεγγίσεων που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ο link level simulator που παρουσιάζεται στο [33]. Συγκεκριμένα μελετούνται τρία διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο σενάριο υποθέτει σταθερό αριθμό χρηστών (300 χρήστες) τυχαία κατανεμημένων στην MBSFN περιοχή. Το δεύτερο σενάριο ερευνά την περίπτωση μεταβλητού αριθμού χρηστών και το τρίτο εξετάζει την περίπτωση 300 χρηστών που κινούνται τυχαία στην MBSFN περιοχή. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

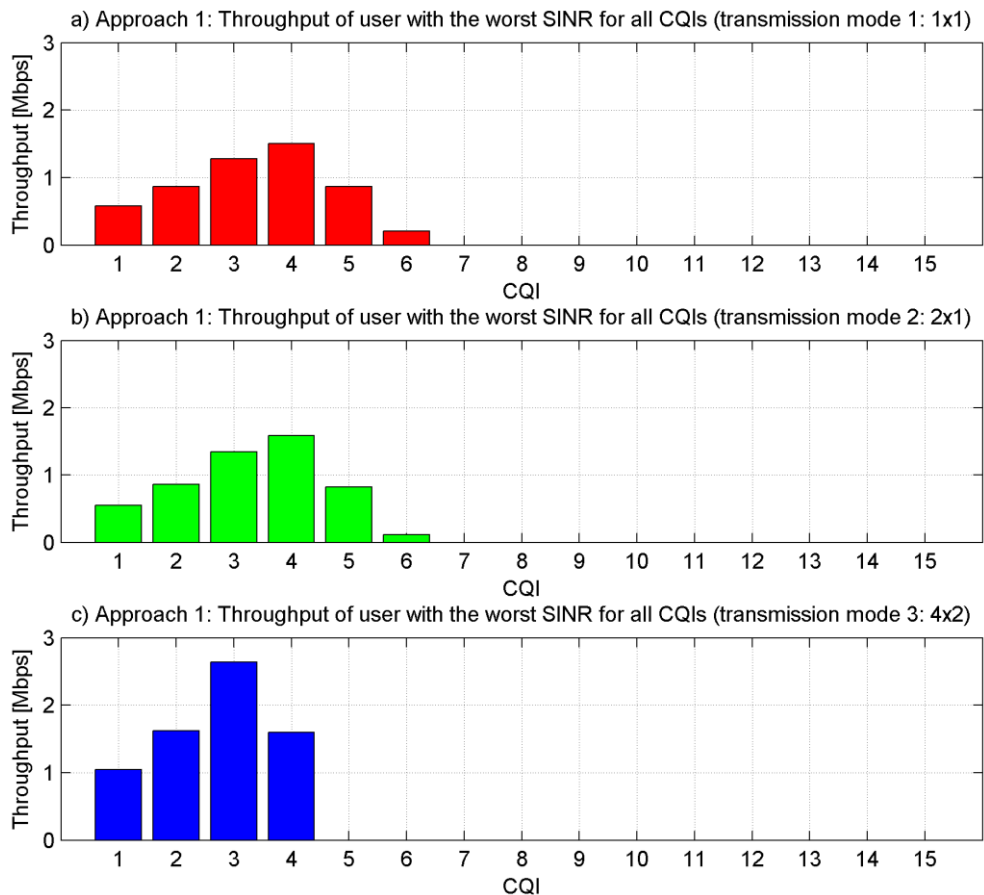
**Πίνακας 3. Παράμετροι εξομοίωσης.**

Παράμετρος	Τιμή
Διάταξη τοπολογίας	Εξαγωνικό πλέγμα με 19 κελιά
Απόσταση μεταξύ κελιών	1732 m
Συχνότητα	2.0 GHz
Εύρος ζώνης	5.0 MHz
Μοντέλο καναλιού	3GPP Typical Urban
Μοντέλο διάδοσης	Cost Hata
Cyclic prefix	16.67 μsec
Μήκος χρήσιμου πλαισίου	66.67 μsec
Τρόποι μετάδοσης	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SISO 1x1</li> <li>• MISO 2x1</li> <li>• MIMO 4x2</li> </ul>
Σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης	15 σετ (Πίνακας 2)

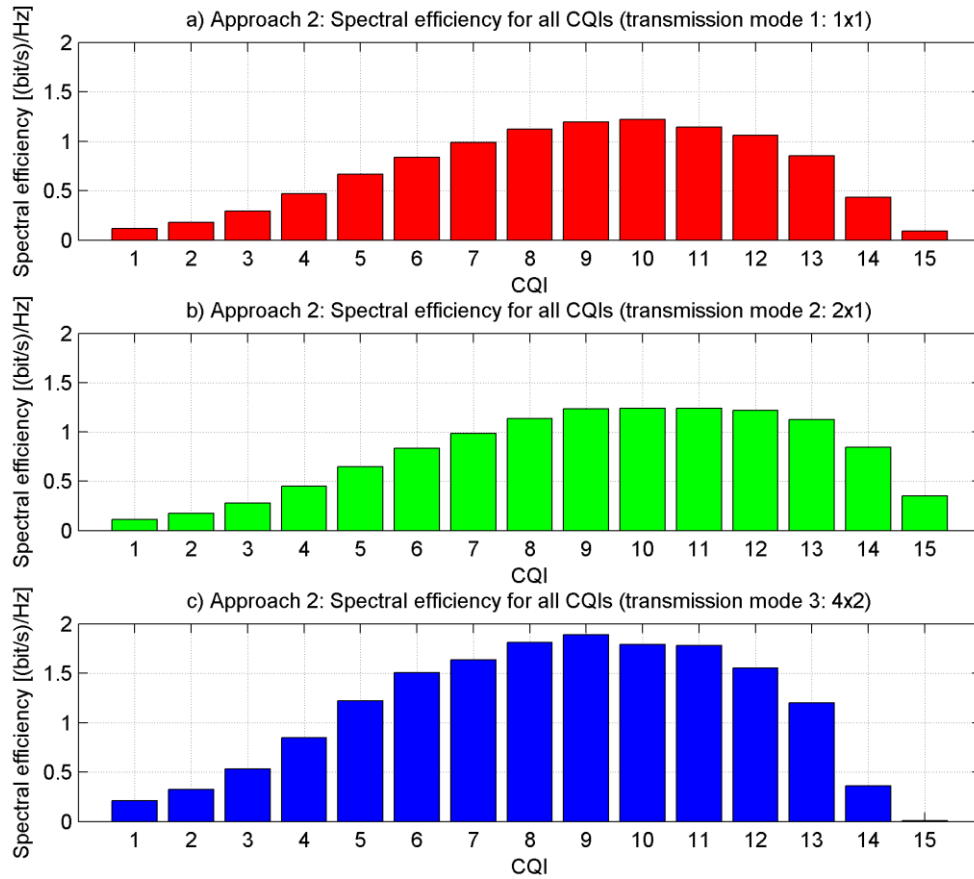
### 5.3.1 Σενάριο 1: Σταθερός αριθμός χρηστών

Αυτή η παράγραφος εξετάζει τη λειτουργία των τριών προσεγγίσεων για σταθερό αριθμό χρηστών στην περιοχή MBSFN αλλά ταυτόχρονα παραθέτει μια σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων αλλά και μεταξύ των τρόπων μετάδοσης που μελετώνται. Υπενθυμίζουμε ότι το σενάριο 1 εξετάζει την περίπτωση 300 χρηστών τυχαία κατανομημένων στην MBSFN περιοχή.

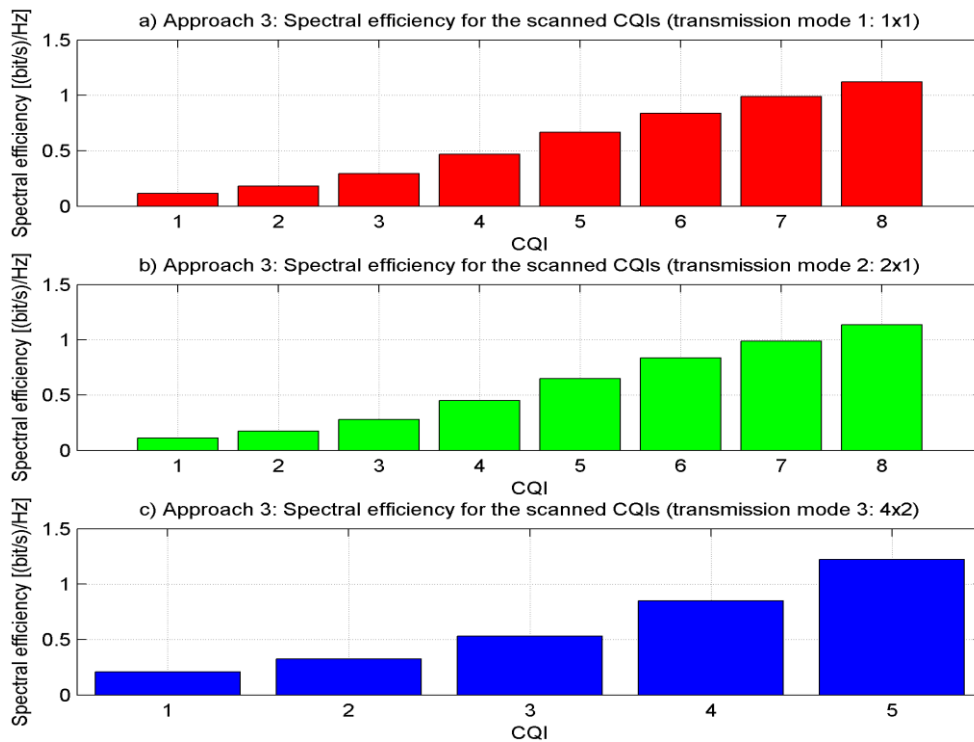
Η Εικόνα 18 δείχνει τον τρόπο με τον οποίο η πρώτη προσέγγιση επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων. Αρχικά υπολογίζει το SINR όλων των χρηστών στο κελί σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.1.1 και εντοπίζει τον χρήστη με το μικρότερο SINR, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι  $-0.204$  dB. Στη συνέχεια επιλέγει το CQI που μεγιστοποιεί τη ρυθμαπόδοση του “χειρότερου” χρήστη. Όσον αφορά τη συμπεριφορά της πρώτης προσέγγισης για τους τρεις διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 18, η μέγιστη ρυθμαπόδοση για τον τρόπο μετάδοσης 1 (SISO 1x1) επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το CQI 4 και είναι 1.505 Mbps. Χρησιμοποιώντας, το δεύτερο τρόπο μετάδοσης (MISO 2x1) παρατηρούμε ότι και πάλι το CQI που επιλέγεται είναι το CQI 4 και παρέχει λίγο υψηλότερη ρυθμαπόδοση (1.585 Mbps). Ο τρόπος μετάδοσης 3 (MIMO 4x2) οδηγεί σε σημαντικά υψηλότερη ρυθμαπόδοση, ίση με 2.635 Mbps, και στην επιλογή μικρότερου CQI, του CQI 3.



**Εικόνα 18. Ρυθμαπόδοση για όλα τα CQIs με βάση το χρήστη με το χαμηλότερο SINR και για τους 3 τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 1).**



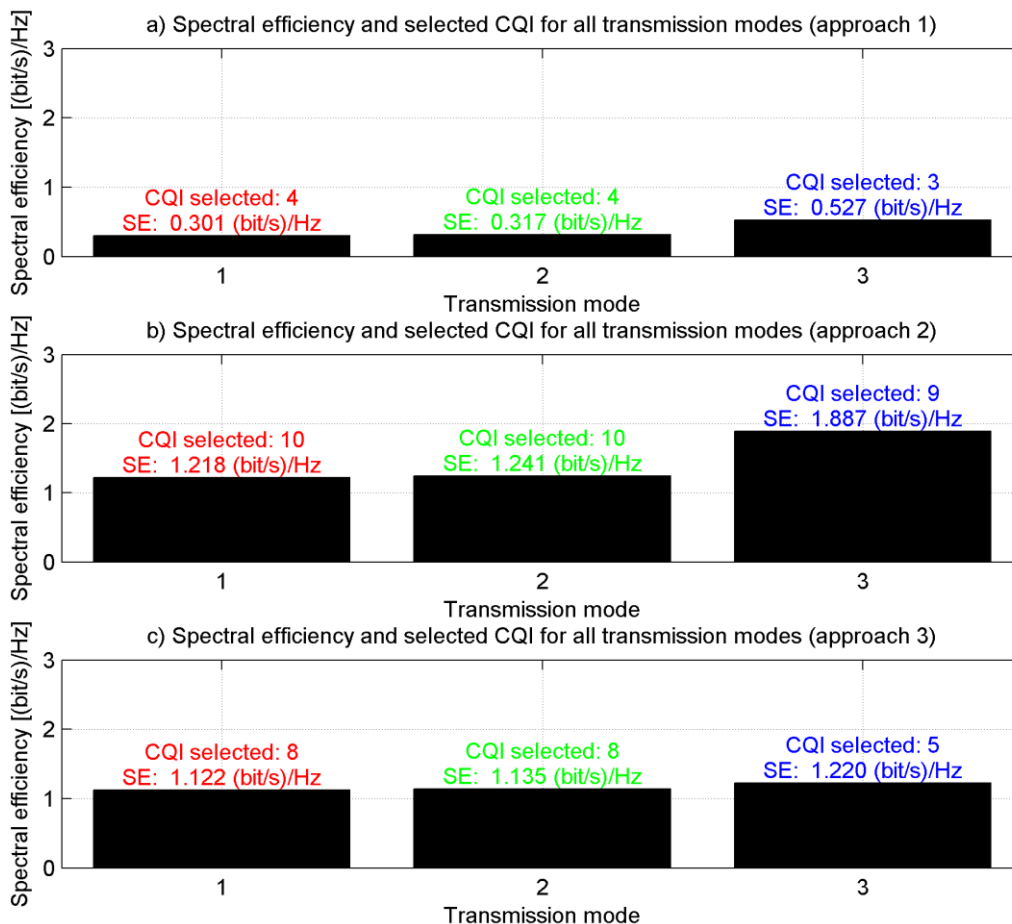
Εικόνα 19. Φασματική απόδοση για όλα τα CQIs για τους 3 τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 2).



Εικόνα 20. Φασματική απόδοση για τα διαθέσιμα CQIs για κάθε ένα από τους τρόπους μετάδοσης (προσέγγιση 3).

Συνεχίζουμε με την Εικόνα 19 η οποία απεικονίζει τη φασματική απόδοση για όλα τα CQIs όπως προκύπτει εφαρμόζοντας τη 2<sup>η</sup> προσέγγιση για κάθε έναν από τους τρεις τρόπους μετάδοσης. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η προσέγγιση αυτή επιλέγει το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που προσφέρει τη μέγιστη φασματική απόδοση αφού πρώτα διατρήξει όλα τα διαθέσιμα σχήματα. Ξεκινώντας με τον πρώτο τρόπο μετάδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 19a, το CQI που προσφέρει τη μέγιστη φασματική απόδοση (ιση με 1.218 bps/Hz) είναι το CQI 10. Το ίδιο CQI επιλέγεται και στην περίπτωση των μεταδόσεων 2x1, παρέχοντας φασματική απόδοση ίση με 1.241 bps/Hz. Τέλος, το CQI που επιλέγεται όταν εφαρμόζουμε τον τρίτο τρόπο μετάδοσης είναι το CQI 9 το οποίο παρέχει φασματική απόδοση ίση με 1.887 bps/Hz.

Τέλος η εξομοίωση της τρίτης προσέγγισης οδήγησε στην Εικόνα 20, όπου φαίνονται και οι τρεις περιπτώσεις για τους διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης που χρησιμοποιούνται. Υπενθυμίζουμε ότι ο σκοπός της προσέγγισης αυτής είναι να εντοπίσει και επιλέξει το χαμηλότερο CQI που επιτυγχάνει την προκαθορισμένη επιθυμητή φασματική απόδοση (1 bps/Hz). Για τους δύο πρώτους τρόπους μετάδοσης το χαμηλότερο CQI που επιτυγχάνει το στόχο είναι το CQI 8, ενώ για τον τρίτο τρόπο μετάδοσης επιλέγεται το CQI 5.



**Εικόνα 21. Φασματική απόδοση και επιλεγμένα CQIs για τις 3 προσεγγίσεις και για όλους τους τρόπους μετάδοσης.**

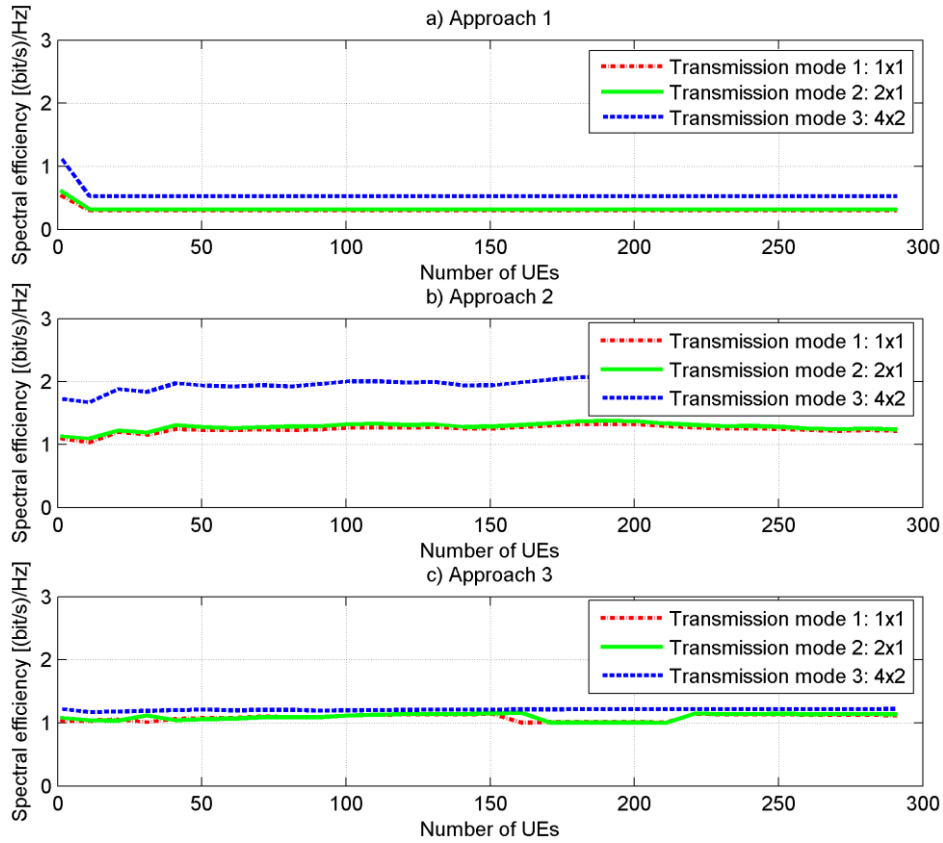
Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 21, όπου για κάθε προσέγγιση και τεχνική MIMO φαίνεται το CQI που επιλέγεται αλλά και η φασματική απόδοση που επιτυγχάνεται. Είναι φανερό ότι η πρώτη προσέγγιση επιτυγχάνει τη μικρότερη φασματική απόδοση, αφού βασίζεται στο ότι προσπαθεί να εξυπηρετήσει ακόμα και το χρήστη με το χαμηλότερο SINR. Παρά το γεγονός ότι προσφέρει χαμηλή ρυθμαπόδοση ανά χρήστη, στα θετικά της προσέγγισης αυτής είναι το γεγονός ότι εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες θα λαμβάνουν τα MBSFN δεδομένα. Στη συνέχεια παρατηρούμε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι η δεύτερη προσέγγιση παρέχει την υψηλότερη φασματική απόδοση. Όμως επιλέγει και υψηλότερο CQI για την μετάδοση της MBSFN υπηρεσίας και συνεπώς καταλήγει να ευνοεί τους χρήστες που βρίσκονται κοντά στους σταθμούς βάσης. Αντίθετα, οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια της MBSFN περιοχής δεν λαμβάνουν καθόλου τα MBSFN δεδομένα. Τέλος, η τρίτη προσέγγιση αποτελεί μια μέση λύση όπου έχουμε μια εξισορρόπηση μεταξύ της φασματικής απόδοσης και της κάλυψης του δικτύου με την επιλογή ενός ενδιάμεσου CQI.

Πρέπει ακόμα να τονίσουμε την επίδραση που έχουν οι MIMO τεχνικές στην απόδοση του συστήματος. Είναι προφανές ότι ο τρόπος μετάδοσης MIMO 4x2 όχι μόνο παρέχει μεγαλύτερες τιμές φασματικής απόδοσης εν συγκρίσει με τους άλλους δύο τρόπους, αλλά επιλέγει και μικρότερο CQI και επομένως έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει χρήστες που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους σταθμούς βάσης. Όσον αφορά τους τρόπους μετάδοσης 1 και 2 παρατηρούμε ότι και οι δύο επιλέγουν το ίδιο CQI αλλά ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιώντας δύο κεραιές εκπομπής οδηγεί σε ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές φασματικής απόδοσης.

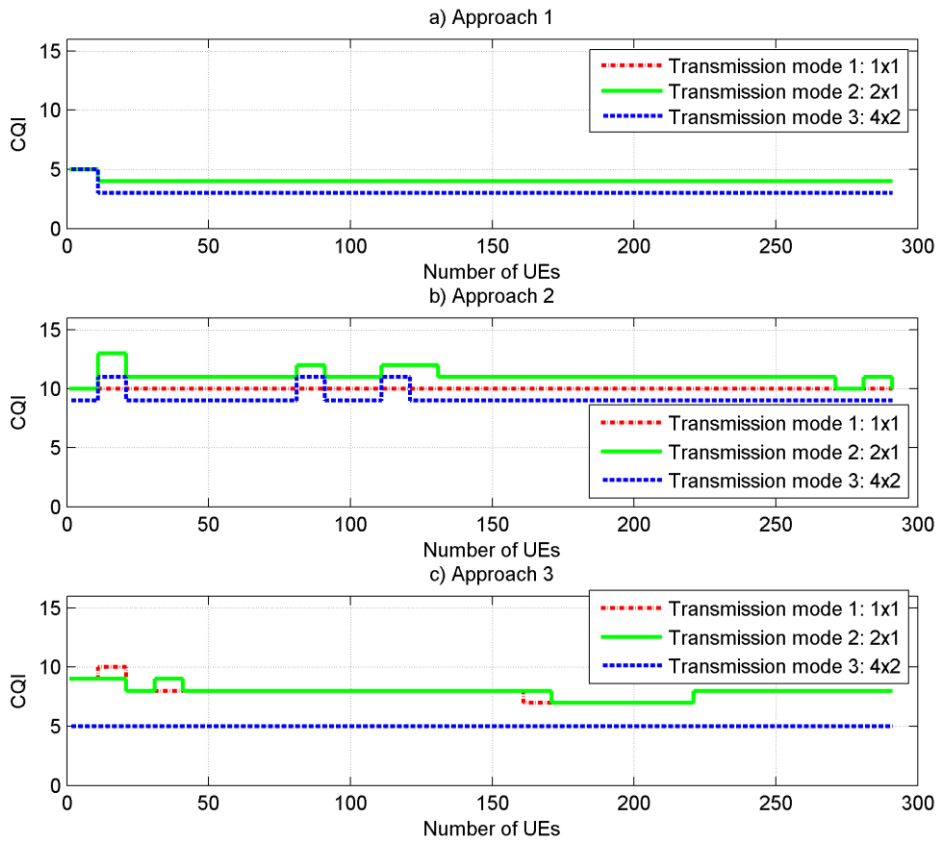
### 5.3.2 Σενάριο 2: Μεταβλητός αριθμός χρηστών

Αφού μελετήσαμε πως συμπεριφέρονται οι τρεις προσεγγίσεις για σταθερό αριθμό ακίνητων χρηστών, ας προχωρήσουμε σε αυτήν την παράγραφο, στη μελέτη της συμπεριφοράς των προσεγγίσεων όταν έχουμε μεταβλητό αριθμό χρηστών. Σύμφωνα με το πείραμα, ο αριθμός των χρηστών στην MBSFN περιοχή αυξάνεται από 0 στους 300. Στόχος είναι στην περίπτωση αυτή να συγκρίνουμε τις προσεγγίσεις όσον αφορά τη φασματική απόδοση και τα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επιλέγονται.

Η Εικόνα 22 απεικονίζει πως μεταβάλλεται η φασματική απόδοση σε σχέση με τον αριθμό των χρηστών για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι η πρώτη προσέγγιση, ανεξάρτητα από τον τρόπο μετάδοσης που χρησιμοποιείται, οδηγεί σε μία μικρή μείωση στη φασματική απόδοση όταν ακόμα ο αριθμός των χρηστών είναι μικρός. Όταν όμως ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται και άλλο η φασματική απόδοση παραμένει σταθερή (Εικόνα 22a). Επίσης, παρατηρείται ότι οι τιμές της φασματικής απόδοσης είναι χαμηλές συγκρινόμενες με τις άλλες δύο προσεγγίσεις. Αντίθετα η δεύτερη προσέγγιση οδηγεί στις υψηλότερες τιμές φασματικής απόδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22b, και ειδικά στη περίπτωση του τρίτου τρόπου μετάδοσης. Όσον αφορά την τρίτη προσέγγιση φαίνεται ότι η επιθυμητή φασματική απόδοση επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τον αριθμό των χρηστών και τον τρόπο μετάδοσης που χρησιμοποιείται.



**Εικόνα 22. Σενάριο 2: Φασματική απόδοση για όλους τους τρόπους μετάδοσης για τις 3 προσεγγίσεις.**



**Εικόνα 23. Σενάριο 2: Επιλεγμένα CQI για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.**



Συνεχίζοντας με την Εικόνα 23 βλέπουμε τα CQIs που επιλέγονται εφαρμόζοντας κάθε προσέγγιση για τους τρεις τρόπους μετάδοσης. Παρατηρώντας αρχικά την πρώτη προσέγγιση βλέπουμε ότι επιλέγει το CQI 5 για όλους τους τρόπους μετάδοσης μέχρι να εμφανιστεί στην MBSFN περιοχή ο 16<sup>ος</sup> χρήστης, οπότε και επιλέγεται μικρότερο CQI. Τότε, για τους τρόπους μετάδοσης 1 και 2 επιλέγεται το CQI 4, ενώ για τον τρίτο τρόπο το CQI 3 και αυτά τα CQIs διατηρούνται μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο 16<sup>ος</sup> χρήστης είναι ο χρήστης με τη μικρότερη τιμή SINR και επομένως είναι αυτός που καθορίζει την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Η Εικόνα 23 επιβεβαιώνει ότι η δεύτερη προσέγγιση είναι αυτή που επιλέγει και τα υψηλότερα CQIs συγκρινόμενη με τις άλλες δύο προσεγγίσεις, αφού στόχος της είναι να μεγιστοποιήσει τη φασματική απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Εν αντιθέσει με τις δύο προηγούμενες προσεγγίσεις, η τρίτη προσέγγιση παρουσιάζει πιο συχνές αλλαγές για να μπορέσει να επιτύχει την επιθυμητή φασματική απόδοση (Εικόνα 23c). Επίσης, από την Εικόνα 23b και Εικόνα 23c, γίνεται αντιληπτό ότι η εφαρμογή των προσεγγίσεων 2 και 3 οδηγεί σε διαδοχικές αλλαγές στο CQI ειδικά για τους τρόπους μετάδοσης 1 και 2. Αυτό δικαιολογεί και τις διακυμάνσεις που υπάρχουν στη τιμή της φασματικής απόδοσης στην Εικόνα 22b και Εικόνα 22c αντίστοιχα.

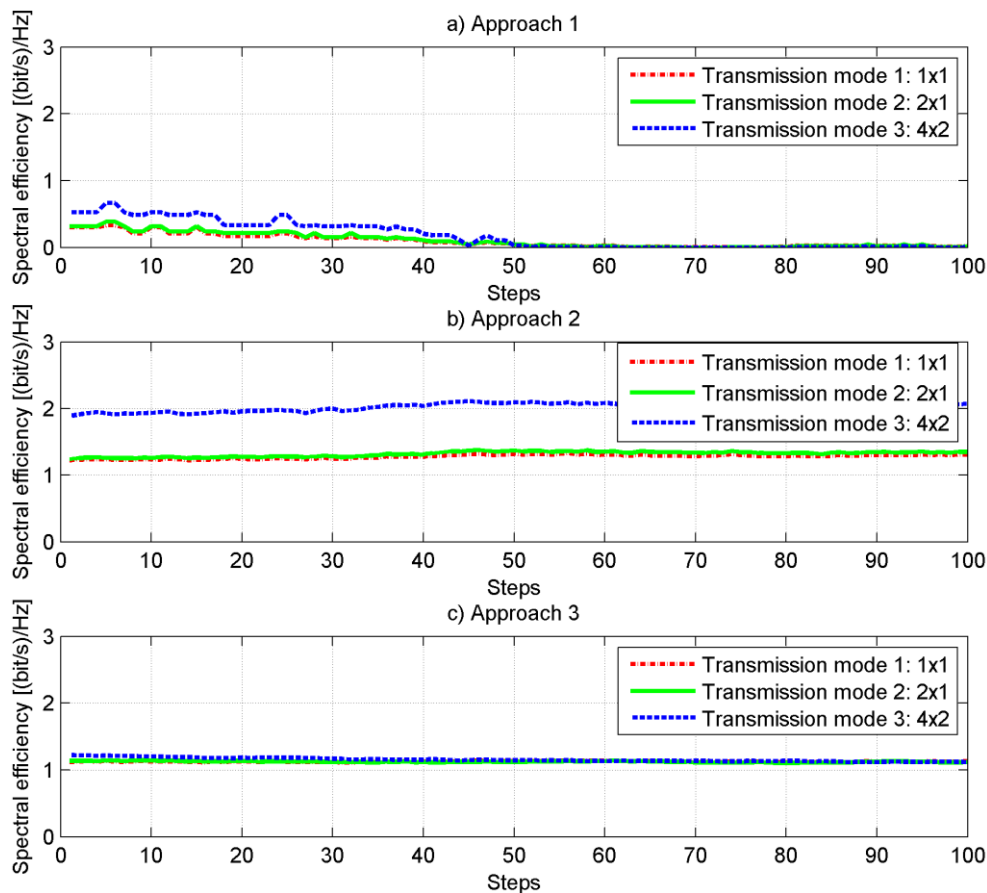
Μια ακόμα παρατήρηση που μπορεί να επισημανθεί όσον αφορά την Εικόνα 23 είναι ότι η εφαρμογή του τρόπου μετάδοσης 4x2 οδηγεί γενικά στην επιλογή χαμηλότερων CQIs σε σχέση με τους άλλους δύο τρόπους, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει η δυνατότητα να εξυπηρετηθούν χρήστες που βιώνουν κακές συνθήκες SINR. Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε ότι η χρήση τεχνικών MIMO μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος κατά τις MBSFN μεταδόσεις.

### 5.3.3 Σενάριο 3: Κινητοί χρήστες

Το τελευταίο πείραμα μελετά την απόδοση των προτεινόμενων προσεγγίσεων υποθέτοντας ένα σενάριο που περιλαμβάνει κινητούς χρήστες. Συγκεκριμένα το σενάριο υποθέτει ότι στην MBSFN περιοχή βρίσκονται 300 τυχαία κατανομημένοι χρήστες οι οποίοι κινούνται τυχαία με ταχύτητα 3 km/h (πεζοί χρήστες). Η Εικόνα 24 και η Εικόνα 25 απεικονίζουν τα αποτελέσματα τους πειράματος για τα πρώτα 100 δευτερόλεπτα (ή βήματα) της προσομοίωσης.

Ξεκινάμε από την Εικόνα 24 η οποία παρουσιάζει τις τιμές της φασματικής απόδοσης για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης. Η πρώτη προσέγγιση, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 24a, παρουσιάζει πολλές διακυμάνσεις στις τιμές της φασματικής απόδοσης αφού προσπαθεί να προσαρμοστεί στην κίνηση των χρηστών αλλά ταυτόχρονα και να εξασφαλίσει ότι ακόμα και οι χρήστες με χαμηλό SINR θα λαμβάνουν τα MBSFN δεδομένα. Για να γίνουμε πιο λεπτομερείς, η τιμή της φασματικής απόδοσης μειώνεται σταδιακά ώσπου φτάνει τα 0.1 bps/Hz. Αυτό είναι επακόλουθο της τυχαίας κίνησης του χρήστη με το χαμηλότερο SINR, ο οποίος στο πείραμά μας έτυχε να κινείται κατευθυνόμενος προς τα άκρα της MBSFN περιοχής. Αυτός είναι ο χρήστης που καθορίζει την επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και επηρεάζει άμεσα τη συνολική ρυθμαπόδοση και φασματική απόδοση.

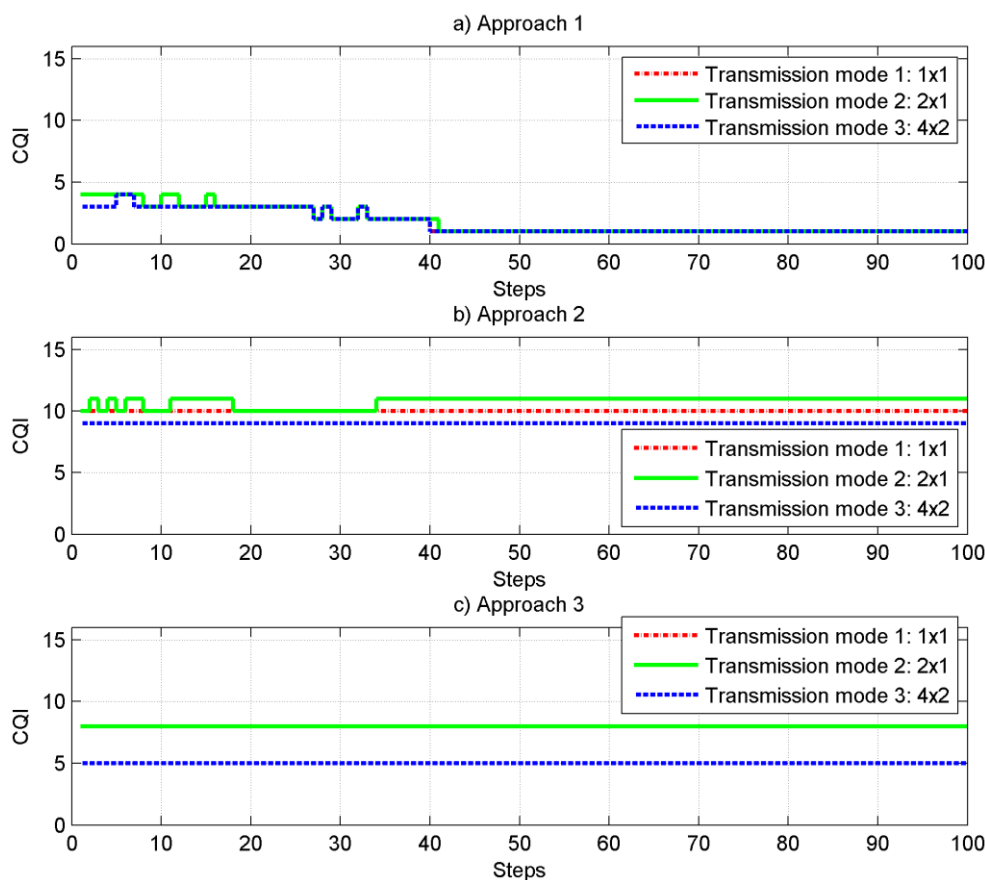
Οι τεχνικές MIMO βελτιώνουν και στην περίπτωση αυτή την απόδοση του συστήματος. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24 ο τρόπος μετάδοσης 3 παρέχει την υψηλότερη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τους άλλους δύο. Σε σχέση με την πρώτη προσέγγιση, οι προσεγγίσεις 2 και 3 προσαρμόζονται καλύτερα στη κινητικότητα των χρηστών και αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις στην τιμή της φασματικής απόδοσης είναι πιο ομαλές. Όπως ήταν αναμενόμενο η δεύτερη προσέγγιση προσφέρει την υψηλότερη φασματική απόδοση και ειδικά όταν χρησιμοποιείται ο τρίτος τρόπος μετάδοσης (MIMO 4x2). Όσον αφορά την τρίτη προσέγγιση, ο στόχος που έχει τεθεί για τη φασματική απόδοση επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τον τρόπο μετάδοσης που χρησιμοποιείται (Εικόνα 24).



**Εικόνα 24. Σενάριο 3: Φασματική απόδοση για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.**

Στη συνέχεια, η Εικόνα 25 απεικονίζει το πως η κινητικότητα των χρηστών επηρεάζει την επιλογή των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τις τρεις προσεγγίσεις. Όσον αφορά την προσέγγιση 1, η εικόνα επιβεβαιώνει ότι η κίνηση του χρήστη με το χειρότερο SINR αναγκάζει συνεχώς το σταθμό βάσης να αλλάζει τα σχήματα διαμόρφωσης που επιλέγονται (ring-pong φαινόμενα). Πιο αναλυτικά, για το χρόνο προσομοίωσης 0-41 βήματα που ο "χειρότερος" χρήστης πλησιάζει και απομακρύνεται από το σταθμό βάσης (εξαιτίας της τυχαίας κίνησής του), τα CQI που επιλέγονται κυμαίνονται από το CQI 2 έως το CQI 4 για όλους τους τρόπους μετάδοσης. Για τον υπόλοιπο χρόνο της προσομοίωσης, ο χρήστης με το χειρότερο SINR κινείται προς τα σύνορα της MBSFN περιοχής και ως εκ τούτου επιλέγεται το

μικρότερο CQI, δηλαδή το CQI 1. Αυτό εξηγεί και τις χαμηλές τιμές της φασματικής απόδοσης στην Εικόνα 24a. Από την άλλη πλευρά, η Εικόνα 25b δείχνει ότι η 2<sup>η</sup> προσέγγιση επιλέγει CQI μεταξύ των CQI 9 και CQI 11 για τη μετάδοση των MBSFN δεδομένων με κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης. Σε συνδυασμό με την Εικόνα 24b γίνεται σαφές ότι η αξιοποίηση των τεχνικών MIMO προσφέρει υψηλότερες τιμές φασματικής απόδοσης ενώ ταυτόχρονα οδηγεί στην επιλογή χαμηλότερου CQI αυξάνοντας έτσι την κάλυψη της υπηρεσίας. Τέλος, η Εικόνα 25c καθιστά σαφές ότι η 3<sup>η</sup> προσέγγιση ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα ring-rong στην επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης το επιλεγμένο CQI διατηρήθηκε σταθερό για όλους τους τρόπους μετάδοσης. Συγκεκριμένα το CQI 8 επιλέχθηκε όταν έγινε χρήση των τρόπων μετάδοσης 1 και 2 και το CQI 5 για τον τρόπο μετάδοσης 3.



Εικόνα 25. Σενάριο 3: Επιλεγμένα CQI για κάθε προσέγγιση και τρόπο μετάδοσης.

## 5.4 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, ο Πίνακας 4 παρουσιάζει μια συνολική σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων που αναλύθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι η επιλογή του πιο αποτελεσματικού σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης είναι μία παράμετρος που εξαρτάται άμεσα από τον πάροχο. Επομένως, όταν βασική απαίτηση του παρόχου είναι η αδιάκοπη παροχή υπηρεσιών ανεξαρτήτως των συνθηκών που βιώνουν οι χρήστες τότε η πρώτη προσέγγιση αποτελεί την πιο αποτελεσματική λύση. Ωστόσο, η προσέγγιση

αυτή δεν μπορούσε να παράσχει εγγύηση για την ρυθμαπόδοση και την επιτευχθείσα φασματική απόδοση. Από την άλλη πλευρά, για μέγιστη ρυθμαπόδοση και μέγιστη μέση φασματική απόδοση η πιο αποτελεσματική προσέγγιση θα ήταν η 2<sup>η</sup> προσέγγιση. Η 3<sup>η</sup> προσέγγιση αποτελεί την πιο αποτελεσματική όταν στόχος του παρόχου είναι η επίτευξη μίας συγκεκριμένης τιμής φασματικής απόδοσης στην MBSFN περιοχή και επίσης ελαχιστοποιεί τα φαινόμενα των γρήγορων εναλλαγών στην επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

**Πίνακας 4. Σύγκριση των τριών προσεγγίσεων.**

Προσέγγιση	Ρυθμα-πόδοση	Φασματική απόδοση	Παροχή υπηρεσίας	Εναλλαγή σχήματος κωδικοποίησης
1 <sup>η</sup>	Μικρή	Μικρή	Αδιάκοπη	Μεσαία
2 <sup>η</sup>	Μεγάλη	Μεγάλη	Μη εξασφαλισμένη	Μεσαία
3 <sup>η</sup>	Μεσαία	Προκαθορισμένη	Μη εξασφαλισμένη	Μικρή



## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο ταχύτατα εξελισσόμενος από άποψη τεχνολογίας και συνδρομητών τομέας των δικτύων κινητών επικοινωνιών έχει επιφέρει μία ιδιαίτερα αυξανόμενη απαίτηση για ασύρματη επικοινωνία. Ταυτόχρονα με την εκτεταμένη εξάπλωση των δικτύων κινητών επικοινωνιών καθώς και τις αυξημένες δυνατότητες των κινητών συσκευών, οι πάροχοι πολυμεσικού περιεχομένου και υπηρεσιών ενδιαφέρονται όλο και περισσότερο για την υποστήριξη της πολυεκπομπής δεδομένων στα δίκτυα αυτά με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου. Επιπρόσθετα, οι χρήστες των κινητών δικτύων έχουν πλέον την απαίτηση να προσπελαίνουν εφαρμογές και υπηρεσίες οι οποίες μέχρι σήμερα μπορούσαν να διατεθούν αποκλειστικά από τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα. Έτσι λοιπόν στις μέρες μας γίνεται λόγος για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου όπως mobile TV, mobile gaming, mobile streaming κ.α., για την εξυπηρέτηση των οποίων ο οργανισμός 3GPP εισήγαγε την τεχνολογία MBSFN.

Προς αυτή την κατεύθυνση, η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο αφενός τη μελέτη της τεχνολογίας MBSFN στα δίκτυα LTE-A και αφετέρου τη βελτίωσή της μέσω της αποτελεσματικής επιλογής σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και της χρήσης τεχνικών πολλαπλών κεραιών που με τη σειρά τους θα βελτιστοποιήσουν τη φασματική απόδοση.

Συγκεκριμένα, προτάθηκαν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την αποτελεσματική επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τις MBSFN μεταδόσεις. Το βασικότερο ίσως συμπέρασμα είναι ότι η επιλογή του πιο αποδοτικού σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αποτελεί μία παράμετρο που εξαρτάται κυρίως από τους στόχους που θέτει ο πάροχος. Εάν ο πάροχος επιθυμεί την εξασφαλισμένη και αδιάκοπη παροχή της MBSFN υπηρεσίας ανεξαρτήτως των συνθηκών που βιώνουν οι χρήστες, τότε την πιο αποτελεσματική λύση αποτελεί η 1<sup>η</sup> προσέγγιση. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να παρέχει εγγυήσεις όσον αφορά τη ρυθμαπόδοση και τη φασματική απόδοση. Από την άλλη πλευρά, όταν στόχος του παρόχου είναι να μεγιστοποιήσει τη φασματική απόδοση η πιο αποδοτική προσέγγιση είναι η δεύτερη προσέγγιση. Τέλος, η 3<sup>η</sup> προσέγγιση αποτελεί ιδανική λύση όταν ο πάροχος επιθυμεί να εξασφαλίζει μια συγκεκριμένη τιμή φασματικής απόδοσης ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την ανάγκη για συνεχείς εναλλαγές του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Η παρούσα εργασία εξέτασε επίσης σενάρια για τρεις διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης με στόχο τη μελέτη της αποδοτικότητας των τεχνικών πολλαπλών κεραιών. Ως συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε ότι η χρήση τεχνικών MIMO μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του MBSFN αυξάνοντας τόσο τη ρυθμαπόδοση όσο και την κάλυψη της MBSFN υπηρεσίας.



## 7 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επόμενο βήμα της μελέτης που έγινε στην παρούσα εργασία είναι η βελτίωση των αλγόριθμων των τριών προσεγγίσεων ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα γρήγορης εναλλαγής των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Γενικότερα, η εναλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης είναι εφικτή στα συστήματα LTE-A αλλά δεν παύει να είναι μία πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί διαρκή επικοινωνία μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων σχετικά με την ποιότητα του καναλιού μεταξύ του σταθμού βάσης και των χρηστών. Έτσι, η ελαχιστοποίηση των φαινομένων γρήγορης εναλλαγής των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης θα έκανε τους προτεινόμενους αλγόριθμους πιο ανθεκτικούς στην αλλαγή του αριθμού των χρηστών και στην κίνησή τους.

Ένα ακόμα βήμα, θα μπορούσε να είναι ο σχεδιασμός, η εφαρμογή και η αξιολόγηση ενός αλγόριθμου ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την εναλλαγή μεταξύ των προσεγγίσεων επιλογής του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και την ανάθεση ανά πάσα στιγμή της ιδανικής προσέγγισης λαμβάνοντας υπόψη τόσο την κατανομή των χρηστών όσο και τις απαιτήσεις του παρόχου.

Μια ακόμη κατεύθυνση που θα μπορούσε να διερευνηθεί είναι η εφαρμογή τεχνικών Forward Error Correction (FEC) κατά τις MBSFN μεταδόσεις σε δίκτυα LTE-A. Πρόκειται για μία τεχνική ελέγχου σφαλμάτων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει ή να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων. Το κύριο χαρακτηριστικό της τεχνικής FEC είναι ότι ο πομπός προσθέτει περιττή πληροφορία στα μηνύματα που μεταδίδονται στο δέκτη. Αυτή η πληροφορία επιτρέπει στο δέκτη να ανακατασκευάσει τα δεδομένα που έχουν αποσταλεί σε περίπτωση που κάποιο τμήμα τους δεν έχει παραδοθεί. Γίνεται κατανοητό πως η συγκεκριμένη τεχνική προσθέτει αναπόφευκτα κάποια επιβάρυνση στα δεδομένα που πρέπει να αποσταλούν, κάτι το οποίο μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις σε περίπτωση που δεν σχεδιαστεί κατάλληλα.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος γύρω από τα small cells, ένα μελλοντικό βήμα θα μπορούσε να είναι η διερεύνηση της χρήσης τους για τις MBSFN μεταδόσεις με στόχο την περαιτέρω αύξηση της φασματικής απόδοσης. Τα small cells χρησιμοποιούν κεραιές με χαμηλή ισχύ εκπομπής, οι οποίες συνδέονται από τον ίδιο τον συνδρομητή σε μία ενσύρματη ευρυζωνική γραμμή. Πρόκειται για μία από τις πιο οικονομικές λύσεις για την

επέκταση των κινητών δικτύων σε σημεία με κακή ή καθόλου κάλυψη και την υποστήριξη υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων. Η χρήση των small cells για τις MBSFN μεταδόσεις θα μπορούσε να αποδειχτεί μία ιδανική λύση για την αύξηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος στα όρια των MBSFN περιοχών.



---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Telecommunication Union. (2012). *Measuring the Information Society; The ICT Development Index*. [Online] Available: [http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/mis2012/MIS2012\\_without\\_Annex\\_4.pdf](http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/publications/mis2012/MIS2012_without_Annex_4.pdf)
- [2] Mishra., A. (2004). *Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimization, 2G/2.5G/3G...Evolution of 4G*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-86267-4.
- [3] 3gamericas. (2010). *Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced*. Rysavy Research/3G Americas. [Online] Available: [http://www.3gamericas.org/documents/3G\\_Americas\\_RysavyResearch\\_HSPA-LTE\\_Advanced\\_FINAL.pdf](http://www.3gamericas.org/documents/3G_Americas_RysavyResearch_HSPA-LTE_Advanced_FINAL.pdf)
- [4] Toh, C. (2002). *Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [5] Chen, Y. (2003). *Soft Handover Issues in Radio Resource Management for 3G WCDMA Networks*. Queen Mary, University of London. [Online] Available: <https://qmro.qmul.ac.uk/xmlui/bitstream/handle/123456789/3811/CHENSoftHandover2003.pdf?sequence=1>
- [6] UMTS World. (2009). *UMTS / 3G History and Future Milestones*. [Online] Available: <http://www.umtsworld.com/umts/history.htm>
- [7] Jalil, K., Latif, M., & Masrek, M. (2009). Looking Into The 4G Features. *MASAUM Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(2), pp. 249-253.
- [8] Pereira, V., & Sousa, T. (2004). *Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G*. Department of Informatics Engineering of the University of Coimbra, Portugal.
- [9] International Telecommunication Union. (2010). *ITU Paves the Way for Next-Generation 4G Mobile Broadband Technologies*. [Online] Available: [http://www.itu.int/net/pressoffice/press\\_releases/2010/40.aspx](http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2010/40.aspx)
- [10] 3GPP TR 36.913 v11.0.0. (2012). *Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 11)*.
- [11] Olsson, M., Sultana, S., Rommer, S., Frid, L. & Mulligan, C. (2009). *SAE and the Evolved Packet Core - Driving the Mobile Broadband Revolution*. Academic Press, ISBN: 978-0-123-74826-3.
- [12] 3GPP TS 29.060 v12.2.0. (2013). *General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) across the Gn and Gp interface (Release 12)*.
- [13] Hanzo, L.L., Akhtman, Y., Wang, L., & Jiang, M. (2010). *MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX: Coherent versus Non-coherent and Cooperative Turbo Transceivers*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-68669-0.

- [14] 3GPP TS 25.346 v11.0.0. (2012). *Technical specification group radio access network; Introduction of the multimedia broadcast multicast service (MBMS) in the radio access network (RAN); Stage 2 (Release 11)*
- [15] Holma, H., & Toskala, A. (2009). *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA based radio access*. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-99401-6.
- [16] Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2011). *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Elsevier, ISBN: 978-0-12-385489-6.
- [17] 3GPP TS 36.300 v11.7.0. (2013). *Technical specification group radio access network; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 11)*.
- [18] 3GPP R1-070051. (2007). *Performance of MBMS Transmission Configurations*.
- [19] 3GPP R1-071049. (2007). *Spectral Efficiency comparison of possible MBMS transmission schemes: Additional Results*.
- [20] 3GPP R1-071433. (2007). *Additional Results on EMBMS Transmission Configurations*.
- [21] Goldsmith, A., J., & Chua, S., G. (1998). Adaptive coded modulation for fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 46(5), pp.595-602.
- [22] Goldsmith, A., J., & Chua, S., G. (1997). Variable-Rate Variable-Power MQAM for Fading Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 45(10), pp. 1218-1230.
- [23] Alexiou, A., Bouras, C., Kokkinos, V., Papazois, A., & Tschritzis, G. (2010). *Efficient MCS Selection for MBSFN Transmissions over LTE Networks*. In proceedings of 3<sup>rd</sup> IFIP Wireless Days 2010, Venice, Italy, pp. 1-5.
- [24] Alexiou, A., Bouras, C., Kokkinos, V., Papazois, A., & Tschritzis, G. (2010). *Spectral Efficiency Performance of MBSFN-enabled LTE Networks*. In proceedings of 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2010), Niagara Falls, Canada, pp. 361-367.
- [25] Ball, C., Hindelang, T., Kambourov, I., & Eder, S. (2008). *Spectral efficiency assessment and radio performance comparison between LTE and WiMAX*. In proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008), Cannes, France, 2008, pp. 1-6.
- [26] Chen, Y., & Davis, L. (2012). A Cross-Layer Adaptive Modulation and Coding Scheme for Energy Efficient Software Defined Radio. *Journal of Signal Processing Systems*, 69(1), pp. 23-30.
- [27] Huy, D.T.P., Legouable, R., Ktenas, D., Brunel, L., & Assaad, M. (2008). *Downlink B3G MIMO OFDMA link and system level performance*. In

- proceedings of 2008 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2008-Spring), Singapore, pp. 1975-1979.
- [28] Rong, L., Haddada, O., & Elayoubi, S. (2008). *Analytical analysis of the coverage of a MBSFN OFDMA network*. In proceedings of IEEE Global Communication Conference 2008 (Globecom 2008), New Orleans, USA, pp. 1-5.
- [29] Sheng, Y., Peng, M., & Wang, W. (2008). A novel adaptive modulation and coding strategy based on partial feedback for enhanced MBMS network. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 15(1), pp. 48-54.
- [30] Jiancun, F., Qinye, Y., Li, G.Y., Bingguang, P., & Xiaolong, Z. (2011). *MCS Selection for Throughput Improvement in Downlink LTE Systems*. In proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2011), Maui, Hawaii, pp.1-5.
- [31] Elayoubi, S.-E., Haddada, B.O., & Fourestie, B. (2008). Performance evaluation of frequency planning schemes in OFDMA-based networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(5), pp.1623-1633.
- [32] 3GPP TS 36.213 v11.4.0. (2013). *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 11)*.
- [33] Mehlfrer, C., Wrulich, M., Ikuno, J.C., Bosanska, D., & Rupp, M. (2009). *Simulating the Long Term Evolution Physical Layer*. In proceedings of 17<sup>th</sup> European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland, pp. 1471-1478.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Συντομογραφία	Επεξήγηση
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
AC	Authentication Centre
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AMPS	Advanced Mobile Phone System
BLER	Block Error Rate
BSC	Base Station Controllers
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	Coordinated Multipoint
CQI	Channel Quality Indicators
DNS	Domain Name Servers
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution
EIR	Equipment Identity Register
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FM	Frequency Modulation
GGSN	Gateway GPRS
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol
HLR	Home Location Register

Συντομογραφία	Επεξήγηση
HSS	Home Subscriber Server
HSPA	High Speed Packet Access
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
ITU	International Telecommunication Union
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast / Multicast Service
MBSFN	MBMS over Single Frequency Network
MCE	Multi-cell/multicast Coordination Entity
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MSC	Mobile Switching Centre
NSS	Network Switching Subsystem
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDC	Personal Digital Cellular
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
P-GW	PDN Gateway
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
SAE	System Architecture Evolution

Συντομογραφία	Επεξήγηση
SC-FDMA	Single-carrier FDMA
SGSN	Servicing General Packet Radio Services
S-GW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SMSC	Short Message Service Centre
TACS	Total Access Communication System
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
VLR	Visitor Location Register
VMS	Voice Mail Service
WMSC	WCDMA Mobile Switching Centre
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο Παράρτημα ΙΙ της διπλωματικής παρουσιάζονται τμήματα κώδικα από την υλοποίηση των μηχανισμών επιλογής σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης κατά τη μετάδοση MBSFN δεδομένων. Όπως έχει αναφερθεί, συμπληρωματικά με την ανάπτυξη των μηχανισμών χρησιμοποιήθηκε και ο εξομοιωτής LTE Link Level Simulator 1.3 r620 [33], με στόχο την εξαγωγή των καμπυλών SNR-BLER για τους τρεις τρόπους μετάδοσης. Έχοντας εξάγει τις καμπύλες αυτές, με χρήση της κύριας συνάρτησης και των συναρτήσεων υλοποίησης των τριών μεθόδων μπορούν εύκολα να αναπαραχθούν τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας.

Σε όλες τις παραπάνω συναρτήσεις έχουν προστεθεί σχόλια, γεγονός που από τη μία μεριά βοηθάει τον αναγνώστη να κατανοήσει τη λειτουργία τους και από την άλλη τις καθιστά εύκολα τροποποιήσιμες και επεκτάσιμες.

### *Η συνάρτηση main (κύρια συνάρτηση)*

```
function main(plot_type)

% Users' Group distribution
% 1st group of 200 users
SINR_min = 5;
SINR_max = 23;
SINR(1:500,1) = SINR_min + (SINR_max-SINR_min).*rand(500,1);
% 2nd group of 300 users
SINR_min = 8;
SINR_max = 23;
SINR(501:900,1) = SINR_min + (SINR_max-SINR_min).*rand(400,1);
% 3rd group of 500 users
SINR_min = 3;
SINR_max = 23;
SINR(901:1000,1) = SINR_min + (SINR_max-SINR_min).*rand(100,1);
SINR = SINR';

% Constans values
target_SE = 1;

switch plot_type

%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
case 1 % Scenario 1: Constant Number of UEs
    %%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%
```

% 1st method: Calculate mean Spectral Efficiency (SE) based on  
% the user with the lowest SINR

```
[mean_SE_1x1SSD_ore_1,CQI_1x1SSD_ore_1,mean_SE_2x1SSD_ore_1,CQI_2x1SSD_ore_1,mean_SE_4x2SSD_ore_1,CQI_4x2SSD_ore_1,mean_SE_1x1SSD_3re_1,CQI_1x1SSD_3re_1,mean_SE_2x1SSD_3re_1,CQI_2x1SSD_3re_1,mean_SE_4x2SSD_3re_1,CQI_4x2SSD_3re_1,SINR_threshold_1] = SE_smallest_SINR_no_img(SINR);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
```

% 2nd method: Find CQI that achieves maximum mean SE

```
[mean_SE_1x1SSD_ore_2,SE_1x1SSD_ore_2,CQI_1x1SSD_ore_2,mean_SE_2x1SSD_ore_2,SE_2x1SSD_ore_2,CQI_2x1SSD_ore_2,mean_SE_4x2SSD_ore_2,SE_4x2SSD_ore_2,CQI_4x2SSD_ore_2,mean_SE_1x1SSD_3re_2,SE_1x1SSD_3re_2,CQI_1x1SSD_3re_2,mean_SE_2x1SSD_3re_2,SE_2x1SSD_3re_2,CQI_2x1SSD_3re_2,mean_SE_4x2SSD_3re_2,SE_4x2SSD_3re_2,CQI_4x2SSD_3re_2] = SE_maximum_no_img(SINR);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
```

% 3rd method: Find CQI that reaches target SE

```
[mean_SE_1x1SSD_ore_3,SE_1x1SSD_ore_3,CQI_1x1SSD_ore_3,mean_SE_2x1SSD_ore_3,SE_2x1SSD_ore_3,CQI_2x1SSD_ore_3,mean_SE_4x2SSD_ore_3,SE_4x2SSD_ore_3,CQI_4x2SSD_ore_3,mean_SE_1x1SSD_3re_3,SE_1x1SSD_3re_3,CQI_1x1SSD_3re_3,mean_SE_2x1SSD_3re_3,SE_2x1SSD_3re_3,CQI_2x1SSD_3re_3,mean_SE_4x2SSD_3re_3,SE_4x2SSD_3re_3,CQI_4x2SSD_3re_3,target_reached_1x1SSD_ore_3,target_reached_2x1SSD_ore_3,target_reached_4x2SSD_ore_3,target_reached_1x1SSD_3re_3,target_reached_2x1SSD_3re_3,target_reached_4x2SSD_3re_3] = SE_target_no_img(SINR,target_SE);
```

% Plot CQI-SE for all methods

```
plot_SE_all(CQI_1x1SSD_ore_1,mean_SE_1x1SSD_ore_1,CQI_1x1SSD_ore_2,SE_1x1SSD_ore_2,CQI_1x1SSD_ore_3,SE_1x1SSD_ore_3,CQI_2x1SSD_ore_1,mean_SE_2x1SSD_ore_1,CQI_2x1SSD_ore_2,SE_2x1SSD_ore_2,CQI_2x1SSD_ore_3,SE_2x1SSD_ore_3,CQI_4x2SSD_ore_1,mean_SE_4x2SSD_ore_1,CQI_4x2SSD_ore_2,SE_4x2SSD_ore_2,CQI_4x2SSD_ore_3,SE_4x2SSD_ore_3);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
```

case 2 % Scenario 2: Increasing Number of UEs

```
step_init=10;
```

```
step=10;
```

```
i=1;
```

```
for j = 1:step:length(SINR)
```

```
    % 0.1 BLER target
```

```
    [mean_SE_1x1SSD_ore_1(i),CQI_1x1SSD_ore_1(i),mean_SE_2x1SSD_ore_1(i),CQI_2x1SSD_ore_1(i),mean_SE_4x2SSD_ore_1(i),CQI_4x2SSD_ore_1(i),mean_SE_1x1SSD_3re_1(i),CQI_1x1SSD_3re_1(i),mean_SE_2x1SSD_3re_1(i),CQI_2x1SSD_3re_1(i),mean_SE_4x2SSD_3re_1(i),CQI_4x2SSD_3re_1(i),SINR_threshold_1(i)]=SE_smallest_SINR_no_img(SINR(1:step));
```

```
    [mean_SE_1x1SSD_ore_2,SE_1x1SSD_ore_2(i),CQI_1x1SSD_ore_2(i),mean_SE_2x1SSD_ore_2,SE_2x1SSD_ore_2(i),CQI_2x1SSD_ore_2(i),mean_SE_4x2SSD_ore_2,SE_4x2SSD_ore_2(i),CQI_4x2SSD_ore_2(i),mean_SE_1x1SSD_3re_2,SE_1x1SSD_3re_2(i),CQI_1x1SSD_3re_2(i),mean_SE_2x1SSD_3re_2,SE_2x1SSD_3re_2(i),CQI_2x1SSD_3re_2(i),mean_SE_4x2SSD_3re_2,SE_4x2SSD_3re_2(i),CQI_4x2SSD_3re_2(i)]=SE_maximum_no_img(SINR(1:step));
```

```
[mean_SE_1x1SSD_ore_3,SE_1x1SSD_ore_3(i),CQI_1x1SSD_ore_3(i),mean_SE_2
x1SSD_ore_3,SE_2x1SSD_ore_3(i),CQI_2x1SSD_ore_3(i),mean_SE_4x2SSD_ore
_3,SE_4x2SSD_ore_3(i),CQI_4x2SSD_ore_3(i),mean_SE_1x1SSD_3re_3,SE_1x1S
SD_3re_3(i),CQI_1x1SSD_3re_3(i),mean_SE_2x1SSD_3re_3,SE_2x1SSD_3re_3(i),
CQI_2x1SSD_3re_3(i),mean_SE_4x2SSD_3re_3,SE_4x2SSD_3re_3(i),CQI_4x2SS
D_3re_3(i),target_reached_1x1SSD_ore_3(i),target_reached_2x1SSD_ore_3(i),targ
et_reached_4x2SSD_ore_3(i),target_reached_1x1SSD_3re_3(i),target_reached_2x1
SSD_3re_3(i),target_reached_4x2SSD_3re_3(i)]=SE_target_no_img(SINR(1:step),
target_SE);
```

```
UE_number(i) = j;
step = step + step_init;
i = i+1;
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
```

```
% Scenario 2: Spectral Efficiency Subplots per Transmission mode
```

```
figure;
```

```
subplot(3,1,1)
```

```
plot(UE_number,mean_SE_1x1SSD_ore_1,'r-.',UE_number, SE_1x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,SE_1x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
```

```
title('a) Transmission mode 1: 1x1');
```

```
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
```

```
xlabel('Number of UEs');
```

```
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
```

```
ylim([0 5]);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
subplot(3,1,2)
```

```
plot(UE_number,mean_SE_2x1SSD_ore_1,'r-.',UE_number, SE_2x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,SE_2x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
```

```
title('b) Transmission mode 2: 2x1');
```

```
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
```

```
xlabel('Number of UEs');
```

```
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
```

```
ylim([0 5]);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
subplot(3,1,3)
```

```
plot(UE_number,mean_SE_4x2SSD_ore_1,'r-.',UE_number, SE_4x2SSD_ore_2,'g-
',UE_number,SE_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
```

```
title('c) Transmission mode 3: 4x2');
```

```
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
```

```
xlabel('Number of UEs');
```

```
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
```

```
ylim([0 5]);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
```

```
% Scenario 2: CQI Subplots per Transmission mode
```

```

figure;
subplot(3,1,1)
plot(UE_number,CQI_1x1SSD_ore_1,'r-',UE_number,           CQI_1x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,CQI_1x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('a) Transmission mode 1: 1x1');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(UE_number,CQI_2x1SSD_ore_1,'r-',UE_number,           CQI_2x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,CQI_2x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Transmission mode 2: 2x1');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(UE_number,CQI_4x2SSD_ore_1,'r-',UE_number,           CQI_4x2SSD_ore_2,'g-
',UE_number,CQI_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Transmission mode 3: 4x2');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Scenario 2: Spectral Efficiency Subplots per Approach
figure;
subplot(3,1,1)
plot(UE_number,mean_SE_1x1SSD_ore_1,'r-',UE_number,
mean_SE_2x1SSD_ore_1,'g-',UE_number,mean_SE_4x2SSD_ore_1,'b-
','LineWidth',2);grid,
title('a) Approach 1');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(UE_number,SE_1x1SSD_ore_2,'r-',UE_number,           SE_2x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,SE_4x2SSD_ore_2,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Approach 2');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')

```

```

ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(UE_number,SE_1x1SSD_ore_3,'r-',UE_number,          SE_2x1SSD_ore_3,'g-
',UE_number,SE_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Approach 3');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 5]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Scenario 2: CQI Subplots per Approach
figure;
subplot(3,1,1)
plot(UE_number,CQI_1x1SSD_ore_1,'r-',UE_number,          CQI_2x1SSD_ore_1,'g-
',UE_number,CQI_4x2SSD_ore_1,'b--','LineWidth',2);grid,
title('a) Approach 1');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(UE_number,CQI_1x1SSD_ore_2,'r-',UE_number,          CQI_2x1SSD_ore_2,'g-
',UE_number,CQI_4x2SSD_ore_2,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Approach 2');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(UE_number,CQI_1x1SSD_ore_3,'r-',UE_number,          CQI_2x1SSD_ore_3,'g-
',UE_number,CQI_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Approach 3');
ylabel('CQI');
xlabel('Number of UEs');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 3 % Scenario 3: Moving UEs

```

```

max_step = 100;
step=1;
for i = 1:max_step
    % 0.1 BLER target
    [mean_SE_1x1SSD_ore_1(i),CQI_1x1SSD_ore_1(i),mean_SE_2x1SSD_ore_1(i),CQI_
    _2x1SSD_ore_1(i),mean_SE_4x2SSD_ore_1(i),CQI_4x2SSD_ore_1(i),mean_SE_1x
    1SSD_3re_1(i),CQI_1x1SSD_3re_1(i),mean_SE_2x1SSD_3re_1(i),CQI_2x1SSD_3re
    _1(i),mean_SE_4x2SSD_3re_1(i),CQI_4x2SSD_3re_1(i),SINR_threshold_1(i)] =
    SE_smallest_SINR_no_img(SINR);
    [mean_SE_1x1SSD_ore_2,SE_1x1SSD_ore_2(i),CQI_1x1SSD_ore_2(i),mean_SE_2
    x1SSD_ore_2,SE_2x1SSD_ore_2(i),CQI_2x1SSD_ore_2(i),mean_SE_4x2SSD_ore
    _2,SE_4x2SSD_ore_2(i),CQI_4x2SSD_ore_2(i),mean_SE_1x1SSD_3re_2,SE_1x1S
    SD_3re_2(i),CQI_1x1SSD_3re_2(i),mean_SE_2x1SSD_3re_2,SE_2x1SSD_3re_2(i),
    CQI_2x1SSD_3re_2(i),mean_SE_4x2SSD_3re_2,SE_4x2SSD_3re_2(i),CQI_4x2SS
    D_3re_2(i)] = SE_maximum_no_img(SINR);
    [mean_SE_1x1SSD_ore_3,SE_1x1SSD_ore_3(i),CQI_1x1SSD_ore_3(i),mean_SE_2
    x1SSD_ore_3,SE_2x1SSD_ore_3(i),CQI_2x1SSD_ore_3(i),mean_SE_4x2SSD_ore
    _3,SE_4x2SSD_ore_3(i),CQI_4x2SSD_ore_3(i),mean_SE_1x1SSD_3re_3,SE_1x1S
    SD_3re_3(i),CQI_1x1SSD_3re_3(i),mean_SE_2x1SSD_3re_3,SE_2x1SSD_3re_3(i),
    CQI_2x1SSD_3re_3(i),mean_SE_4x2SSD_3re_3,SE_4x2SSD_3re_3(i),CQI_4x2SS
    D_3re_3(i),target_reached_1x1SSD_ore_3(i),target_reached_2x1SSD_ore_3(i),targ
    et_reached_4x2SSD_ore_3(i),target_reached_1x1SSD_3re_3(i),target_reached_2x1
    SSD_3re_3(i),target_reached_4x2SSD_3re_3(i)] =
    SE_target_no_img(SINR,target_SE);

    step(i) = i;
    for j=1:length(SINR)
        SINR(j) = SINR(j) +(-1 + (1+1).*rand(1,1));
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Scenario 3: Spectral Efficiency Subplots per Transmission mode
figure;
subplot(3,1,1)
plot(step,mean_SE_1x1SSD_ore_1,'r-',step,SE_1x1SSD_ore_2,'g-',
step,SE_1x1SSD_ore_3,'b-','LineWidth',2);grid,
title('a) Transmission mode 1: 1x1');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(step,mean_SE_2x1SSD_ore_1,'r-',step,SE_2x1SSD_ore_2,'g-',
step,SE_2x1SSD_ore_3,'b-','LineWidth',2);grid,
title('b) Transmission mode 2: 2x1');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')

```

```

ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(step,mean_SE_4x2SSD_ore_1,'r-.',step,SE_4x2SSD_ore_2,'g-',
step,SE_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Transmission mode 3: 4x2');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 5]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Scenario 3: CQI Subplots per Transmission mode
figure;
subplot(3,1,1)
plot(step,CQI_1x1SSD_ore_1,'r-.',step,CQI_1x1SSD_ore_2,'g-',
step,CQI_1x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('a) Transmission mode 1: 1x1');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(step,CQI_2x1SSD_ore_1,'r-.',step,CQI_2x1SSD_ore_2,'g-',
step,CQI_2x1SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Transmission mode 2: 2x1');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(step,CQI_4x2SSD_ore_1,'r-.',step,CQI_4x2SSD_ore_2,'g-',
step,CQI_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Transmission mode 3: 4x2');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Approach 1','Approach 2','Approach 3')
ylim([0 16]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Scenario 3: Spectral Efficiency Subplots per Approach
figure;
subplot(3,1,1)
plot(step,mean_SE_1x1SSD_ore_1,'r-.',step,mean_SE_2x1SSD_ore_1,'g-',
step,mean_SE_4x2SSD_ore_1,'b--','LineWidth',2);grid,
title('a) Approach 1');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');

```

```

xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1','Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(step,SE_1x1SSD_ore_2,'r-',step,SE_2x1SSD_ore_2,'g-',step,
SE_4x2SSD_ore_2,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Approach 2');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1', 'Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 5]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)
plot(step,SE_1x1SSD_ore_3,'r-',step,SE_2x1SSD_ore_3,'g-',step,
SE_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Approach 3');
ylabel('Spectral efficiency [(bit/s)/Hz]');
xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1', 'Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 5]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Scenario 3: CQI Subplots per Approach
figure;
subplot(3,1,1)
plot(step,CQI_1x1SSD_ore_1,'r-',step,CQI_2x1SSD_ore_1,'g-',step,
CQI_4x2SSD_ore_1,'b--','LineWidth',2);grid,
title('a) Approach 1');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1', 'Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,2)
plot(step,CQI_1x1SSD_ore_2,'r-',step,CQI_2x1SSD_ore_2,'g-',step,
CQI_4x2SSD_ore_2,'b--','LineWidth',2);grid,
title('b) Approach 2');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1', 'Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(3,1,3)

```



```

plot(step,CQI_1x1SSD_ore_3,'r-',step,CQI_2x1SSD_ore_3,'g-',step,
CQI_4x2SSD_ore_3,'b--','LineWidth',2);grid,
title('c) Approach 3');
ylabel('CQI');
xlabel('Steps');
legend('Transmission mode 1: 1x1','Transmission mode 2: 2x1', 'Transmission mode 3:
4x2')
ylim([0 16]);
end

```

## Η συνάρτηση υλοποίησης της 1<sup>ης</sup> μεθόδου

```

function [mean_SE_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore,mean_SE_2x1SSD_ore,
CQI_2x1SSD_ore,
mean_SE_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_ore,mean_SE_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re,mean_S
E_2x1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re,mean_SE_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re,SINR_threshold
]=SE_smallest_SINR_no_img(SINR)

```

*% Define CQIs*

```
CQI = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
```

*% Load default values for ore*

```
[SNR_vector_ore, BLER_overall_1x1SSD_ore,Throughput_overall_1x1SSD_ore,
SNR_thresholds_1x1SSD_ore,BLER_overall_2x1SSD_ore,Throughput_overall_2x1SSD_ore
,SNR_thresholds_2x1SSD_ore,BLER_overall_4x2SSD_ore,Throughput_overall_4x2SSD_ore,
SNR_thresholds_4x2SSD_ore,BLER_overall_4x2m2_ore,Throughput_overall_4x2m2_ore,
SNR_thresholds_4x2m2_ore]=load_params_ore_no_img;
```

*% Load default values for 3re*

```
[SNR_vector_3re,BLER_overall_1x1SSD_3re,Throughput_overall_1x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_1x1SSD_3re,BLER_overall_2x1SSD_3re,Throughput_overall_2x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_2x1SSD_3re,BLER_overall_4x2SSD_3re,Throughput_overall_4x2SSD_3re,SNR_thres
holds_4x2SSD_3re,BLER_overall_4x2m2_3re,Throughput_overall_4x2m2_3re,SNR_thres
holds_4x2m2_3re]=load_params_3re_no_img;
```

*% Calculate the throughput for all CQIs for the smallest SINR value*

```
SINR_threshold = min(SINR);
```

```
SINR_threshold_var = 1.00/2;
```

```
for cqi_idx=1:15
```

```
    SINR_idx_1x1SSD_ore=find(SNR_vector_ore{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```
    SINR_idx_2x1SSD_ore=find(SNR_vector_ore{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```
    SINR_idx_4x2SSD_ore=find(SNR_vector_ore{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```
    SINR_idx_1x1SSD_3re=find(SNR_vector_3re{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```
    SINR_idx_2x1SSD_3re=find(SNR_vector_3re{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```
    SINR_idx_4x2SSD_3re=find(SNR_vector_3re{cqi_idx}<=SINR_threshold+SINR_thres
hold_var,1,'last');
```

```

CQIs_Throughput_1x1SSD_ore(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_1x1SSD_ore{cqi_idx}(
SINR_idx_1x1SSD_ore) SNR_vector_ore{cqi_idx}(SINR_idx_1x1SSD_ore)];
CQIs_Throughput_2x1SSD_ore(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_2x1SSD_ore{cqi_idx}(
SINR_idx_2x1SSD_ore) SNR_vector_ore{cqi_idx}(SINR_idx_2x1SSD_ore)];
CQIs_Throughput_4x2SSD_ore(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_4x2SSD_ore{cqi_idx}(
SINR_idx_4x2SSD_ore) SNR_vector_ore{cqi_idx}(SINR_idx_4x2SSD_ore)];
CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_1x1SSD_3re{cqi_idx}(
SINR_idx_1x1SSD_3re) SNR_vector_3re{cqi_idx}(SINR_idx_1x1SSD_3re)];
CQIs_Throughput_2x1SSD_3re(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_2x1SSD_3re{cqi_idx}(
SINR_idx_2x1SSD_3re) SNR_vector_3re{cqi_idx}(SINR_idx_2x1SSD_3re)];
CQIs_Throughput_4x2SSD_3re(cqi_idx,:)= [Throughput_overall_4x2SSD_3re{cqi_idx}(
SINR_idx_4x2SSD_3re) SNR_vector_3re{cqi_idx}(SINR_idx_4x2SSD_3re)];
end

% Calculate the per user throughput
[per_user_throughput_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore]=max(CQIs_Throughput_1x1SSD_ore
(:,1));
[per_user_throughput_2x1SSD_ore,CQI_2x1SSD_ore]=max(CQIs_Throughput_2x1SSD_ore
(:,1));
[per_user_throughput_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_ore]=max(CQIs_Throughput_4x2SSD_ore
(:,1));
[per_user_throughput_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re]=max(CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(
(:,1));
[per_user_throughput_2x1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re]=max(CQIs_Throughput_2x1SSD_3re
(:,1));
[per_user_throughput_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re]=max(CQIs_Throughput_4x2SSD_3re
(:,1));

% Calculate the mean throughput
mean_throughput_1x1SSD_ore=length(SINR)*per_user_throughput_1x1SSD_ore/length(SI
NR);
mean_throughput_2x1SSD_ore=length(SINR)*per_user_throughput_2x1SSD_ore/length(SI
NR);
mean_throughput_4x2SSD_ore=length(SINR)*per_user_throughput_4x2SSD_ore/length(S
INR);
mean_throughput_1x1SSD_3re=length(SINR)*per_user_throughput_1x1SSD_3re/length(SI
NR);
mean_throughput_2x1SSD_3re=length(SINR)*per_user_throughput_2x1SSD_3re/length(SI
NR);
mean_throughput_4x2SSD_3re=length(SINR)*per_user_throughput_4x2SSD_3re/length(SI
NR);

% Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
mean_SE_1x1SSD_ore = mean_throughput_1x1SSD_ore/5.0;
mean_SE_2x1SSD_ore = mean_throughput_2x1SSD_ore/5.0;
mean_SE_4x2SSD_ore = mean_throughput_4x2SSD_ore/5.0;
mean_SE_1x1SSD_3re = mean_throughput_1x1SSD_3re/5.0;
mean_SE_2x1SSD_3re = mean_throughput_2x1SSD_3re/5.0;
mean_SE_4x2SSD_3re = mean_throughput_4x2SSD_3re/5.0;

```

## Η συνάρτηση υλοποίησης της 2<sup>ης</sup> μεθόδου

```
function [mean_SE_1x1SSD_ore,SE_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore, mean_SE_2x1SSD_ore,
SE_2x1SSD_ore,CQI_2x1SSD_ore,mean_SE_4x2SSD_ore,SE_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_
ore,mean_SE_1x1SSD_3re,SE_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re,mean_SE_2x1SSD_3re,SE_2x
1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re,mean_SE_4x2SSD_3re,SE_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re]=S
E_maximum_no_img(SINR)
```

```
% Define CQIs
```

```
CQI=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
```

```
% Load default values for ore
```

```
[SNR_vector_ore,BLER_overall_1x1SSD_ore,Throughput_overall_1x1SSD_ore,SNR_thresh
olds_1x1SSD_ore,BLER_overall_2x1SSD_ore,Throughput_overall_2x1SSD_ore,SNR_thres
holds_2x1SSD_ore,BLER_overall_4x2SSD_ore,Throughput_overall_4x2SSD_ore,SNR_thr
esholds_4x2SSD_ore,BLER_overall_4x2m2_ore,Throughput_overall_4x2m2_ore,SNR_thr
esholds_4x2m2_ore]=load_params_ore_no_img;
```

```
% Load default values for 3re
```

```
[SNR_vector_3re,BLER_overall_1x1SSD_3re,Throughput_overall_1x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_1x1SSD_3re,BLER_overall_2x1SSD_3re,Throughput_overall_2x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_2x1SSD_3re,BLER_overall_4x2SSD_3re,Throughput_overall_4x2SSD_3re,SNR_thres
holds_4x2SSD_3re,BLER_overall_4x2m2_3re,Throughput_overall_4x2m2_3re,SNR_thres
holds_4x2m2_3re]=load_params_3re_no_img;
```

```
SINR_threshold_var=1.00/2;
```

```
% Clear matrices
```

```
SINR_idx_1x1SSD_ore=0;SINR_idx_2x1SSD_ore=0;SINR_idx_4x2SSD_ore=0;SINR_idx
_1x1SSD_3re=0;SINR_idx_2x1SSD_3re=0;SINR_idx_4x2SSD_3re=0;CQIs_Throughput_1
x1SSD_ore=0;CQIs_Throughput_2x1SSD_ore=0;CQIs_Throughput_4x2SSD_ore=0;CQIs_
Throughput_1x1SSD_3re=0;CQIs_Throughput_2x1SSD_3re=0;CQIs_Throughput_4x2SSD
_3re=0;
```

```
% Calculate the throughput of each user for all CQIs
```

```
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
```

```
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
```

```
        % Find the corresponding value of SINR in SNR_vector matrix
```

```
        SINR_idx_1x1SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_va
r,1,'last');
```

```
        SINR_idx_2x1SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
```

```
        SINR_idx_4x2SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
```

```
        SINR_idx_1x1SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_va
r,1,'last');
```

```
        SINR_idx_2x1SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_va
r,1,'last');
```

```
        SINR_idx_4x2SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
```

```
% Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
```

```

CQIs_Throughput_1x1SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_1x1SSD_ore{i}(SINR_idx
_1x1SSD_ore(i,j));
CQIs_Throughput_2x1SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_2x1SSD_ore{i}(SINR_idx
_2x1SSD_ore(i,j));
CQIs_Throughput_4x2SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_4x2SSD_ore{i}(SINR_idx
_4x2SSD_ore(i,j));
CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_1x1SSD_3re{i}(SINR_idx
_1x1SSD_3re(i,j));
CQIs_Throughput_2x1SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_2x1SSD_3re{i}(SINR_idx
_2x1SSD_3re(i,j));
CQIs_Throughput_4x2SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_4x2SSD_3re{i}(SINR_idx
_4x2SSD_3re(i,j));
end
end

% Calculate the mean throughput and SE for all CQIs
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    % Calculate the mean throughput
    mean_throughput_1x1SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_1x1SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
    mean_throughput_2x1SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_2x1SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
    mean_throughput_4x2SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_4x2SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
    mean_throughput_1x1SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(i,:))/length(SIN
R);
    mean_throughput_2x1SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_2x1SSD_3re(i,:))/length(SI
NR);
    mean_throughput_4x2SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_4x2SSD_3re(i,:))/length(SI
NR);
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
    mean_SE_1x1SSD_ore(i)=mean_throughput_1x1SSD_ore(i)/5.0;
    mean_SE_2x1SSD_ore(i)=mean_throughput_2x1SSD_ore(i)/5.0;
    mean_SE_4x2SSD_ore(i)=mean_throughput_4x2SSD_ore(i)/5.0;
    mean_SE_1x1SSD_3re(i)=mean_throughput_1x1SSD_3re(i)/5.0;
    mean_SE_2x1SSD_3re(i)=mean_throughput_2x1SSD_3re(i)/5.0;
    mean_SE_4x2SSD_3re(i)=mean_throughput_4x2SSD_3re(i)/5.0;
end

% Find the CQI with the higher SE
[SE_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore]=max(mean_SE_1x1SSD_ore(:));
[SE_2x1SSD_ore,CQI_2x1SSD_ore]=max(mean_SE_2x1SSD_ore(:));
[SE_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_ore]=max(mean_SE_4x2SSD_ore(:));
[SE_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re]=max(mean_SE_1x1SSD_3re(:));
[SE_2x1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re]=max(mean_SE_2x1SSD_3re(:));
[SE_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re]=max(mean_SE_4x2SSD_3re(:));

```

## Η συνάρτηση υλοποίησης της 3<sup>ης</sup> μεθόδου

```
function [mean_SE_1x1SSD_ore,SE_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore, mean_SE_2x1SSD_ore,
SE_2x1SSD_ore,CQI_2x1SSD_ore,mean_SE_4x2SSD_ore,SE_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_
ore,mean_SE_1x1SSD_3re,SE_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re,mean_SE_2x1SSD_3re,SE_2x
1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re,mean_SE_4x2SSD_3re,SE_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re,targ
et_reached_1x1SSD_ore,target_reached_2x1SSD_ore,target_reached_4x2SSD_ore,targ
et_reached_1x1SSD_3re,target_reached_2x1SSD_3re,target_reached_4x2SSD_3re]=SE_target_
no_img(SINR,target_SE)
```

```
% Define CQIs
```

```
CQI=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15];
```

```
% Load default values for ore
```

```
[SNR_vector_ore,BLER_overall_1x1SSD_ore,Throughput_overall_1x1SSD_ore,SNR_thresh
olds_1x1SSD_ore,BLER_overall_2x1SSD_ore,Throughput_overall_2x1SSD_ore,SNR_thres
holds_2x1SSD_ore,BLER_overall_4x2SSD_ore,Throughput_overall_4x2SSD_ore,SNR_thr
esholds_4x2SSD_ore,BLER_overall_4x2m2_ore,Throughput_overall_4x2m2_ore,SNR_thr
esholds_4x2m2_ore]=load_params_ore_no_img;
```

```
% Load default values for 3re
```

```
[SNR_vector_3re,BLER_overall_1x1SSD_3re,Throughput_overall_1x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_1x1SSD_3re,BLER_overall_2x1SSD_3re,Throughput_overall_2x1SSD_3re,SNR_thresh
olds_2x1SSD_3re,BLER_overall_4x2SSD_3re,Throughput_overall_4x2SSD_3re,SNR_thres
holds_4x2SSD_3re,BLER_overall_4x2m2_3re,Throughput_overall_4x2m2_3re,SNR_thres
holds_4x2m2_3re]=load_params_3re_no_img;
```

```
SINR_threshold_var=1.00/2;
```

```
% Clear matrices
```

```
SINR_idx_1x1SSD_ore=0;SINR_idx_2x1SSD_ore=0;SINR_idx_4x2SSD_ore=0;SINR_idx
_1x1SSD_3re=0;SINR_idx_2x1SSD_3re=0;SINR_idx_4x2SSD_3re=0;CQIs_Throughput_1
x1SSD_ore=0;CQIs_Throughput_2x1SSD_ore=0;CQIs_Throughput_4x2SSD_ore=0;CQIs_
Throughput_1x1SSD_3re=0;CQIs_Throughput_2x1SSD_3re=0;CQIs_Throughput_4x2SSD
_3re=0;target_reached_1x1SSD_ore=1;target_reached_2x1SSD_ore=1;target_reached_4x2
SSD_ore=1;target_reached_1x1SSD_3re=1;target_reached_2x1SSD_3re=1;target_reached_
4x2SSD_3re=1;
```

```
% Calculate the throughput of each user for all CQIs
```

```
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
```

```
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
```

```
        SINR_idx_1x1SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_va
r,1,'last');
```

```
        % Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
```

```
        CQIs_Throughput_1x1SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_1x1SSD_ore{i}(SINR_idx
_1x1SSD_ore(i,j));
```

```
    end
```

```
    % Calculate the mean throughput
```

```
    mean_throughput_1x1SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_1x1SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
```

```
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
```

```
    mean_SE_1x1SSD_ore(i)=mean_throughput_1x1SSD_ore(i)/5.0;
```

```

% Check if SE reaches target_SE
if mean_SE_1x1SSD_ore(i) >= target_SE
    SE_1x1SSD_ore=mean_SE_1x1SSD_ore(i);
    CQI_1x1SSD_oreT(i)=i;
    CQI_1x1SSD_ore=CQI_1x1SSD_oreT(i);
    break
end
CQI_1x1SSD_oreT(i)=i;
CQI_1x1SSD_ore=CQI_1x1SSD_oreT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_1x1SSD_ore(length(CQI_1x1SSD_oreT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_1x1SSD_ore,CQI_1x1SSD_ore]=max(mean_SE_1x1SSD_ore(:));
    target_reached_1x1SSD_ore=0;
end

% Calculate the throughput of each user for all CQIs
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
        SINR_idx_2x1SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
        % Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
        CQIs_Throughput_2x1SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_2x1SSD_ore{i}(SINR_idx
_2x1SSD_ore(i,j));
    end
    % Calculate the mean throughput
    mean_throughput_2x1SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_2x1SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
    mean_SE_2x1SSD_ore(i)=mean_throughput_2x1SSD_ore(i)/5.0;
    % Check if SE reaches target_SE
    if mean_SE_2x1SSD_ore(i) >= target_SE
        SE_2x1SSD_ore=mean_SE_2x1SSD_ore(i);
        CQI_2x1SSD_oreT(i)=i;
        CQI_2x1SSD_ore=CQI_2x1SSD_oreT(i);
        break
    end
    CQI_2x1SSD_oreT(i)=i;
    CQI_2x1SSD_ore=CQI_2x1SSD_oreT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_2x1SSD_ore(length(CQI_2x1SSD_oreT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_2x1SSD_ore,CQI_2x1SSD_ore]=max(mean_SE_2x1SSD_ore(:));
    target_reached_2x1SSD_ore=0;
end

% Calculate the throughput of each user for all CQIs

```

```

for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
        SINR_idx_4x2SSD_ore(i,j)=find(SNR_vector_ore{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
        % Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
        CQIs_Throughput_4x2SSD_ore(i,j)=Throughput_overall_4x2SSD_ore{i}(SINR_idx
_4x2SSD_ore(i,j));
    end
    % Calculate the mean throughput
    mean_throughput_4x2SSD_ore(i)=sum(CQIs_Throughput_4x2SSD_ore(i,:))/length(SI
NR);
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
    mean_SE_4x2SSD_ore(i)=mean_throughput_4x2SSD_ore(i)/5.0;
    % Check if SE reaches target_SE
    if mean_SE_4x2SSD_ore(i) >= target_SE
        SE_4x2SSD_ore=mean_SE_4x2SSD_ore(i);
        CQI_4x2SSD_oreT(i)=i;
        CQI_4x2SSD_ore=CQI_4x2SSD_oreT(i);
        break
    end
    CQI_4x2SSD_oreT(i)=i;
    CQI_4x2SSD_ore=CQI_4x2SSD_oreT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_4x2SSD_ore(length(CQI_4x2SSD_oreT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_4x2SSD_ore,CQI_4x2SSD_ore]=max(mean_SE_4x2SSD_ore(:));
    target_reached_4x2SSD_ore=0;
end

% Calculate the throughput of each user for all CQIs
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
        SINR_idx_1x1SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_va
r,1,'last');
        % Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
        CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_1x1SSD_3re{i}(SINR_idx
_1x1SSD_3re(i,j));
    end
    % Calculate the mean throughput
    mean_throughput_1x1SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_1x1SSD_3re(i,:))/length(SIN
R);
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
    mean_SE_1x1SSD_3re(i)=mean_throughput_1x1SSD_3re(i)/5.0;
    % Check if SE reaches target_SE
    if mean_SE_1x1SSD_3re(i) >= target_SE
        SE_1x1SSD_3re=mean_SE_1x1SSD_3re(i);
        CQI_1x1SSD_3reT(i)=i;
        CQI_1x1SSD_3re=CQI_1x1SSD_3reT(i);
        break
    end
end

```

```

end
CQI_1x1SSD_3reT(i)=i;
CQI_1x1SSD_3re=CQI_1x1SSD_3reT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_1x1SSD_3re(length(CQI_1x1SSD_3reT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_1x1SSD_3re,CQI_1x1SSD_3re]=max(mean_SE_1x1SSD_3re(:));
    target_reached_1x1SSD_3re=0;
end

% Calculate the throughput of each user for all CQIs
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
        SINR_idx_2x1SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');
        % Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
        CQIs_Throughput_2x1SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_2x1SSD_3re{i}(SINR_idx
_2x1SSD_3re(i,j));
    end

    % Calculate the mean throughput
    mean_throughput_2x1SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_2x1SSD_3re(i,:))/length(SI
NR);
    % Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
    mean_SE_2x1SSD_3re(i)=mean_throughput_2x1SSD_3re(i)/5.0;

    % Check if SE reaches target_SE
    if mean_SE_2x1SSD_3re(i) >= target_SE
        SE_2x1SSD_3re=mean_SE_2x1SSD_3re(i);
        CQI_2x1SSD_3reT(i)=i;
        CQI_2x1SSD_3re=CQI_2x1SSD_3reT(i);
        break
    end
    CQI_2x1SSD_3reT(i)=i;
    CQI_2x1SSD_3re=CQI_2x1SSD_3reT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_2x1SSD_3re(length(CQI_2x1SSD_3reT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_2x1SSD_3re,CQI_2x1SSD_3re]=max(mean_SE_2x1SSD_3re(:));
    target_reached_2x1SSD_3re=0;
end

% Calculate the throughput of each user for all CQIs
for i=1:length(CQI) % For all CQIs
    for j=1:length(SINR) % For all measured SINRs
        SINR_idx_4x2SSD_3re(i,j)=find(SNR_vector_3re{i}<=SINR(j)+SINR_threshold_v
ar,1,'last');

```



```

% Calculate the throughput of each CQI for the corresponding value of SINR
CQIs_Throughput_4x2SSD_3re(i,j)=Throughput_overall_4x2SSD_3re{i}(SINR_idx_4x2SSD_3re(i,j));
end

% Calculate the mean throughput
mean_throughput_4x2SSD_3re(i)=sum(CQIs_Throughput_4x2SSD_3re(i,:))/length(SINR);
% Calculate the mean SE (Mean_throughput/Bandwidth)
mean_SE_4x2SSD_3re(i)=mean_throughput_4x2SSD_3re(i)/5.0;
% Check if SE reaches target_SE
if mean_SE_4x2SSD_3re(i) >= target_SE
    SE_4x2SSD_3re=mean_SE_4x2SSD_3re(i);
    CQI_4x2SSD_3reT(i)=i;
    CQI_4x2SSD_3re=CQI_4x2SSD_3reT(i);
    break
end
CQI_4x2SSD_3reT(i)=i;
CQI_4x2SSD_3re=CQI_4x2SSD_3reT(i);
end

% Check if SE does not reach target_SE
if mean_SE_4x2SSD_3re(length(CQI_4x2SSD_3reT))<=target_SE
    % Find the CQI with the higher SE
    [SE_4x2SSD_3re,CQI_4x2SSD_3re]=max(mean_SE_4x2SSD_3re(:));
    target_reached_4x2SSD_3re=0;
end

```



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η παρακάτω δημοσίευση στο διεθνές συνέδριο 6<sup>th</sup> Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2013).

- [1] **Bochrini, S.**, Bouras, C., & Kokkinos, V. (2013). *Efficient MCS Selection Mechanisms for Multicasting over LTE Networks*. In Proceedings of 6<sup>th</sup> Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2013), Dubai, United Arab Emirates, pp. 1-8.

Περίληψη: Στα δίκτυα Long Term Evolution (LTE), η τεχνολογία Multimedia Broadcast / Multicast Services over a Single Frequency Network (MBSFN) επιτρέπει τη μετάδοση του ίδιου πολυμεσικού περιεχομένου σε ένα σύνολο ή σε όλους τους χρήστες που βρίσκονται σε ένα κελί, οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο στην αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας κοινής χρονο-συγχρονισμένης κυματομορφής, η οποία μεταδίδεται από πολλά κελιά για καθορισμένη χρονική διάρκεια, γεγονός που επιτρέπει το συνδυασμό της πληροφορίας, και επομένως τη σημαντική βελτίωση της φασματικής απόδοσης (Spectral Efficiency - SE). Ωστόσο, η απόδοση του MBSFN εξαρτάται άμεσα από το Σχήμα Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme - MCS) και τον τρόπο μετάδοσης που θα επιλεγεί για την παράδοση των πολυμεσικών δεδομένων. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετώνται και προτείνονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις για την επιλογή του MCS κατά τις MBSFN μεταδόσεις. Κύριος στόχος είναι να προσδιοριστεί η πλέον αποτελεσματική προσέγγιση, ανάλογα με το στόχο που έχει θέσει ο πάροχος, όπως για παράδειγμα, να μεγιστοποιείται η φασματική απόδοση ή να επιτυγχάνεται μία συγκεκριμένη τιμή της για διάφορες κατανομές χρηστών. Η απόδοση κάθε μίας προσέγγισης αξιολογείται για σενάρια που περιλαμβάνουν κινητικότητα των χρηστών και τρεις διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης, προκειμένου παράλληλα να εξεταστεί και η αποτελεσματικότητα των τεχνικών Multiple Input Multiple Output (MIMO).