



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Μελέτη παρεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας
ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες
τέταρτης γενιάς (4G) LTE FDD**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος

**Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Αθήνα, Ιούλιος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη παεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας
ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες
τέταρτης γενιάς (4G) LTE FDD**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από τριμελή επιτροπή τον Ιούλιο 2011

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κοττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright Ιωάννης Σταυρόπουλος 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στην αίθουσα EMC του τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Καψάλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την διπλωματική εργασία και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και τόσο ενδιαφέρον θέμα για τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ερευνητή του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων, Λάζαρο Πραγιάτη για την καθοδήγηση του τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας καθώς και τον συνάδελφο Χρήστο Ζαγανά για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την εκτέλεση του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να αναφέρω ότι αυτή η διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη στην οικογένεια μου για την ηθική και υλική στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος

Ιούλιος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν σύγγραμμα μελετάται η παρεμβολή που προκαλούν υπηρεσίες τέταρτης γενιάς κινητών επικοινωνιών (συγκεκριμένα τα πρωτόκολλα LTE FDD, LTE TDD) στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση.

Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζεται το θεωρητικό μέρος του πειράματος. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, τονίζοντας κάποια χαρακτηριστικά τα οποία θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο στο οποίο περιγράφεται η λειτουργία της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης καθώς και τα πολύ σημαντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση της στην Ελλάδα αλλά και στην υπόλοιπη Ευρώπη. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων κινητών επικοινωνιών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία παρεμβολών στον επίγειο ψηφιακό δέκτη. Επίσης στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η σημασία της αποδοτικής και οικονομικής χρήσης του ψηφιακού μερίσματος στις επικοινωνίες.

Τέλος, το τελευταίο κομμάτι είναι το πειραματικό μέρος της εργασίας. Σε αυτό περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος. Παρουσιάζονται επίσης και τα σχετικά διαγράμματα τα οποία δείχνουν την ποιότητα του λαμβανόμενου τηλεοπτικού σήματος, ακολουθούμενα από συμπεράσματα και παρατηρήσεις.

Λέξεις Κλειδιά

Κυψελωτά συστήματα, Ψηφιακή τηλεόραση, DVB-T, 4G, LTE TDD, LTE FDD, κανάλια συχνοτήτων, διασπορά συχνοτήτων, ψηφιακό μέρισμα, ψηφιακή μετάβαση, παρεμβολές, θόρυβος

SUMMARY

Subject matter of this study is the interjection that 4G mobile communications services (LTE FDD, LTE TDD) cause in the terrestrial digital television.

The first chapters present the theoretical part of the experiment. More specifically, a presentation of the mobile communications systems is given in the first chapter, emphasizing on certain characteristics of interest in this study. In the next chapter, the operation of terrestrial digital television is described and the benefits that derive from its use in Greece as well as in Europe are also mentioned. As for chapters three and four, the characteristics of the mobile communications protocols which were used for interference in the digital television receiver, are analyzed. Full information is also given, about more efficient and less extravagant use of the digital dividend.

Finally, the last chapter refers to the experimental part of this dissertation. In this, the experimental arrangement and the whole process is described. The results and the diagrams show the quality of the television signal which was received, followed by several observations and conclusions.

Key words

Cellular systems, Terrestrial digital television, DVB-T, 4G, LTE TDD, LTE FDD, frequency channels, spread spectrum, digital dividend, digital switchover, interference, noise

Στην οικογένεια μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	3
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	
1.1 Στοιχεία Κυψελωτών Ραδιοσυστημάτων Κινητών Επικοινωνιών.....	3
1.2 Φαινόμενα διάδοσης ραδιοκυμάτων.....	5
1.3 Τύποι Διαύλων Επικοινωνίας και Αμφιδρόμηση.....	6
1.3.1 FDD συστήματα.....	7
1.3.2 TDD συστήματα.....	8
1.4 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης.....	9
1.4.1 FDMA.....	10
1.4.2 TDMA.....	11
1.4.3 CDMA.....	12
1.4.4 SDMA.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	15
ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-T ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΓΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	
2.1 Μετάβαση από την αναλογική στη ψηφιακή εποχή.....	15
2.2 Το πρότυπο DVB.....	16

2.3 Το σύστημα DVB-T.....	18
2.4 Πολυπλεξία COFDM.....	20
2.5 Ιεραρχική Διαμόρφωση.....	25
2.6 Δομή Πλαισίου.....	26
2.7 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου σήματος.....	29
2.8 Δίκτυα Μονής Συχνότητας (Single Frequency Networks – SFN).....	31
2.8.1 Σχεδίαση και λειτουργία δικτύων SFN.....	31
2.8.2 Συγχρονισμός πομπών SFN.....	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....35

ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE FDD ΚΑΙ LTE TDD

3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G).....	35
3.1.1 Χαρακτηριστικά των δικτύων τέταρτης γενιάς.....	36
3.1.2 Σύγκριση συστημάτων τρίτης (3G) και τέταρτης (4G) γενιάς.....	37
3.1.3 Πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας 4G.....	38
3.2 Ασύρματο σύστημα Long Term Evolution (LTE).....	38
3.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά LTE.....	40
3.2.2 LTE TDD και LTE FDD.....	42
3.2.3 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE.....	45
3.2.4 Τοπολογία Δικτύου LTE.....	46
3.2.5 Απόδοση Δικτύου LTE.....	47
3.2.6 Λειτουργία, συντήρηση και ασφάλεια.....	48

3.3 Συμπεράσματα.....	48
-----------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 450

ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΕΡΙΣΜΑ ΣΤΙΣ ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή στο ψηφιακό μέρισμα.....	50
4.2 Ευρωπαϊκές και Διεθνής αποφάσεις για το ψηφιακό μέρισμα.....	53
4.3 Απελευθέρωση του ψηφιακού μερίσματος στην Ελλάδα.....	56
4.4 Τεχνικοί κανονισμοί για την εναρμονισμένη ζώνη 790-862 Mhz.....	59
4.5 Τεχνολογικές και εμπορικές εξελίξεις σε σχέση με το ψηφιακό μέρισμα..	61
4.6 Επιλογές σχεδίασης δικτύου.....	63
4.7 Θέματα διασυνοριακού συντονισμού.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....65

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Όργανα μέτρησης και συνδέσεις του πειράματος.....	65
5.2 Πειραματική Διάταξη.....	71
5.3 Μεγέθη που μετρήθηκαν.....	73
5.4 Διαδικασία λήψεως μετρήσεων.....	75
5.5 Επεξεργασία των μετρήσεων – Συμπεράσματα.....	76

ΒΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ.....	93
--	-----------

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Δομικά στοιχεία συστήματος κινητών επικοινωνιών.....	3
Σχήμα 1.2: Λειτουργία FDD.....	7
Σχήμα 1.3: Λειτουργία TDD.....	8
Σχήμα 1.4: FDMA.....	10
Σχήμα 1.5: TDMA.....	11
Σχήμα 1.6: Δομή πλαισίου TDMA.....	12
Σχήμα 1.7: CDMA.....	13
Σχήμα 1.8: SDMA.....	14

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Χρησιμοποιούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών ανά τον κόσμο.....	10
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήματα

Σχήμα 2.1: Τα πρότυπα DVB-T, ATSC και ISDB-T ανά τον κόσμο.....	15
Σχήμα 2.2: Δομικό διάγραμμα εκπομπής συστήματος DVB-T.....	19
Σχήμα 2.3: Φάσμα ενός DVB-T σήματος σε λειτουργία 8K.....	21
Σχήμα 2.4: Σηματοστερισμός ιεραρχικής διαμόρφωσης 16-QAM/QPSK.....	25
Σχήμα 2.5: Δομή εκπεμπόμενου πλαισίου.....	29
Σχήμα 2.6: Φασματική "μάσκα" για εκπομπές επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης...	30
Σχήμα 2.7: Λειτουργία του Gap Filler.....	33
Σχήμα 2.8: Ισοδύναμο μοντέλο πολυδιαδρομικής διάδοσης για SFN.....	33

Πίνακες

Πίνακας 2.1: Διάρκεια συμβόλου για τα επιτρεπόμενα διαστήματα φρουρούς στα 8 MHz.....	26
Πίνακας 2.2: Αριθμητικές τιμές των OFDM παραμέτρων.....	26
Πίνακας 2.3: Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (Mbps).....	27
Πίνακας 2.4: Υποκανάλια που περιέχουν συνεχή σύμβολα πιλότους.....	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχήματα

Σχήμα 3.1: Εξέλιξη των εφαρμογών προς την 4 ^η γενιά.....	36
Σχήμα 3.2: Πορεία εξέλιξης του LTE.....	40
Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική LTE Δικτύου.....	45
Σχήμα 3.4: Τοπολογία Δικτύου LTE.....	46

Πίνακες

Πίνακας 3.1: Σύγκριση παραμέτρων και χαρακτηριστικών 3G και 4G.....	37
Πίνακας 3.2: Εξελικτική πορεία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών έως το LTE.....	39
Πίνακας 3.3: Κατεύθυνση downlink στο LTE.....	41
Πίνακας 3.4: Ζώνες συχνοτήτων στο LTE TDD και στο LTE FDD.....	43
Πίνακας 3.5: Σύγκριση LTE TDD και LTE FDD.....	44
Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Απόδοσης Δικτύου LTE.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήματα

Σχήμα 4.1: Κατανομή συχνοτήτων ραδιοφάσματος.....	52
Σχήμα 4.2: Κατανομή καναλιών στις συχνότητες 480-862 MHz.....	53
Σχήμα 4.3: Κατανομή καναλιών στη λειτουργία FDD.....	53
Σχήμα 4.4: Στρατηγική που εφαρμόζουν οι ευρωπαϊκές χώρες απέναντι στην απελευθέρωση της περιοχής 790-862 MHz του φάσματος.....	54
Σχήμα 4.5: Αριθμός αναγκαίων ψηφιακών καναλιών και κενός χώρος που απομένει σε κάθε ΕΠΨΕ, θεωρώντας ότι τα κανάλια 61-69, 59-58 και 28-32 έχουν ελευθερωθεί πλήρως από το ψηφιακό πλάνο.....	57
Σχήμα 4.6: Αριθμός αναγκαίων ψηφιακών καναλιών και κενός χώρος που απομένει σε κάθε ΕΠΨΕ, θεωρώντας ότι τα κανάλια 61-69, 57-58 και 28-32 έχουν ελευθερωθεί πλήρως από το ψηφιακό πλάνο.....	58
Σχήμα 4.7: FDD τεχνική στις συχνότητες 790-862 MHz.....	59
Σχήμα 4.8: TDD τεχνική στις συχνότητες 790-862 MHz.....	59

Πίνακες

Πίνακας 4.1: Καταλληλότητα του φάσματος από το ψηφιακό μέρισμα για διάφορες εφαρμογές.....	51
Πίνακας 4.2: Όρια του EIRP εκτός φασματικού τμήματος για σταθμό βάσης.....	60
Πίνακας 4.3: Όρια EIRP εκτός φασματικού τμήματος για σταθμό βάσης σε συχνότητες κάτω από τα 790 MHz.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σχήματα

Σχήμα 5.1: Ψηφιακός δέκτης Promax Explorer II+.....	70
Σχήμα 5.2: Κεραία λήψης Electro – Metrics Tunable Dipole Antenna EM 6927.....	71
Σχήμα 5.3: Κεραία λήψης παρεμβολών.....	72
Σχήμα 5.4: Η γεννήτρια Agilent MXG Vector Signal Generator N5182A.....	73
Σχήμα 5.5: Αναλυτής φάσματος (Agilent E4403B-BAS ESA-L Basic Spectrum Analyzer.....	74
Σχήμα 5.6: Διαδρομές σημάτων του πειράματος.....	74
Σχήμα 5.7: Ο υπολογιστής και η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε.....	75
Σχήμα 5.8: Η κεραία εκπομπής ευρυζωνικών σημάτων.....	76
Σχήμα 5.9: Κεραία ψηφιακού δέκτη και αναλυτής φάσματος.....	77
Σχήμα 5.10: Μέτρηση MER στον ψηφιακό δέκτη.....	78
Σχήμα 5.11: Μέτρηση παραμέτρων CBER και VBER στον ψηφιακό δέκτη.....	79

Πίνακες

Πίνακας 5.1: Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακού δέκτη.....	71
Πίνακας 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κεραίας μετρητή φάσματος.....	71
Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά κεραίας παρεμβολών.....	72
Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας.....	73

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα σημαντικότερα αγαθά που υπάρχουν στη φύση στη σύγχρονη εποχή είναι το φάσμα συχνοτήτων. Λέγοντας φάσμα συχνοτήτων εννοούμε την περιοχή συχνοτήτων που μπορούμε να εκπέμψουμε ένα σήμα και να το λάβει ένας απομακρυσμένος δέκτης. Οι κινητές υπηρεσίες έχουν μπει για τα καλά στην καθημερινή μας ζωή κι έχουν καταφέρει να την διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό. Η πλειοψηφία των ανθρώπων χρησιμοποιεί το κινητό τηλέφωνο πολύ συχνά. Οι υπηρεσίες που παρέχονταν στην αρχή ήταν μόνο τηλεφωνικές κλήσεις ενώ τώρα παρέχονται υπηρεσίες τέταρτης γενιάς όπως π.χ πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η επικοινωνία των ανθρώπων επιβάλλει τα μελλοντικά συστήματα κινητών επικοινωνιών να επιτρέπουν την επικοινωνία του ανθρώπου που μετακινείται, με οποιονδήποτε συνδρομητή του ίδιου ή διαφορετικού συστήματος οπουδήποτε κι αν βρίσκεται αυτός, οποιαδήποτε στιγμή, παρέχοντας υπηρεσίες πολυμέσων. Η τεράστια ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων σε συνδυασμό με τη μεγάλη ανάπτυξη των φορητών υπολογιστών χειρός, αποτελούν μια ισχυρή ένδειξη για την ταχύτατη εξέλιξη των ασυρμάτων δικτύων στο μέλλον.

Μία ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιούμε στα σπίτια μας καθημερινά είναι η τηλεόραση. Η τηλεόραση καθ' όλη τη διάρκεια των δεκαετιών έχει περάσει από διάφορα στάδια. Στα πρώτα χρόνια η εικόνα ήταν ασπρόμαυρη, στη συνέχεια έγινε έγχρωμη για να φτάσουμε τελικά στη σημερινή ψηφιακή εποχή. Για πάρα πολλά χρόνια το τηλεοπτικό σήμα ήταν αναλογικό, με όχι και τόσο καλή ποιότητα εικόνας και ήχου και αρκετές φορές με εμφάνιση "χιονιών" και πολλαπλών ειδώλων. Στη ψηφιακή εποχή η τηλεόραση θα έχει πολύ καλύτερο σήμα με αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα ήχου και εικόνας. Επίσης ο χρήστης εκτός από την παρακολούθηση ενός τηλεοπτικού προγράμματος, θα έχει τη δυνατότητα χρήσης και άλλων υπηρεσιών όπως π.χ πολυμεσικές εφαρμογές. Τέλος, εκμεταλλευόμενοι το ψηφιακό σήμα έχουμε και πολύ μεγαλύτερη εξοικονόμηση φάσματος.

Στο παρόν σύγγραμμα θα μελετήσουμε την παρεμβολή που προκαλούν οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας και πιο συγκεκριμένα τα πρωτόκολλα Long Term Evolution Frequency Division Duplex (LTE FDD) και Long Term Evolution Time Division Duplex (LTE TDD), στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση. Επίσης γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί κατά πόσο η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση και οι κινητές υπηρεσίες μπορούν να συνυπάρξουν σε ένα κομμάτι του φάσματος κάτω από το 1GHz.

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια είναι η εξής:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Παρουσιάζονται τα συστήματα κινητών επικοινωνιών και αναφέρονται κάποια βασικά τους χαρακτηριστικά τα οποία θα είναι χρήσιμα για την ανάλυση που γίνεται στα επόμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών και εξετάζονται ειδικά τα κυψελωτά συστήματα. Γίνεται αναφορά σε φαινόμενα διάδοσης ραδιοκυμάτων ενώ αναφέρονται επίσης οι δύο κυριότερες τεχνικές αμφιδρόμησης καθώς κι οι τέσσερις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και επεξήγηση των τεχνικών χαρακτηριστικών της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης και επικεντρωνόμαστε περισσότερο στο πρότυπο και σύστημα μετάδοσης DVB-T. Επιπλέον γίνεται αναφορά στα δίκτυα μονής συχνότητας (SFN) καθώς και τα διάφορα οφέλη που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση τους στα σύγχρονα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Δίνονται επίσης ορισμένοι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων που απορρέουν από τη χρήση των SFN.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσέγγιση των συστημάτων κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G) και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των δικτύων τέταρτης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα γίνεται παρουσίαση των πρωτοκόλλων LTE FDD και LTE TDD καθώς και των τεχνικών τους χαρακτηριστικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία ανάλυση του ψηφιακού μερίσματος ενώ παρουσιάζονται και πολλοί τρόποι εκμετάλλευσης και αξιοποίησης της εναρμονισμένης ζώνης 790 – 862 MHz. Αναφέρονται επίσης και οι στάσεις που τηρούν διάφορες ευρωπαϊκές χώρες απέναντι στην απελευθέρωση του ψηφιακού μερίσματος για άλλες υπηρεσίες.

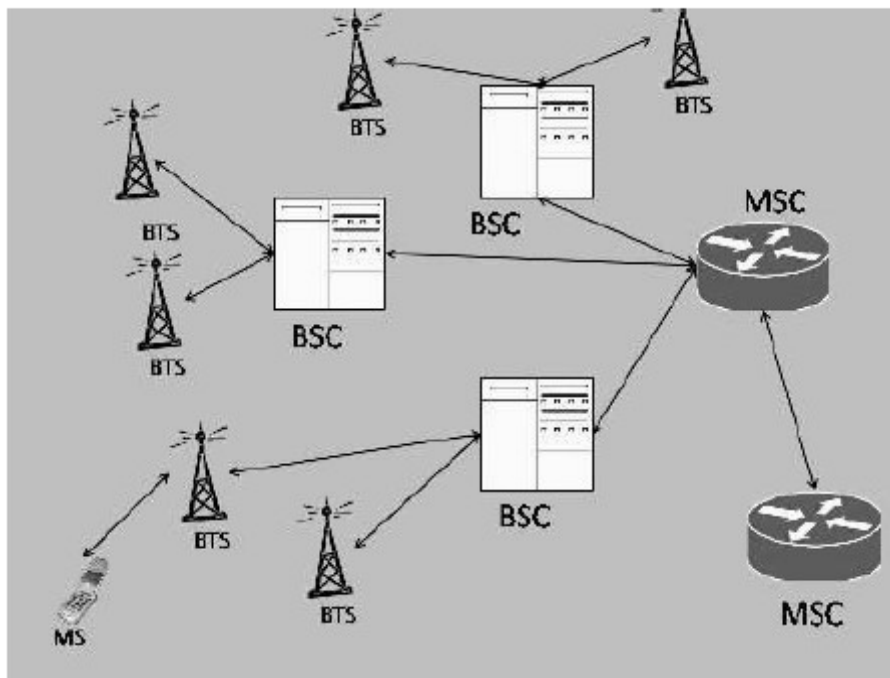
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του πειραματικού μέρους της εργασίας. Γίνεται περιγραφή του εξοπλισμού ο οποίος χρησιμοποιήθηκε, της πειραματικής διάταξης καθώς και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος. Η διπλωματική εργασία κλείνει με την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 Στοιχεία Κυψελωτών Ραδιοσυστημάτων Κινητών Επικοινωνιών

Με την εισαγωγή των κυψελωτών συστημάτων, τα δίκτυα προσφέρουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες σε μεγάλο αριθμό χρηστών με περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1.1



Σχήμα 1.1: Δομικά στοιχεία συστήματος κινητών επικοινωνιών.

Ο κινητός σταθμός (Mobile Station – MS ή User Equipment – UE) επικοινωνεί με το Σταθμό Βάσης (Base Transceiver Station – BTS ή Base Station – BS) χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους ραδιοδιαύλους και την αντίστοιχη ραδιοεπαφή. Με τον όρο ραδιοεπαφή (air-interface ή radio-interface) εννοούμε το σύνολο των κανόνων που καθορίζουν πώς γίνεται η πρόσβαση στο ραδιοδιάυλο. Για όλα τα στοιχεία του συστήματος που επικοινωνούν μεταξύ τους, υπάρχουν συγκεκριμένες διεπαφές. Με τον όρο Κινητός Σταθμός εννοούμε όλα τα τερματικά, είτε χειρός είτε φορητά (π.χ σε laptop ή σε αυτοκίνητο). Οι Σταθμοί Βάσης είναι οι σταθεροί σταθμοί του δικτύου που χρησιμοποιούνται για τη ραδιοεπικοινωνία με τους Κινητούς Σταθμούς. Ένας BTS είναι ε-

γκατεστημένος είτε στο κέντρο είτε στα όρια μιας περιοχής κάλυψης και αποτελείται από τις κεραίες εκπομπής και λήψης, συνήθως πάνω σε ιστό, καθώς και από τους αντίστοιχους πομποδέκτες. Κάθε BTS συνδέεται με το δίκτυο κορμού (backbone network) του παροχέα, μέσω ενός ελεγκτή που καλείται BSC (Base Station Controller). Πολλοί BSC συνδέονται σε ένα κέντρο μεταγωγής (Mobile Switching Center – MSC) που διαχειρίζεται και δρομολογεί τις κλήσεις σε μια μεγάλη περιοχή εξυπηρέτησης. Συνήθως ένα από τα MSC αναλαμβάνει και τη διασύνδεση του δικτύου κινητών επικοινωνιών (Public Land Mobile Network – PLMN) με το σταθερό δίκτυο επικοινωνιών (Public Subscriber Telephone Network – PSTN) και ονομάζεται GMSC (Gateway Mobile Switching Center).

Η βασική ιδέα των κυψελωτών συστημάτων είναι ο περιορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος του Σταθμού Βάσης, ώστε να περιοριστεί η έκταση της κάλυψης σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, που καλείται κυψέλη (cell), και η επαναχρησιμοποίηση των ραδιοδιαύλων του BTS από άλλο BTS που βρίσκεται σε κάποια απόσταση. Στα αναλογικά κυψελωτά συστήματα αλλά και σε αρκετά ψηφιακά κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί ένα μόνο τμήμα του διαθέσιμου φάσματος, και κυψέλες που απέχουν αρκετά μεταξύ τους μπορούν να χρησιμοποιούν τους ίδιους ραδιοδιαύλους. Συνήθως κάθε κυψέλη εξυπηρετείται από ένα BTS και, κατά την μετάβαση ενός χρήστη από μια κυψέλη σε μια νέα, το σύστημα φροντίζει τη σύνδεση του MS με το νέο BTS. Αν το MS βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, τότε συνήθως ανταλλάσσονται μηνύματα ελέγχου μεταξύ MS και δικτύου ώστε να είναι πάντα γνωστή η κυψέλη στην οποία κινείται ο MS. Η διαδικασία αυτή λέγεται περιαγωγή (roaming) και καλύπτει επίσης την περίπτωση ο MS να βρίσκεται σε περιοχή που εξυπηρετείται από άλλο δίκτυο PLMN από εκείνο στο οποίο είναι συνδρομητής. Αν κατά τη μετάβαση του MS από μια κυψέλη σε μια άλλη υπάρχει κλήση σε εξέλιξη, τότε το δίκτυο συνήθως φροντίζει για τη συνέχιση της κλήσης χωρίς διακοπή, συνδέοντας το MS στο νέο BTS. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μεταπομπή ή διαπομπή (handoff ή handover) και μπορεί να συμβεί ακόμα και μέσα στην ίδια κυψέλη, μεταφέροντας την κλήση σε ραδιοδιάυλο που παρουσιάζει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τον εξυπηρετούντα διάυλο.

Τα βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά ενός κυψελωτού συστήματος είναι η τεχνολογία της ραδιομετάδοσης και η τεχνολογία των υπολογιστών. Οι δύο βασικές λειτουργίες ενός κυψελωτού συστήματος είναι οι εξής:

- πρέπει να εντοπίζει και να παρακολουθεί τους Κινητούς Σταθμούς και
- πρέπει πάντα να προσπαθεί να συνδέσει τους Κινητούς Σταθμούς στους βέλτιστους διαθέσιμους Σταθμούς Βάσης

Η δεύτερη λειτουργία απαιτεί τη συνεχή αξιολόγηση της ποιότητας της ραδιοζεύξης με το Σταθμό Βάσης που εξυπηρετεί τον Κινητό Σταθμό, αλλά και με εναλλακτικούς Σταθμούς Βάσης. Αυτή η συνεχής παρακολούθηση εκτελείται από ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τη γνώση των αξιολογήσεων της ποιότητας των ραδιοζεύξεων και, σε συνδυασμό με τη γνωστή τοπολογία του συστήματος και τη ροή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, αποφασίζει για το βέλτιστο Σταθμό Βάσης με τον οποίο θα συνδεθεί ένας κινητός σταθμός.

Στόχος όλων των σύγχρονων ψηφιακών τεχνικών είναι η μείωση του χρόνου παρακολούθησης και έλεγχου με αποτελέσματα μεγάλης ακριβείας. Το μέγεθος των κυψελών, η δυνατότητα των ραδιοζεύξεων να αντεπεξέρχονται σε παρεμβολές, και η δυνατότητα του συστήματος να αντιδρά σε μεταβολές της κίνησης, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη φασματική απόδοση των κυψελωτών συστημάτων.

1.2 Φαινόμενα διάδοσης ραδιοκυμάτων.

Με τον όρο διάδοση ραδιοκυμάτων εννοούμε την όδευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και τη μεταφορά H/M ενέργειας από μια κεραία πομπού σε μια κεραία δέκτη σε περιβάλλον που συμμετέχουν τόσο το έδαφος και η τροπόσφαιρα ή η ιονόσφαιρα, όσο και διαφορετικές φυσικές ή τεχνητές κατασκευές. Στα συστήματα κινητών επικοινωνιών η ενέργεια καταφθάνει στο δέκτη, είτε πρόκειται για Κινητό Σταθμό είτε για Σταθμό Βάσης, ακολουθώντας διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης, με αποτέλεσμα τα αφικνούμενα ραδιοκύματα, που το καθένα καταφθάνει από διαφορετική κατεύθυνση και με διαφορετική χρονική καθυστέρηση, να αθροίζονται διανυσματικά στην κεραία του δέκτη. Το φαινόμενο αυτό της άφιξης πολλαπλών εκδόσεων του εκπεμπόμενου σήματος ονομάζεται πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) και έχει σαν αποτέλεσμα την αφαιρετική ή την αθροιστική συμβολή των ραδιοκυμάτων, ανάλογα με την κατανομή των φάσεων στα επιμέρους κύματα.

Οι μηχανισμοί διάδοσης των ραδιοκυμάτων, εκτός της απευθείας συνιστώσας είναι τρεις:

- Η ανάκλαση (reflection), που συμβαίνει όταν ένα εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια λεία επιφάνεια με πολύ μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος του RF σήματος
- Η περίθλαση (diffraction), που συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη υπάρχει φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος, το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από το εμπόδιο σύμφωνα με την αρχή του Huygens. Η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που ερμηνεύει τη μεταφορά H/M ενέργειας από τον πομπό στο δέκτη χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη απευθείας μονοπατιού μεταξύ τους.
- Η σκέδαση ή διάχυση (diffuse scattering) που συμβαίνει όταν ένα σήμα προσκρούει είτε σε μια μεγάλη τραχιά επιφάνεια ή σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του μήκους κύματος ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.

Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την ύπαρξη των πολλαπλών αντιτύπων του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία του δέκτη. Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες καταφθάνουν στο δέκτη με χαρακτηριστικά (πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης) ολισθημένα ως προς τα χαρακτηριστικά της απευθείας συνιστώσας.

Η επίδραση του ραδιοδιαύλου στο εκπεμπόμενο σήμα είναι πολλαπλή και γίνεται αισθητή κυρίως με τις απώλειες διάδοσης (path loss) και το φαινόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας (small scale fading) και των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (large scale fading).

Οι απώλειες διάδοσης στις οποίες έχει αποδοθεί ο όρος εξασθένιση, καθορίζουν την εξάρτηση της μείωσης της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση πομπού-δέκτη. Το λαμβανόμενο όμως σήμα δεν μπορεί να περιγραφεί αποκλειστικά και ντετερμινιστικά μόνο από την απόσταση πομπού-δέκτη. Η σκίαση από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια και η χωρικά μεταβαλλόμενη πολυδιαδρομική διάδοση είναι οι κύριες αιτίες για την εμφάνιση του φαινομένου των διαλείψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας, δηλαδή της μεταβολής του πλάτους ή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με τη μικρή ή και μεγάλη μετατόπιση του δέκτη. Ανάλογα δε με την ένταση των φαινομένων, μπορούμε να παρατηρήσουμε απλά τυχαίες μεταβολές στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή επίπεδες διαλείψεις (flat fading) ή ακόμη και διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference) ή διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading).

Τέλος, οι παρεμβολές από χρήστες του ίδιου ή άλλου συστήματος που λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, αποτελούν ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα κατά τη διάδοση στο ραδιοδίαυλο.

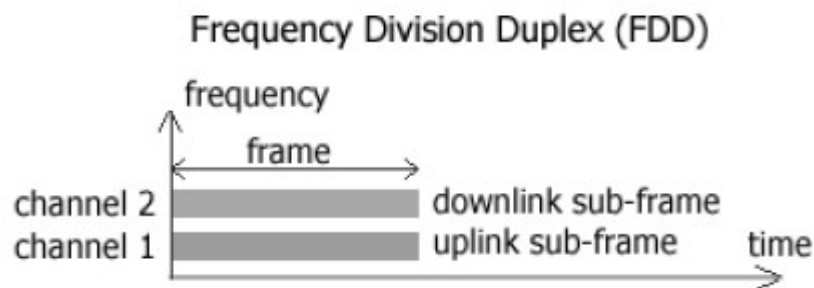
1.3 Τύποι Διαύλων Επικοινωνίας και Αμφιδρόμηση

Τα ασύρματα συστήματα ραδιομετάδοσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση μετάδοσης της πληροφορίας. Τα simplex, τα half-duplex και τα full-duplex συστήματα. Στα simplex η επικοινωνία είναι δυνατή μόνο στη μια κατεύθυνση, με κλασικό παράδειγμα τα συστήματα τηλεειδοποίησης. Στα half-duplex συστήματα έχουμε αμφίδρομη αλλά όχι ταυτόχρονη επικοινωνία, χρησιμοποιείται δηλαδή ένας διάυλος και για τις δύο κατευθύνσεις και συνεπώς ο χρήστης, μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί μόνο να εκπέμπει ή μόνο να λαμβάνει. Κλασικά παραδείγματα είναι τα ραδιοσυστήματα των οργανισμών κοινής ωφέλειας (π.χ. ΕΚΑΒ, ΔΕΗ, ΟΤΕ, ΥΠΑ) τα οποία καλύπτουν ανάγκες για ασύρματη επικοινωνία από διασκορπισμένους Κινητούς Σταθμούς προς το κέντρο επιχειρήσεων. Στα full-duplex συστήματα έχουμε ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη μεταξύ χρηστών και Σταθμών Βάσης. Το σύστημα παρέχει δύο ταυτόχρονους διαύλους για την επικοινωνία στις δύο κατευθύνσεις. Η κατεύθυνση από τον BTS προς τον MS καλείται και ευθεία (forward) ή κάτω-ζεύξη (down link-DL), ενώ από τον MS προς τον BTS καλείται

αντίστροφη (reverse) ή άνω-ζεύξη (up link-UL). Οι δύο δίαυλοι είτε χρησιμοποιούν διαφορετική συχνότητα για την ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη, οπότε προκύπτει σύστημα Frequency Division Duplex (FDD), είτε χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά γειτονικές χρονοσχισμές (timeslot), οπότε προκύπτει σύστημα Time Division Duplex (TDD).

1.3.1 FDD συστήματα

Στα FDD συστήματα οι πομποδέκτες χρησιμοποιούν την ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη, οπότε απαιτείται η χρήση διπλέκτη. Ο διπλέκτης είναι ένα τρίθυρο μικροκυματικό στοιχείο που επιτρέπει την πολυπλεξία και την απο-πολυπλεξία των σημάτων που καταφθάνουν στις θύρες του. Για την επαρκή απομόνωση εκπομπής και λήψης και για την ελαχιστοποίηση του κόστους του διπλέκτη, απαιτείται αρκετή απόσταση μεταξύ των δύο διαύλων επικοινωνίας και φίλτρα με μικρή ζώνη διέλευσης για γειτονικούς διαύλους. Το μοντέλο του FDD συστήματος είναι το παρακάτω:

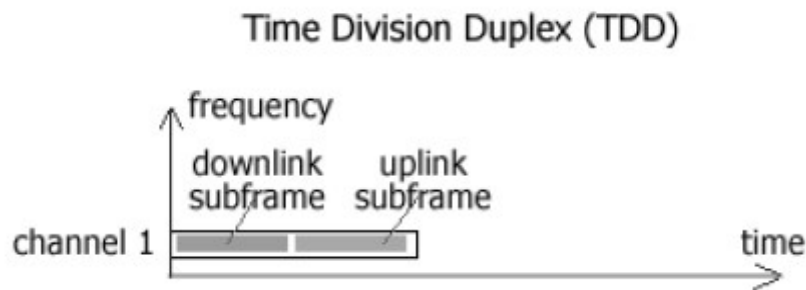


Σχήμα 1.2: Λειτουργία FDD.

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα της FDD τεχνικής είναι η συνεχής εκπομπή τόσο στην UL όσο και στην DL ζεύξη. Ένα δεύτερο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της FDD τεχνικής είναι η μεγάλη ανοχή στις παρεμβολές λόγω της μεγάλης συνήθως φασματικής απόστασης της UL και της DL ζεύξης. Στα κυψελωτά συστήματα υπάρχει πάντα ομοδιαυλική παρεμβολή από το Σταθμό Βάσης στον Κινητό Σταθμό και αντίστροφα. Η FDD τεχνική έχει όμως ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, οι δίαυλοι στην UL και DL ζεύξη είναι ασυσχέτιστοι και έχουν διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς. Δεύτερον, με την FDD τεχνική δεν είναι δυνατή η μεταβλητή απόδοση εύρους ζώνης των διαύλων στις δύο ζεύξεις UL και DL. Δηλαδή, δεν υποστηρίζεται η ασυμμετρία των ζεύξεων που αναμένεται να κυριαρχήσει ως χαρακτηριστικό με την εισαγωγή των υπηρεσιών δεδομένων, όπως στην πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τέλος, λόγω του ζευγαρώματος των διαύλων στις δύο ζεύξεις DL και UL, είναι δύσκολη έως αδύνατη η ευέλικτη απόδοση φάσματος στο σύστημα, ιδιαίτερα στα πλαίσια των γνωσιακών ραδιοσυστημάτων (cognitive radios), όπου η απόδοση γίνεται δυναμικά με βάση τη διαθεσιμότητα και τις υπάρχουσες υπηρεσίες.

1.3.2 TDD συστήματα

Η υλοποίηση των TDD συστημάτων είναι δυνατή μόνο με ψηφιακές τεχνικές και απαιτεί τη χρήση χρονικών διαστημάτων φύλαξης (guard times) μεταξύ των χρονικών σχισμών σε ένα χρονοπλαίσιο. Με τη TDD τεχνική γίνεται δυνατή η ευέλικτη απόδοση πόρων στις δύο ζεύξεις. Σε κάθε κανάλι συνυπάρχουν ένα υποπλάισιο DL και ένα UL. Τα TDD συστήματα χρησιμοποιούν δύο διαστήματα φύλαξης, ένα κατά τη μετάβαση από τη DL στη UL ζεύξη και ένα από την UL στη DL. Αυτά τα δύο διαστήματα ονομάζονται αντίστοιχα TTG (Transmit/receive Transition Gap) και RTG (Receive/transmit Transition Gap). Τα δύο διαστήματα πρέπει να είναι ικανά να απορροφούν τόσο το χρόνο μετάβασης του εξοπλισμού από τη λειτουργία εκπομπής στη λειτουργία λήψης, όσο και την καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ των Κινητών Σταθμών και του Σταθμού Βάσης. Η λειτουργία του FDD φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.3: Λειτουργία TDD.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της TDD τεχνικής είναι η αμοιβαιότητα (reciprocity) του διαύλου. Όταν το τερματικό εκτιμά το δίαυλο στη μια κατεύθυνση, μπορεί να χρησιμοποιήσει την πληροφορία για την κατάσταση του διαύλου στην άλλη κατεύθυνση, χωρίς σφάλμα. Ένα άλλο πολύ σημαντικό είναι η δυνατότητα που προσφέρει για δυναμική απόδοση του φάσματος μεταξύ των δύο κατευθύνσεων UL και DL. Στα TDD συστήματα, τα σήματα τόσο στην UL όσο και στην DL ζεύξη χρησιμοποιούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, γεγονός που βελτιώνει το πλεονέκτημα διαφορισμού στη συχνότητα. Επιπλέον, το γεγονός ότι δεν απαιτούνται ζευγάρια διαύλων για τις δύο κατευθύνσεις κάνει πιο εύκολη την απόδοση φάσματος και πάντως πολύ πιο εύκολη από τα αντίστοιχα FDD συστήματα. Τέλος, το κόστος υλικού των TDD συστημάτων είναι μειωμένο εξαιτίας αφενός μεν της χρήσης ενός τοπικού ταλαντωτή για τις δύο ζεύξεις, αφετέρου δε της απουσίας του διπλέκτη λόγω της μη ταυτόχρονης ύπαρξης των δύο ζεύξεων στο τερματικό.

Περίληπτικά, χρησιμοποιούμε FDD συστήματα σε περιπτώσεις που θέλουμε κάλυψη μεγάλων αποστάσεων με υψηλή ισχύ εκπομπής και TDD συστήματα σε περιπτώσεις όπου

έχουμε περιορισμένο εύρος ζώνης και πυκνή δομή επαναχρησιμοποίησης. Επίσης το TDD είναι μια πιο επιθυμητή τεχνική αμφιδρόμησης, καθώς επιτρέπει στο χειριστή του δικτύου να εκμεταλλευτεί στο έπακρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, καθώς καλύπτει τις ανάγκες του κάθε χρήστη ξεχωριστά.

1.4 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

Ένα θεμελιώδες αποτέλεσμα της θεωρίας των τηλεπικοινωνιών είναι ότι διαφορετικοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης, όταν τα σήματα τους είναι ορθογώνια μεταξύ, δηλαδή η ετεροσυσχέτιση τους, που δίνει το μέτρο της ομοιότητας τους, είναι μηδενική. Η ορθογωνιότητα των συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των βασικών ιδιοτήτων των σημάτων. Η κατανομή του εύρους ζώνης με απόδοση αποκλειστικών διαύλων καλείται πολλαπλή πρόσβαση. Μια καλή τεχνική μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του συστήματος, να ελαττώσει το κόστος και να καεί τις υπηρεσίες περισσότερο ελκυστικές στους χρήστες. Όσον αφορά τη σχεδίαση της πολλαπλής πρόσβασης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών, υπάρχουν τρεις βασικές παράμετροι: ευελιξία, ποιότητα και χωρητικότητα. Η ευελιξία έχει να κάνει με τη δυνατότητα ολοκληρωμένης κίνησης φωνής, δεδομένων και βίντεο και στη δυνατότητα αντιμετώπισης της περιαγωγής (roaming) του τερματικού. Ποιότητα σημαίνει ικανοποίηση των απαιτήσεων της υπηρεσίας όπως οι περιορισμοί καθυστέρησης και απώλειας πακέτων. Χωρητικότητα σημαίνει ότι ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί για το εύρος ζώνης συχνοτήτων που διατίθεται. Οι τρεις αυτοί στόχοι είναι δύσκολο να επιτευχθούν στα συστήματα κινητών επικοινωνιών λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων και της ύπαρξης του ασυρμάτου μέρους αυτών. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης αποδίδουν αποκλειστικούς διαύλους σε πολλαπλούς χρήστες. Η διαίρεση μπορεί να είναι συχνότητας (FDMA), χρόνου (TDMA), κώδικα (CDMA), χώρου (SDMA) ή συνδυασμοί αυτών.

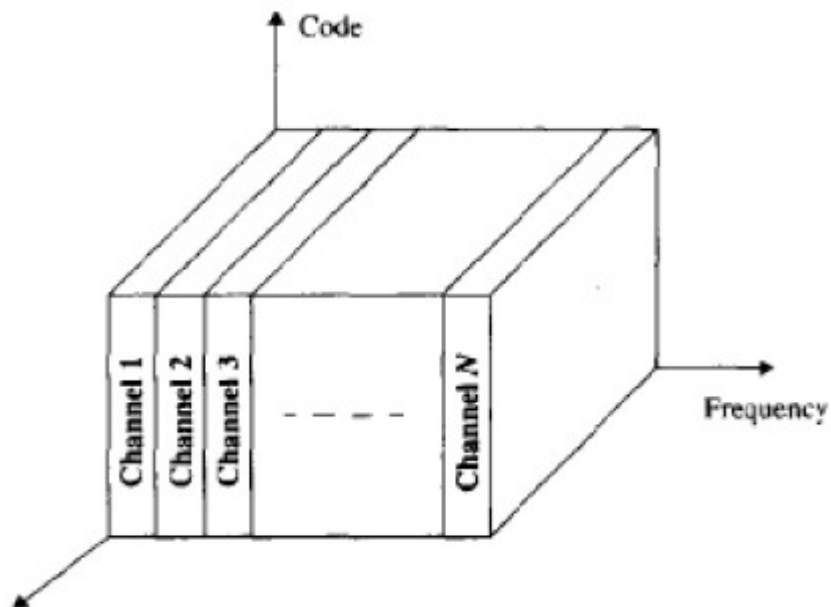
Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με τις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούνται από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών ανά τον κόσμο.

Κυψελωτό σύστημα	Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης
Advanced Mobile Phone System (AMPS)	FDMA/FDD
Global System for Mobile (GSM)	TDMA/FDD
U.S Digital Cellular (USDC)	TDMA/FDD
Digital European Cordless Telephone (DECT)	TDMA/TDD
cdma 2000	CDMA/FDD
UMTS (UTRA-FDD)	WCDMA/FDD
UMTS (UTRA-TDD)	WCDMA/TDD

Πίνακας 1.1: Χρησιμοποιούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών παγκοσμίως. [3]

1.4.1 FDMA

Στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA), εκχωρείται μία μοναδική συχνότητα ή ραδιοδιάυλος σε κάθε χρήστη που θέλει να εξυπηρετηθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.



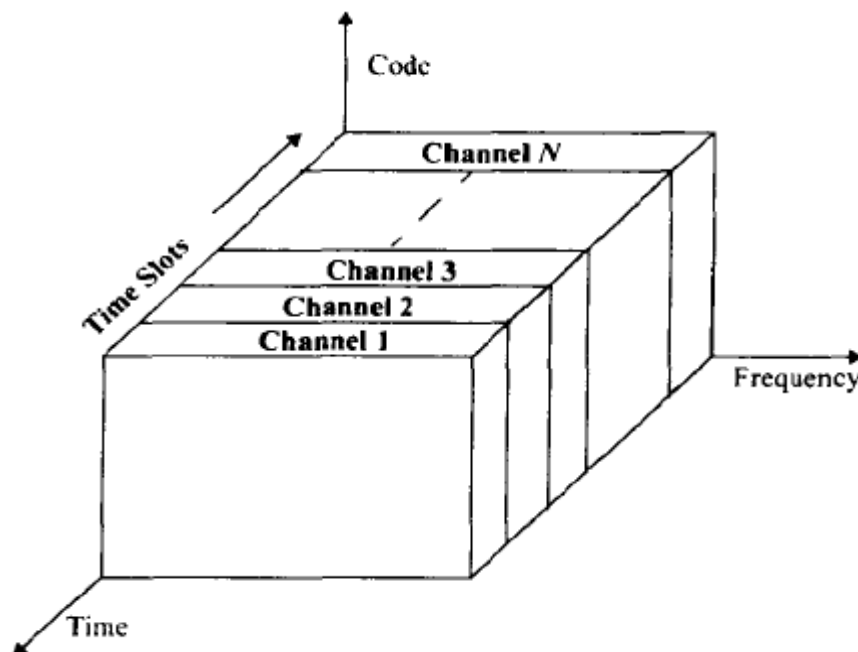
Σχήμα 1.4 FDMA

Ο ραδιοδίαυλος εκχωρείται, ύστερα από αίτηση του χρήστη. Κατά τη διάρκεια της κλήσης, δεν μπορεί άλλος χρήστης να χρησιμοποιήσει τον ίδιο ραδιοδίαυλο. Σε συστήματα με αμφιδρόμηση συχνότητας (FDD), εκχωρείται στους χρήστες ζεύγος συχνοτήτων, μια συχνότητα για κάθε κατεύθυνση. Με αυτή τη σταθερή εκχώρηση, η λογική του ελέγχου είναι πολύ απλή, με αντάλλαγμα όμως τη χαμηλή απόδοση και χωρητικότητα του συστήματος.

Για να βελτιωθεί η χωρητικότητα, εισάγονται οι έννοιες της κυψελωτής/μικροκυψελωτής δομής και της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων, επιτρέποντας έτσι να χρησιμοποιείται ο ίδιος ραδιοδίαυλος σε απομακρυσμένες κυψέλες. Ωστόσο, τα καθοριστικά μειονεκτήματα της FDMA, όπως είναι η χαμηλή απόδοση φάσματος, η αδυναμία της σε βλάβες των διαύλων και η μη αποτελεσματικότητα της σε υπηρεσίες πολυμέσων/πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης, την καθιστούν ακατάλληλη για συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών υψηλής χωρητικότητας. Η πρόσβαση FDMA χρησιμοποιείται κυρίως στα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς. Πρόσφατα χρησιμοποιείται ως βοηθητική της TDMA ή της CDMA με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος, εφαρμόζοντας επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

1.4.2 TDMA

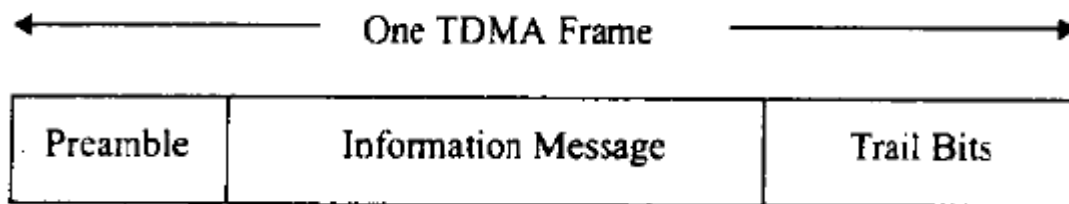
Στα συστήματα που χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA), το διατιθέμενο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές, και σε κάθε χρονοσχισμή επιτρέπεται μόνον σε ένα χρήστη για να εκπέμψει ή να λάβει. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5, κάθε χρήστης καταλαμβάνει μία κυκλικά επαναλαμβανόμενη χρονοσχισμή, οπότε, μια χρονοσχισμή που επαναλαμβάνεται σε κάθε πλαίσιο, μπορεί να θεωρηθεί ως δίαυλος.



Σχήμα 1.5 TDMA

Στον χρήστη που θέλει να επικοινωνήσει, εκχωρείται μία μοναδική χρονοσχιμή στο πλαίσιο TDMA, μέσω του διαύλου ελέγχου. Αυτή η σχισμή μπορεί να κρατηθεί από τον χρήστη μέχρι το τέλος της επικοινωνίας του.

Σε αντίθεση με τα συστήματα FDMA, όπου χρησιμοποιείται αναλογική μετάδοση FM, στα TDMA συστήματα χρησιμοποιούνται ψηφιακά δεδομένα και ψηφιακή διαμόρφωση. Οι μεταδιδόμενες πληροφορίες από διάφορους χρήστες πολυπλέκονται σε ένα επαναλαμβανόμενο πλαίσιο TDMA, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από το προοίμιο (preamble), το μήνυμα πληροφορίας και τον επίλογο (trail bits).



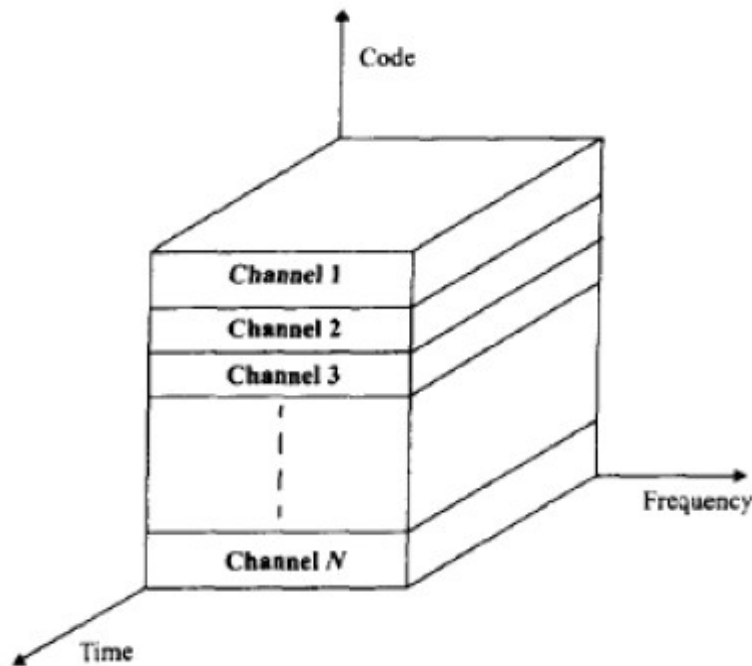
Σχήμα 1.6 Δομή πλαισίου TDMA

Σ' ένα πλαίσιο TDMA, το προοίμιο περιέχει τη διεύθυνση και την πληροφορία συγχρονισμού, την οποία χρησιμοποιούν τόσο ο σταθμός βάσης όσο και το κινητό τερματικό για να αναγνωρίζονται μεταξύ τους. Χρονικές περιόδους ασφαλείας χρησιμοποιούνται μεταξύ των διαφόρων χρονοσχιμών και πλαισίων, για να επιτρέπουν τον συγχρονισμό των δεκτών. Η τεχνική TDMA έχει το πλεονέκτημα ότι είναι δυνατό να διατεθούν διαφορετικοί αριθμοί χρονοσχιμών ανά πλαίσιο στους διάφορους χρήστες. Έτσι, είναι δυνατό να διατεθεί στους διάφορους χρήστες εύρος ζώνης σύμφωνα με την αίτηση τους.

1.4.3 CDMA

Στα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης κώδικα (CDMA), όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο φέρον και μπορεί να μεταδίδουν ταυτόχρονα, ενώ ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί όλο το διατιθέμενο φάσμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. Προς τούτο το στενής ζώνης σήμα πληροφορίας κάθε χρήστη πολλαπλασιάζεται με ένα σήμα πολύ μεγάλου εύρους ζώνης, που ονομάζεται σήμα εξάπλωσης (spreading signal). Το σήμα εξάπλωσης είναι μια κωδική ακολουθία ψευδοθυρόβου, η οποία έχει ρυθμό chip που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από τον ρυθμό bit του σήματος πληροφορίας. Το σήμα πληροφορίας κάθε χρήστη διαμορφώνεται από μία μοναδική κωδική ακολουθία, η οποία καλείται ακολουθία υπογραφής, και έχει ανατεθεί στον υπόψη χρήστη. Έτσι η διάκριση των σημάτων των χρηστών γίνεται με βάση την ακολουθία υπογραφής.

Στην πλευρά του δέκτη, χρησιμοποιείται μια κωδική ακολουθία προσαρμογής για την επανασυμπύεση του εύρους ζώνης και τη λήψη των αρχικών δεδομένων.



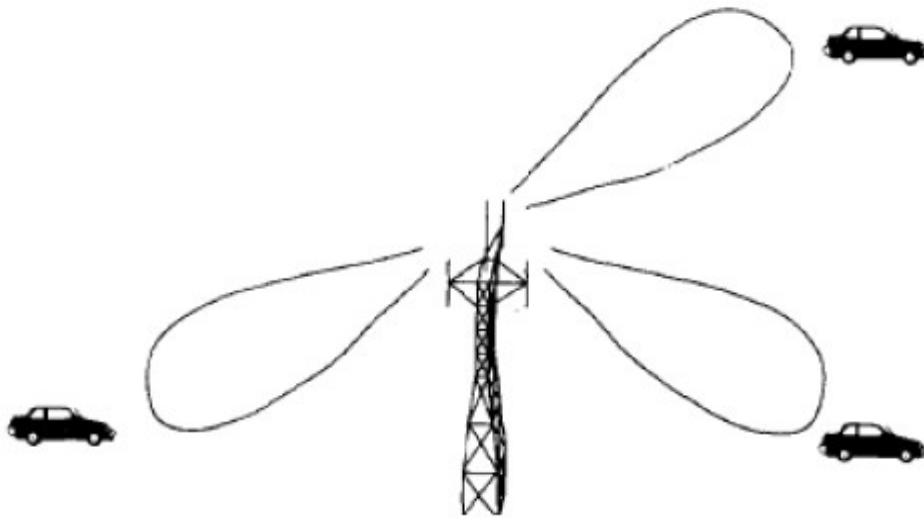
Σχήμα 1.7 CDMA

Με αυτήν τη διαδικασία εξάπλωσης και επανασυμπίεσης όλες οι άλλες ταυτόχρονες μεταδόσεις στον δίαυλο θα δρουν ως πρόσθετη παρεμβολή στο επιθυμητό σήμα και μπορούν να απομακρυνθούν εντελώς, εάν οι κώδικες είναι ορθογώνιοι. Εάν υπάρχουν αρκετοί δέκτες στον σταθμό βάσης, είναι δυνατό να έχουμε πολλαπλές επιτυχείς λήψεις. Η CDMA έχει ήδη υιοθετηθεί για επικοινωνία φωνής, αλλά μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει και μετάδοση δεδομένων. Δεν χρειάζεται συντονισμός μεταξύ των διαφόρων χρηστών.

Η τεχνική CDMA διαθέτει ορισμένα εγγενή χαρακτηριστικά, που την κάνουν πολύ χρήσιμη στις κινητές επικοινωνίες. Πρώτον, στη CDMA χρησιμοποιείται όλο το εύρος ζώνης σε κάθε κυψέλη. Δεύτερον, το εγγενές χαρακτηριστικό του να λαμβάνεται η μέση τιμή των παρεμβολών στη CDMA επιτρέπει τη σχεδίαση συστημάτων με βάση κάποιον μέσο όρο παρεμβολών, γεγονός που εξασφαλίζει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τη σχεδίαση με βάση τη χειρότερη περίπτωση. Τρίτον, η εκμετάλλευση της δραστηριότητας της φωνής και η διαφορική λήψη συχνότητας είναι εγγενή χαρακτηριστικά της CDMA και, επομένως δεν χρειάζεται επιπλέον προσπάθεια για τη χρησιμοποίησή τους, ώστε να βελτιώνεται η απόδοση του φάσματος. Τέταρτον, πιστεύεται ότι είναι δυνατόν να συνυπάρξουν τα συστήματα CDMA με τα υπάρχοντα μικροκυματικά συστήματα Αυτό είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό, ειδικά όταν οι επικαλύψεις είναι αναπόφευκτες. Τέλος, τα συστήματα CDMA προσφέρουν ήπια χαρακτηριστικά ως προς τη χωρητικότητα και τη διαπομπή, γεγονός που τα κάνει προτιμότερα για τις εφαρμογές των κινητών επικοινωνιών.

1.4.4 SDMA

Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (SDMA) ελέγχει την ακτινοβολούμενη ενέργεια από κάθε χρήστη στο χώρο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9, η SDMA εξυπηρετεί διάφορους χρήστες χρησιμοποιώντας κεραίες σημειακής δέσμης. Οι διάφορες περιοχές που καλύπτονται από τις δέσμες της κεραίας μπορεί να εξυπηρετούνται από την ίδια συχνότητα (στα συστήματα TDMA ή CDMA) ή από διαφορετικές συχνότητες (στα συστήματα FDMA). Οι κεραίες με τομείς μπορεί να θεωρηθεί ως πρώτη εφαρμογή της SDMA. Αν χρησιμοποιηθούν προσαρμοστικές κεραίες στους σταθμούς βάσης, θα μπορούσαν να μετριαστούν μερικά από τα προβλήματα της ζεύξης ανόδου. Στην οριακή περίπτωση, που έχουμε δέσμες με ελάχιστο άνοιγμα και δυνατότητα ταχύτατης παρακολούθησης, οι προσαρμοστικές κεραίες υλοποιούν βέλτιστη SDMA παρέχοντας διαύλους ελεύθερους από παρεμβολές. Με την SDMA, όλοι οι χρήστες του συστήματος θα μπορούν να επικοινωνούν την ίδια χρονική στιγμή χρησιμοποιώντας τον ίδιο ραδιοδιάλογο.



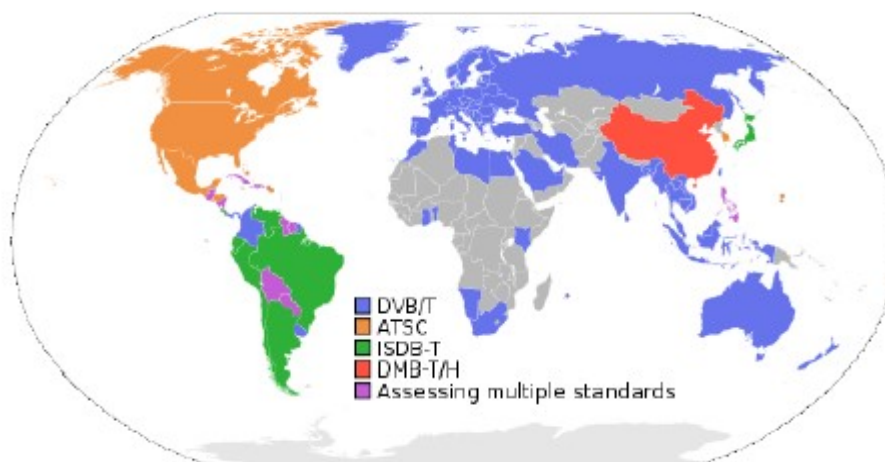
Σχήμα 1.8 SDMA

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-T ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΓΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ

2.1 Μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή εποχή

Τα πρότυπα τηλεοπτικής μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες χώρες ανά τον κόσμο βασίζονται στο πρότυπο NTSC (National Television Systems Committee) που αναπτύχθηκε στις Η.Π.Α το 1953. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 άρχισαν οι προσπάθειες αναβάθμισης των υφιστάμενων προτύπων τηλεοπτικών εκπομπών, με σκοπό να μπορούν να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες που παρείχαν οι σύγχρονοι τηλεοπτικοί δέκτες. Ήδη από το 1987 ξεκίνησε η διαδικασία ανάπτυξης ενός προτύπου για εκπομπές τηλεοπτικού προγράμματος υψηλής ευκρίνειας (High Definition Television – HDTV) στις Η.Π.Α, συμβατού με το NTSC. Στην Ευρώπη, η προσπάθεια αναβάθμισης της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών συνδέθηκε με τη μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση. Αυτή η μετάβαση ήταν ο στόχος της ομάδας έργου DVB (Digital Video Broadcasting) που ιδρύθηκε το 1993 και στην οποία πλέον συμμετέχουν περισσότεροι από 270 κρατικοί και ιδιωτικοί φορείς που δραστηριοποιούνται στον τομέα της εκπομπής τηλεοπτικών προγραμμάτων (διανομείς υπηρεσιών ευρείας εκπομπής, παροχείς δικτυακών υπηρεσιών, εταιρείες ανάπτυξης λογισμικού κ.α.).



Σχήμα 2.1 Τα πρότυπα DVB-T, ATSC και ISDB-T ανά τον κόσμο

Τα ψηφιακά συστήματα ευρυεκπομπής στοχεύουν στην παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών (π.χ ήχος, video) σε πολλαπλούς αποδέκτες, με ελεύθερη λήψη. Σε σχέση με τα αναλογικά δίκτυα ευρυεκπομπής (π.χ αναλογική τηλεόραση, ραδιοφωνία AM/FM) προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τεχνολογίας, τα οποία είναι:

- ψηφιακός ήχος με ποιότητα εφάμιλλη του CD
- μεγαλύτερη ανοχή σε παρεμβολές και διαλείψεις
- μεγαλύτερη κινητικότητα του δέκτη
- αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Με την ψηφιακή τεχνολογία, μπορούν στο φάσμα που χρησιμοποιεί ένα αναλογικό τηλεοπτικό κανάλι να πολυπλεχθούν τέσσερα ψηφιακά κανάλια
- ψηφιακό video υψηλής ανάλυσης
- πρόσθετες υπηρεσίες, όπως οδηγός προγράμματος, υπηρεσίες ενημέρωσης μέσω κειμένου ή στατικής εικόνας
- συνδρομητικές υπηρεσίες. Με κατάλληλες προσθήκες μπορούν να προσφέρουν και διαδραστικές υπηρεσίες.

Η πραγματοποίηση διαδραστικών εφαρμογών απαιτούν την ύπαρξη δύο καναλιών υπηρεσίας, ένα για τη μετάδοση σημάτων από τον πάροχο υπηρεσίας στο χρήστη (κανάλι προώθησης – forward channel) και ένα κατά τη μετάδοση κατά την αντίθετη φορά (κανάλι επιστροφής – reverse path). Με την ύπαρξη του καναλιού επιστροφής, ο χρήστης δεν είναι πλέον παθητικός δέκτης μιας υπηρεσίας, αλλά δρα ενεργά σε μια τεχνολογία που ήταν μέχρι πρότινος κατ' εξοχήν παθητική. Πολυμεσικές υπηρεσίες είναι σε θέση να προσφέρουν και τα σύγχρονα συστήματα προσωπικών επικοινωνιών, με πολύ μεγαλύτερο όμως κόστος για τον πάροχο υπηρεσιών δικτύου, όσο και για το χρήστη.

2.2 Το πρότυπο DVB

Ο σκοπός ίδρυσης του DVB ήταν η ανάπτυξη ενός ευρωπαϊκού προτύπου για την ευρεία διανομή ψηφιακών πολυμέσων και η καθιέρωση του μέσω του ευρωπαϊκού οργανισμού ETSI. Το πρότυπο DVB καθορίζει ποιοτικά κριτήρια για το εκπεμπόμενο τηλεοπτικό σήμα, κάποιες τεχνικές παραμέτρους πομποδεκτών, ώστε αυτοί να πληρούν αυτά τα ποιοτικά κριτήρια καθώς και προδιαγραφές συμβατότητας των πομπών, ενώ τα λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά των δεκτών καθορίζονται από τους κατασκευαστές.

Ο αρχικός στόχος που έθεσε η ομάδα του DVB ήταν η προτυποποίηση ενός συστήματος που να εξασφαλίζει:

- Μετάδοση τηλεοπτικής εικόνας υψηλής ευκρίνειας (HDTV).
- Μετάδοση τηλεοπτικής εικόνας τυπικής ευκρίνειας (SDTV) σε διαύλους στενής ζώνης.
- Λήψη τηλεοπτικού προγράμματος από φορητούς, χαμηλού κόστους δέκτες.
- Λήψη τηλεοπτικού προγράμματος από δέκτες τοποθετημένους σε οχήματα, ακόμα κι αν αυτά κινούνται με υψηλή ταχύτητα.
- Σταθερή ποιότητα υπηρεσίας ακόμα και σε διαύλους με έντονες διαλείψεις και υπό την παρουσία παρεμβολών.
- Σταθερή ποιότητα υπηρεσίας σε μία καλά ορισμένη περιοχή κάλυψης.
- Δυνατότητα διανομής του περιεχομένου από υφιστάμενα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Στην πορεία, το DVB μετεξελίχθηκε σε ένα ολοκληρωμένο πρότυπο για την ευρεία εκπομπή ψηφιακού περιεχομένου. Συγκεκριμένα, από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, οι νέοι στόχοι που έθεσε το DVB ήταν:

- Ο πολλαπλασιασμός των τηλεοπτικών προγραμμάτων που θα μπορούν να μεταδοθούν, στο ίδιο εύρος συχνοτήτων που διατίθεται για εκπομπή ενός προγράμματος αναλογικής τηλεόρασης.
- Η υποστήριξη εκπομπής ραδιοφωνικού προγράμματος.
- Η υποστήριξη δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων (για ενημέρωση, ψυχαγωγία κτλ.).
- Η δυνατότητα μεταβαλλόμενης ποιότητας ήχου και εικόνας.
- Υποστήριξη συνδρομητικών υπηρεσιών.
- Υποστήριξη διαδραστικών υπηρεσιών (απαιτείται η ύπαρξη καναλιού επιστροφής)
- Πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω της τηλεοπτικής συσκευής.

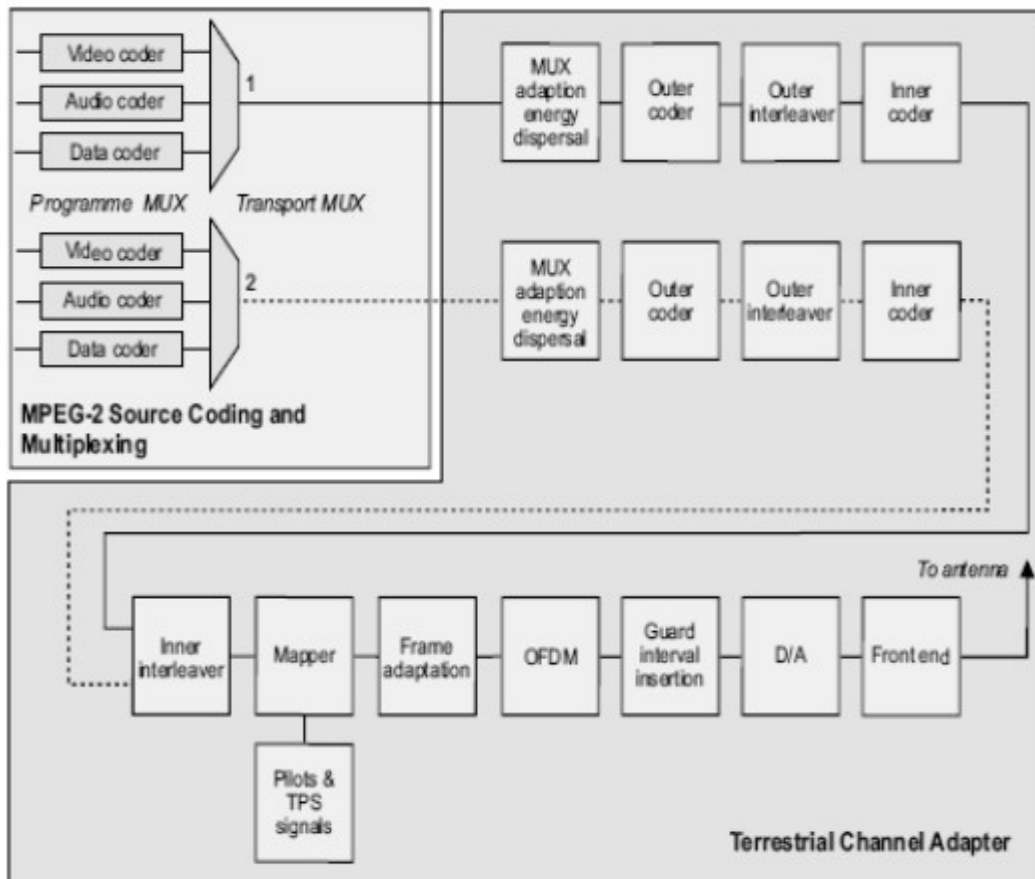
Το έτος 2000 ο στόχος του DVB επαναπροσδιορίστηκε, ώστε πλέον να αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός δικτύου παροχής ψηφιακού περιεχομένου, που να συνδυάζει τη σταθερότητα και τη διαλειτουργικότητα ενός δικτύου ευρείας εκπομπής με τη σθεναρότητα, την καινοτομία και την ποικιλία εφαρμογών του διαδικτύου.

2.3 Το σύστημα DVB-T

Το πρότυπο επίγειας ψηφιακής ευρείας εκπομπής video (DVB-T) σχεδιάστηκε αρχικά για να παρέχει υπηρεσίες σε ακίνητους δέκτες, με κεραία λήψης τοποθετημένη στις οροφές των κτιρίων, όπως συμβαίνει και με την αναλογική τηλεόραση. Ωστόσο, από τις πρώτες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία το 1997, φάνηκε ότι το σύστημα μπορεί να παρέχει υπηρεσίες σε φορητούς δέκτες, σε εσωτερικούς χώρους αλλά και σε κινητούς δέκτες, σε οχήματα εν κινήσει. Το DVB-T αναπτύχθηκε για την εξυπηρέτηση των αναγκών αρκετών χωρών και για αυτό το λόγο είναι ένα ευέλικτο πρότυπο πάνω στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν αρκετές παραλλαγές. Το DVB-T μπορεί να λειτουργήσει με εύρος ζώνης 6, 7 και 8 MHz με τη χρήση COFDM πολυπλεξίας με 1705 φέροντα (σύστημα 2K) ή 6817 φέροντα (σύστημα 8K). Οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται μεταξύ 4,98 και 31,67 Mbps. Η μετάδοση SDTV επιτρέπει την εκπομπή μέχρι και 6 τηλεοπτικών προγραμμάτων στο ίδιο κανάλι. Το DVB-T όπως κι όλη η οικογένεια DVB για κωδικοποίηση/συμπίεση εικόνας και ήχου υιοθετεί τα πρότυπα MPEG-2 και MPEG-4 (Motion Picture Experts Group).

Το δομικό διάγραμμα πομπού φαίνεται στο σχήμα 2.2. Αρχικά, ένας πολυπλέκτης δεδομένων σχηματίζει το σήμα βασικής ζώνης, που είναι μια ροή μεταφοράς (Transport Stream – TS), πολυπλεγμένη και κωδικοποιημένη κατά το πρότυπο MPEG-2. Το DVB δίνει τη δυνατότητα ιεραρχικής μετάδοσης, οπότε μπορεί να υπάρχει ροή δεδομένων υψηλής προτεραιότητας (High Priority – HP) και χαμηλής προτεραιότητας (Low Priority – LP). Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας του σήματος βασικής ζώνης είναι η διασπορά ενέργειας (energy dispersal) που γίνεται, προκειμένου το σήμα να αποκτήσει επίπεδη φασματική πυκνότητα ισχύος. Η διασπορά δημιουργείται με συνδυασμό του σήματος με μια ψευδοτυχαία ακολουθία (σήμα θορύβου), που δημιουργείται από έναν καταχωρητή ολίσθησης με ανάδραση. Η γεννήτρια της ψευδοτυχαίας ακολουθίας αρχικοποιείται κάθε όγδοο πακέτο TS. Από τη διαδικασία αυτή δεν επηρεάζεται το byte συγχρονισμού του TS, ώστε να διατηρηθεί ο συγχρονισμός. Ο αποκωδικοποιητής του δέκτη προσδιορίζει το σημείο έναρξης της ακολουθίας δεδομένων, με βάση ένα ανεστραμμένο byte συγχρονισμού.

Η κωδικοποίηση για πρόσω διόρθωση σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) υλοποιείται σε δύο στάδια: τον εξωτερικό (outer) και τον εσωτερικό (inner) κωδικοποιητή. Ο εξωτερικός κωδικοποιητής είναι ένας μπλόκ κώδικας Reed – Solomon. Για κάθε πακέτο TS, που έχει μήκος 188 bytes, προστίθενται άλλα 51 μηδενικά bytes και στο πακέτο των 239 πλέον bytes προσαρτώνται από τον κωδικοποιητή επιπλέον 16 bytes, ουσιαστικά δηλαδή χρησιμοποιείται ένας (204,186) Reed – Solomon κώδικας. Οι Reed – Solomon κώδικες είναι οι ισχυρότεροι μπλόκ κώδικες, δηλαδή έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων για δεδομένο ρυθμό κωδικοποίησης. Ο συγκεκριμένος κώδικας που χρησιμοποιείται από το πρότυπο DVB-T μπορεί να διορθώσει μέχρι 8 bytes ανά πακέτο δεδομένων, μπορεί δηλαδή να βελτιώσει ένα ρυθμό σφαλμάτων της τάξης των 2×10^{-4} σε 10^{-11} .



Σχήμα 2.2 Δομικό διάγραμμα εκπομπής συστήματος *DVB-T*

Ο εξωτερικός διεμπλοκέας (outer interleaver) αναδιανέμει τα bytes έτσι ώστε να αποφεύγονται τα σφάλματα ριπής. Στο DVB χρησιμοποιείται συνελκτικός διεμπλοκέας, με βάθος διεμπλοκής $I = 12$ και βασική καθυστέρηση $M = 17$. Υλοποιείται με 12 καταχωρητές ολίσθησης που έχουν μήκη $M, 2*M, \dots, (I-1)*M$. Οπότε ανάμεσα από διαδοχικά bytes ο διεμπλοκέας τοποθετεί τουλάχιστον 204 bytes και η συνολική καθυστέρηση είναι $M*(I-1)*I$, για όλα τα σύμβολα.

Ο εσωτερικός κωδικοποιητής είναι ένας συνελκτικός κωδικοποιητής με ρυθμό κωδικοποίησης $\frac{1}{2}$, δηλαδή για κάθε bit πληροφορίας ο κωδικοποιητής παράγει δύο bits στην έξοδο του. Υλοποιείται με έναν καταχωρητή ολίσθησης, στην είσοδο του οποίου τροφοδοτούνται τα bits πληροφορίας, ενώ τα κωδικοποιημένα bits προκύπτουν από συγκεκριμένες θέσεις του καταχωρητή ολίσθησης. Ο ρυθμός κωδικοποίησης $\frac{1}{2}$ προσφέρει αρκετά ισχυρή προστασία από σφάλματα αλλά εισάγει μεγάλο όγκο επιπρόσθετων δεδομένων, μειώνοντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στο 50%. Για το λόγο αυτό με χρήση τεχνικών διάτρητης κωδικοποίησης (punctured coding) μπορούν να προκύψουν διαφορετικοί ρυθμοί κωδικοποίησης από τον ίδιο καταχωρητή ολίσθησης. Αν για παράδειγμα, για κάθε 3 bits που προκύπτουν στην έξοδο του κωδικοποιητή, το 1 bit δεν μεταδίδεται, τότε ο ρυθμός κωδικοποίησης γίνεται $\frac{3}{4}$. Οι διαφορετικοί ρυθμοί κωδικοποίησης που μπορούν να επιτευχθούν με τον τρόπο αυτό σύμφωνα με το πρότυπο DVB-T είναι $\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{5}{6}$ και $\frac{7}{8}$.

2.4 Πολυπλεξία COFDM

Η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM), είναι μία μέθοδος πολυπλεξίας η οποία επιτρέπει τη χρήση 1705 καναλιών (λειτουργία 2K) ή 6817 καναλιών (λειτουργία 8K). Το σύστημα 2K είναι κατάλληλο για λειτουργία ενός πομπού σε μικρά τοπικά δίκτυα με περιορισμένη ισχύ εκπομπής, ενώ το σύστημα 8K μπορεί να τόσο σε μικρά τοπικά δίκτυα, όσο και σε μεγάλης έκτασης δίκτυα μιας συχνότητας (SFNs), διατηρώντας παράλληλα συμβατότητα με το σύστημα 2K.

Το συνολικό σύστημα διαμόρφωσης COFDM, συνδυάζει το OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), με τις ψηφιακές διαμορφώσεις QPSK/QAM. Το OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό καναλιών, στις οποίες "σκορπίζεται" η πληροφορία, ενώ χρησιμοποιείται επίσης με μεγάλη επιτυχία στην ψηφιακή εκπομπή ραδιοφώνου, το λεγόμενο Digital Audio Broadcasting. Το πλεονέκτημα του OFDM, είναι η αντοχή του σε έντονο περιβάλλον ανακλάσεων, όπως είναι αυτό της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), πράγμα που συμβαίνει κατά κόρον στις επίγειες εκπομπές. Λόγω της προαναφερθείσας αντοχής του OFDM, είναι δυνατό να λειτουργήσει ένα δίκτυο αλληλοκαλυπτόμενων πομπών σε μία και μόνη συχνότητα. Στις περιοχές αλληλοκάλυψης το λιγότερο ισχυρό σήμα αντιμετωπίζεται σαν "ηχώ".

Στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση υπάρχουν τρία είδη λειτουργίας:

- Εκπομπή σε ένα αχρησιμοποίητο κανάλι.
- Εκπομπή σε δίκτυο μικρής έκτασης σε μία συχνότητα.
- Εκπομπή σε δίκτυο μεγάλης έκτασης σε μία συχνότητα.

Και τα τρία είδη έχουν λειτουργήσει επιτυχώς, χάριν στο πρότυπο DVB-T.

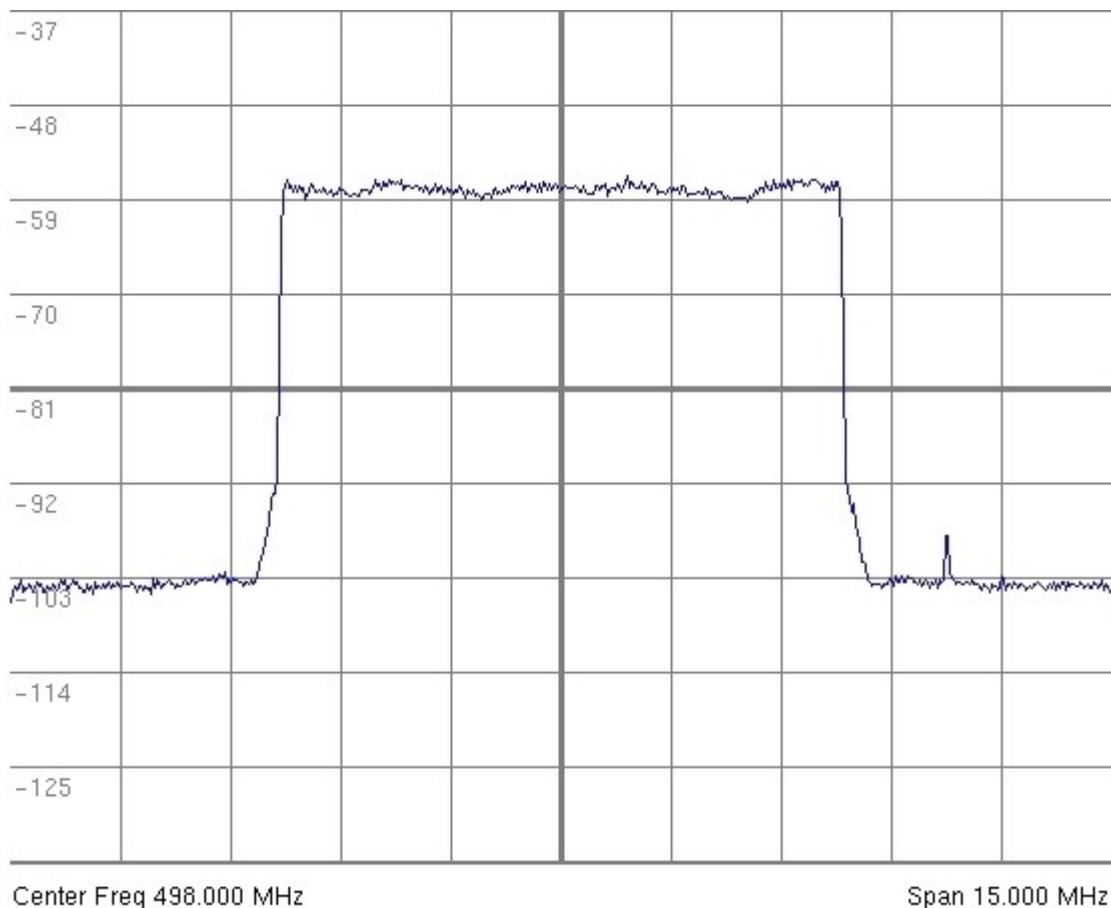
Ο βασικός σκοπός ενός συστήματος COFDM είναι η προσαρμογή των δεδομένων που πρόκειται να εκπεμφθούν, στα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου καναλιού. Η διαμόρφωση αυτή είναι ένα σύστημα παράλληλης εκπομπής, που σημαίνει ότι πολλές ομάδες δεδομένων εκπέμπονται στην ίδια χρονική στιγμή, με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται ορθογώνιες μεταξύ τους, κάτι που επιτυγχάνεται όταν δεν συμβαίνει παρεμβολή μεταξύ τους (Intersymbol Interference). Δυστυχώς αυτό δεν είναι συνήθως εφικτό σε μία επίγεια εκπομπή, γι' αυτό εφαρμόζεται και μια πρόσθετη λειτουργία, αυτή των διαστημάτων φύλαξης μεταξύ των καναλιών.

Το σύστημα χρησιμοποιεί αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) κατά την εκπομπή, κάτι το οποίο είναι και ο λόγος της επιτυχημένης υλοποίησης του συστήματος στην πράξη. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια σειρά από σύμβολα που θέλουμε να μεταδώσουμε, αυτά τα σύμβολα αντιμετωπίζονται σαν σημεία στο πεδίο της συχνότητας ε-

-νός σήματος και ομαδοποιούνται σε N ομάδες N συμβόλων, όπου η κάθε ομάδα αποκαλείται "υπερσύμβολο" (super frame), οπότε πλέον μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος IFFT. Ο αριθμός των καναλιών που πρόκειται να μεταδοθούν, αντιστοιχεί με τον αριθμό των σημείων που επεξεργάζεται ο IFFT. Στη λήψη, δεν έχουμε παρά να εφαρμόσουμε τον ευθύ μετασχηματισμό Fourier (FFT), έτσι ώστε να πάρουμε την αλληλουχία των δεδομένων που μεταδόθηκαν.

Στο πρότυπο αυτού του συστήματος, υπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης 2k και 8k. Στη πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιείται FFT 2048 σημείων, ενώ στην δεύτερη, χρησιμοποιείται FFT 8192 σημείων. Έτσι κι αλλιώς, η χρήσιμη πληροφορία που εκπέμπεται το δευτερόλεπτο, είναι η ίδια και στα δύο συστήματα, απλώς στα 2k, επιβάλλεται περισσότερος διαχωρισμός μεταξύ των καναλιών, που ελαττώνει τις παρεμβολές μεταξύ τους, ενώ στα 8k, εμπλέκεται μεγαλύτερος αριθμός καναλιών, με αποτέλεσμα, η υλοποίηση εξισορρόπησης να είναι πιο εύκολη.

Η απόσταση των διαδοχικών καναλιών στο σύστημα 2k, είναι 4464 Hz ενώ στο 8k, είναι 1116 Hz. Επειδή όμως στο 2k, έχουμε 1705 φέρουσες, βλέπουμε ότι το συνολικό εύρος ζώνης, φθάνει τα 7,61 MHz, κάτι που συμβαδίζει απόλυτα με ένα εύρος καναλιού 8 MHz, όπως στα UHF. Από την άλλη πλευρά, στο σύστημα 8k, έχουμε 6817 φέρουσες, που σημαίνει ότι το συνολικό εύρος ζώνης, είναι και πάλι 7,61 MHz.



Σχήμα 2.3 Φάσμα ενός DVB-T σήματος σε λειτουργία 8K

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τη διαμόρφωση COFDM, είναι δυνατή η λειτουργία δικτύου πομπών, οι οποίοι θα εκπέμπουν σε μία και μόνη συχνότητα, λόγω της ειδικής αντιμετώπισης των πολλαπλών διαδρομών. Εκτός από το συγκεκριμένο πλεονέκτημα, δημιουργείται κι ένα κέρδος (gain), που κυριαρχεί σαν χαρακτηριστικό στο όλο δίκτυο. Αποτέλεσμα αυτού του κέρδους, είναι ότι το κόστος εγκατάστασης του δικτύου, είναι χαμηλότερο, εφόσον απαιτείται λιγότερη ισχύ εκπομπής. Από την άλλη μεριά, υπάρχει κι ένα μειονέκτημα: Δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός του δικτύου που σημαίνει ότι στη περίπτωση τοπικής μετάδοσης, θα απαιτηθεί η κατασκευή δικτύου broadcast.

Το σύστημα COFDM, δεν χρησιμοποιείται μόνο στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, αλλά και στην επίγεια ψηφιακή μετάδοση ραδιοφωνικών προγραμμάτων, το λεγόμενο DAB. Σε αυτό το τομέα, έχει καθοριστεί ένα εύρος καναλιού 1,5 MHz, ενώ ανάλογα με το είδος εκπομπής, δημιουργούνται από 192 έως 1536 υποκανάλια. Μέσα στο συνολικό ρυθμό δεδομένων, μπορούν να μεταδοθούν μέχρι 7 στερεοφωνικά προγράμματα MUSICAM καθώς και πρόσθετες πληροφορίες ή αντίστοιχα, περισσότερα μονοφωνικά προγράμματα ή περισσότερα προγράμματα με χαμηλότερο bit rate το καθένα.

Το βασικό πλεονέκτημα της OFDM σε συστήματα μονού φέροντος (single-carrier), είναι η ικανότητα της να αντιμετωπίζει πολύ δύσκολες καταστάσεις του καναλιού (π.χ εξασθένιση σε υψηλές συχνότητες πάνω σε μεγάλα χάλκινα καλώδια, παρεμβολή στενής ζώνης και επιλεκτική εξασθένιση συχνοτήτων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης) χωρίς τη χρησιμοποίηση σύνθετων φίλτρων εξισορρόπησης. Η εξισορρόπηση του καναλιού απλοποιείται διότι η OFDM μπορεί να θεωρηθεί ότι χρησιμοποιεί πολλά αργά διαμορφωμένα (slowly-modulated) σήματα στενής ζώνης, αντί για ένα ταχέως διαμορφωμένο σήμα ευρείας ζώνης. Ο χαμηλός ρυθμός συμβόλων καθιστά τη χρήση διαστημάτων φύλαξης (guard intervals) μεταξύ των συμβόλων προσιτή. Έτσι γίνεται δυνατό να ελεγχθεί η διασπορά χρόνου και η διασυμβολική παρεμβολή. Αυτός ο μηχανισμός διευκολύνει τον σχεδιασμό δικτύων μονής συχνότητας (SFNs), στα οποία πολλοί γειτονικοί πομποί εκπέμπουν το ίδιο σήμα ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα, καθώς τα σήματα από πολλαπλούς μακρινούς πομπούς μπορούν να συνδυάζονται εποικοδομητικά, αντί να παρεμβάλλει το ένα στο άλλο, όπως θα συνέβαινε σε ένα τυπικό παραδοσιακό σύστημα μονού φέροντος. Επίσης, η πολυδιαδρομική διάδοση, που εμφανίζεται ως "είδωλο" στην αναλογική τηλεόραση, συμπεριφέρεται ως ένα SFN και στο OFDM ή στο COFDM βελτιώνει το λόγο σήμα προς θόρυβο (SNR).

Όσον αφορά τη μαθηματική περιγραφή του OFDM, αν θεωρήσουμε ότι χρησιμοποιούνται N επιμέρους φέροντα και κάθε φέρον διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας M εναλλακτικά σύμβολα, το αλφάβητο των OFDM συμβόλων αποτελείται από M^N συνδυασμένα σύμβολα. Το βαθυπερατό ισοδύναμο OFDM σήμα εκφράζεται ως:

$$\nu(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kt/T}, \quad 0 \leq t < T,$$

όπου $\{X_k\}$ είναι τα σύμβολα των δεδομένων, N είναι ο αριθμός των επιμέρους φερόντων και T είναι ο χρόνος συμβόλου OFDM. Η απόσταση ανάμεσα στα επιμέρους φέροντα $1/T$, τα καθιστά ορθογώνια μεταξύ τους σε κάθε περίοδο συμβόλου, αυτή η ιδιότητα εκφράζεται ως:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T (e^{j2\pi k_1 t/T})^* (e^{j2\pi k_2 t/T}) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi(k_2 - k_1)t/T} dt = \delta_{k_1 k_2} \end{aligned}$$

όπου το (*) είναι για το συζυγή μιγάδα και δ είναι το δέλτα του Kronecker.

Για να αποφευχθεί η διασυμβολική παρεμβολή σε κανάλια που εξασθενούν λόγω πολυδιαδρομικής παρεμβολής (multipath), ένα διάστημα φύλαξης μήκους T_g εισάγεται πριν το μπλόκ του OFDM. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, ένα κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix) μεταδίδεται, έτσι ώστε το σήμα στο διάστημα $-T_g \leq t < 0$ ισούται με το σήμα στο διάστημα $(T-T_g) \leq t < T$. Το OFDM σήμα με κυκλικό πρόθεμα είναι:

$$\nu(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k t/T}, \quad -T_g \leq t < T$$

Το παραπάνω σήμα μπορεί να έχει είτε πραγματικές είτε μιγαδικές τιμές. Τα βαθυπερατά, πραγματικής τιμής, ισοδύναμα σήματα μεταδίδονται συνήθως σε εφαρμογές στη ζώνη βάσης (ενσύρματες), όπως η συμβαίνει στο DSL. Για ασύρματες εφαρμογές, το βαθυπερατό σήμα έχει συνήθως μιγαδική τιμή. Στην περίπτωση αυτή το σήμα μετατρέπεται και αποκτά συχνότητα φέροντος f_c . Γενικά το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} s(t) &= \Re \{ \nu(t) e^{j2\pi f_c t} \} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} |X_k| \cos (2\pi [f_c + k/T]t + \arg[X_k]) \end{aligned}$$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα του OFDM:

- Μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε ακραίες καταστάσεις του καναλιού χωρίς πολύπλοκη εξισορρόπηση στο πεδίου του χρόνου.

- Ανθεκτικό απέναντι σε διακαναλικές παρεμβολές στενής ζώνης.
- Ανθεκτικό στην διασυμβολική παρεμβολή (ISI) και την εξασθένηση λόγω του φαινομένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης.
- Υψηλή φασματική απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα διαμόρφωσης.
- Αποδοτικό επειδή χρησιμοποιεί γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT).
- Χαμηλή ευαισθησία σε σφάλματα συγχρονισμού χρόνου.
- Δεν απαιτούνται φίλτρα συντονισμού στο δέκτη.
- Ευνοεί την ανάπτυξη δικτύων μονής συχνότητας (SFNs).

Ορισμένα μειονεκτήματα του OFDM είναι τα παρακάτω:

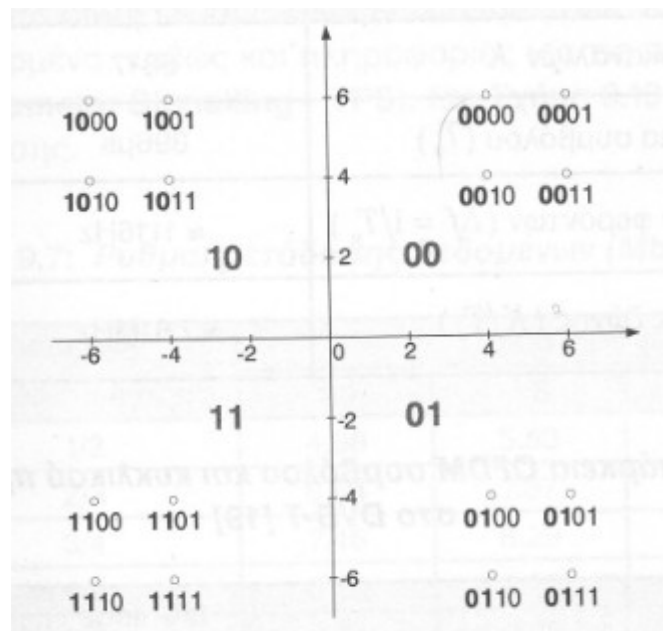
- Ευαίσθητο στη μετατόπιση Doppler (Doppler shift).
- Ευαίσθητο σε προβλήματα συγχρονισμού συχνότητας.
- Υψηλή τιμή του λόγου μέγιστης προς μέση ισχύ (PAPR), η οποία απαιτεί γραμμικό κύκλωμα πομπού, με αποτέλεσμα να πλήττεται από την χαμηλή απόδοση ισχύος.
- Πτώση της αποδοτικότητας η οποία προκαλείται από το κυκλικό πρόθεμα/διάστημα φύλαξης.

Να κλείσουμε την αναφορά μας στο COFDM, αναφέροντας ότι πρόκειται για ένα ιδιαίτερα έξυπνο σύστημα, που μετατρέπει το ελάττωμα των πολλαπλών διαδρομών σε προτέρημα, ενώ η πρακτική του εφαρμογή, επιτρέπεται χάριν στην υλοποίηση του αλγόριθμου FFT σε chip, τόσο για την κωδικοποίηση (IFFT), όσο και για την κατασκευή κατάλληλων δεκτών (set top box), με ανεκτό κόστος για τον καταναλωτή.

2.5 Ιεραρχική Διαμόρφωση

Στο σύστημα DVB – T προβλέπεται η υποστήριξη ιεραρχικής διαμόρφωσης με την οποία αναξάρτητες ροές δεδομένων διαμορφώνονται από κοινού. Η μία καλείται ροή δεδομένων υψηλής προτεραιότητας (High Priority – HP) και ενσωματώνεται στην άλλη, που καλείται χαμηλής προτεραιότητας (Low Priority – LP). Όταν οι συνθήκες λήψης του DVB – T σήματος είναι καλές, ο δέκτης μπορεί να αποδιαμορφώσει και να αποκωδικοποιήσει και τις δύο ροές. Σε δυσμενείς όμως συνθήκες λήψης, μόνο η HP λαμβάνεται επιτυχώς. Οι δύο ροές δεδομένων (HP και LP) μπορεί να αντιστοιχούν σε εντελώς διαφορετικές υπηρεσίες ή σε παρόμοιες, για παράδειγμα μπορεί ένας σταθμός να εκπέμπει HDTV στην LP και SDTV, με το ίδιο περιεχόμενο, στην HP, οπότε όταν οι συνθήκες λήψης το επιτρέπουν, ο τηλεθεατής παρακολουθεί το πρόγραμμα σε HDTV, ενώ σε δυσμενείς συνθήκες λήψης, παρακολουθεί το ίδιο πρόγραμμα σε SDTV. Η LP έχει συνήθως υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, αλλά μεγαλύτερη ευαισθησία σε σφάλματα και παρεμβολές, ενώ η HP μεταδίδεται με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης, όμως είναι περισσότερο ανθεκτική.

Στο σχήμα 2.4 δίδεται ο σηματοστερισμός ενός συστήματος 16-QAM, που υποστηρίζει ιεραρχική διαμόρφωση. Τα σημεία του σηματοστερισμού είναι διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να εμπεριέχεται μια διαμόρφωση QPSK. Συγκεκριμένα τα δύο πιο σημαντικά ψηφία (MSB bits) χρησιμοποιούνται για την HP υπηρεσία (QPSK), ενώ η LP υπηρεσία χρησιμοποιεί και τα τέσσερα bits (16-QAM). Στο σχήμα 2.4 το κάθε τεταρτημόριο αντιστοιχεί σε ένα σημείο της QPSK. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται πως οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων της 16-QAM είναι μειωμένες, αυξάνοντας την πιθανότητα σφάλματος, ώστε να υπάρχουν μεγαλύτερες αποστάσεις των σημείων της QPSK και να μειώνεται έτσι ο ρυθμός σφαλμάτων στην HP.



Σχήμα 2.4 Σηματοστερισμός ιεραρχικής διαμόρφωσης 16-QAM/QPSK

2.6 Δομή Πλαισίου

Το προς μετάδοση σήμα πληροφορίας οργανώνεται σε πλαίσια (frames) και τα πλαίσια ανά τέσσερα, σχηματίζουν ένα υπερπλαίσιο (super frame), όπως αναφέραμε και παραπάνω. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια T_F και περιλαμβάνει 68 σύμβολα OFDM. Κάθε OFDM σύμβολο εμπεριέχει $K=6817$ υπο-κανάλια στο 8K-mode ή $K=1705$ στο 2K-mode και η χρονική του διάρκεια είναι T_s . Διακρίνεται σε δύο μέρη: το χρήσιμο μέρος διάρκειας T_u και το διάστημα φύλαξης που έχει διάρκεια Δ . Το εύρος του κάθε υπο-καναλιού είναι $\Delta f=1/T_u$ και το συνολικό εύρος ζώνης για όλο το OFDM σύμβολο (K υπο-κανάλια OFDM) είναι $(K-1)/T_u$. Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.1. Το διάστημα φύλαξης προηγείται του χρήσιμου μέρους και είναι κυκλική περιοδική επέκταση του χρήσιμου μέρους, γι' αυτό ονομάζεται και κυκλικό πρόθεμα (cyclic prefix), όπως επισημάναμε και προηγουμένως. Η διάρκεια Δ του διαστήματος φύλαξης εκφράζεται ως ποσοστό της διάρκειας του χρήσιμου μέρους και οι πιθανές τιμές του λόγου Δ/T_u είναι 1/4, 1/8, 1/16 και 1/32. Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στον πίνακα 2.1. Όλα τα χρονικά διαστήματα εκφράζονται ως πολλαπλάσια της βασικής χρονικής περιόδου, που για διάυλο 8MHz είναι $T=7/64$ msec.

Λειτουργία	Λειτουργία 8K				Λειτουργία 2K			
Διάστημα φρουρός $\Delta f/T_u$	1/2	1/8	1/16	1/32	1/2	1/8	1/16	1/32
Διάρκεια Συμβόλου εκτός T_u	8 192 × T 896 μs (Σημείωση)				2 048 × T 224 μs (Σημείωση)			
Διάρκεια Διαστήματος Φρουρού Δ	2 048 × T 224 μs	1 024 × T 112 μs	512 × T 56 μs	256 × T 28 μs	512 × T 56 μs	256 × T 28 μs	128 × T 14 μs	64 × T 7 μs
Διάρκεια Συμβόλου $T_s = \Delta + T_u$	10 240 × T 1120 μs	9 216 × T 1008 μs	8 704 × T 952 μs	8 448 × T 924 μs	2 560 × T 280 μs	2 304 × T 252 μs	2 176 × T 238 μs	2 112 × T 231 μs
Σημείωση: Τιμές για κανάλια 8 MHz								

Πίνακας 2.1 Διάρκεια συμβόλου για τα επιτρεπόμενα διαστήματα φρουρός στα 8 MHz

Παράμετρος	Λειτουργία 8K	Λειτουργία 2K
Αριθμός Φερόντων	6 817	1 705
Τιμή του Φέροντος με αριθμό K_{min}	0	0
Τιμή του Φέροντος με αριθμό K_{max}	6 816	1 704
Διάρκεια Συμβόλου T_u	896 μs	224 μs
Απόσταση Φερόντων $1/T_u$	1 116 Hz	4 464 Hz
Απόσταση μεταξύ φερόντων K_{min} και K_{max} $(K-1)/T_u$	7,61 MHz	7,61 MHz
Σημ.1: Οι τιμές με τους πλάγιους χαρακτήρες είναι προσεγγιστικές		
Σημ.2: Οι τιμές είναι για κανάλια 8MHz		

Πίνακας 2.2 Αριθμητικές τιμές των OFDM παραμέτρων

Ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης (2K ή 8K), τη μέθοδο ψηφιακής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, το ρυθμό κωδικοποίησης και τη διάρκεια του διαστήματος φύλαξης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να μεταβάλλεται από 4.98 έως 31.67Mbps. Ακριβείς τιμές για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων δίνονται στον πίνακα 2.3. Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημάνουμε ότι οι ρυθμοί μετάδοσης που παρουσιάζονται αφορούν τη μέγιστη (θεωρητική) χωρητικότητα του συστήματος, ενώ στην πράξη υποβιβάζονται λόγω σφαλμάτων, παρεμβολών κτλ.

Πίνακας 2.3 Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (Mbps)

Available bitrates (Mbit/s) for a DVB-T system in 8 MHz channels					
Modulation	Coding rate	Guard interval			
		1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4.976	5.529	5.855	6.032
	2/3	6.635	7.373	7.806	8.043
	3/4	7.465	8.294	8.782	9.048
	5/6	8.294	9.216	9.758	10.053
	7/8	8.709	9.676	10.246	10.556
16-QAM	1/2	9.953	11.059	11.709	12.064
	2/3	13.271	14.745	15.612	16.086
	3/4	14.929	16.588	17.564	18.096
	5/6	16.588	18.431	19.516	20.107
	7/8	17.418	19.353	20.491	21.112
64-QAM	1/2	14.929	16.588	17.564	18.096
	2/3	19.906	22.118	23.419	24.128
	3/4	22.394	24.882	26.346	27.144
	5/6	24.882	27.647	29.273	30.160
	7/8	26.126	29.029	30.737	31.668

Τα OFDM σύμβολα μέσα σε ένα πλαίσιο είναι αριθμημένα από το 0 έως το 67. Εκτός από τα δεδομένα, ένα πλαίσιο περιλαμβάνει σύμβολα πιλότους (pilots) που χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό και την εκτίμηση του διαύλου και μπορεί να είναι συνεχόμενα ή διεσπαρμένα, καθώς και πληροφορίες για τις παραμέτρους μετάδοσης (Transmission Parameter Signaling – TPS). Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται η δομή ενός πλαισίου μετάδοσης.

Όλα τα σύμβολα πιλότοι έχουν αυξημένη ισχύ (boosted power level) σε σχέση με τα σύμβολα που αντιστοιχούν σε δεδομένα. Αν η κανονικοποιημένη μέση ισχύς των συμβόλων-δεδομένων είναι 1, η κανονικοποιημένη μέση ισχύς των συμβόλων-πιλότων είναι 16/9. Το διασπαρμένο σύμβολο πιλότος του OFDM συμβόλου, με αριθμό 1,

τοποθετείται στα υπο-κανάλια που ο αριθμός τους (k) ανήκει στο σύνολο:

$$\{k = K_{\min} + 3 \cdot (1 \bmod 4) + 12 \mid p \text{ ακέραιος} \geq 0, k \text{ ανήκει } [K_{\min}, K_{\max}]\}$$

δηλαδή p είναι όλοι οι θετικοί ακέραιοι για τους οποίους ο αριθμός k παίρνει τιμές μεταξύ K_{\min} και K_{\max} .

Όπως προαναφέρθηκε, εκτός από τα διασπαρμένα σύμβολα-πλότους, υπάρχουν και συνεχή σύμβολα-πλότοι, που τοποθετούνται στο ίδιο υπο-κάνάλι για όλα τα OFDM σύμβολα. Χρησιμοποιούνται 177 (45) συνεχή σύμβολα-πλότοι στο ρυθμό 8K (2K), τοποθετημένα σε θέσεις που ορίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.4).

Θέσεις συνεχών συμβόλων-πλότων (index number k)								
2K mode								
0	48	54	87	141	156	192	201	255
279	282	333	432	450	483	525	531	618
636	714	759	765	780	804	873	888	918
939	942	969	984	1050	1101	1107	1110	1137
1140	1146	1206	1269	1323	1377	1491	1683	1704
8K mode								
0	48	54	87	141	156	192	201	255
279	282	333	432	450	483	525	531	618
636	714	759	765	780	804	873	888	918
939	942	969	984	1050	1101	1107	1110	1137
1140	1146	1206	1269	1323	1377	1491	1683	1704
1752	1758	1791	1845	1860	1896	1905	1959	1983
1986	2037	2136	2154	2187	2229	2235	2322	2340
2418	2463	2469	2484	2508	2577	2592	2622	2643
2646	2673	2688	2754	2805	2811	2814	2841	2844
2850	2910	2973	3027	3081	3195	3387	3408	3456
3462	3495	3549	3564	3600	3609	3663	3687	3690
3741	3840	3858	3891	3933	3939	4026	4044	4122
4167	4173	4188	4212	4281	4296	4326	4347	4350
4377	4392	4458	4509	4515	4518	4545	4548	4554
4614	4677	4731	4785	4899	5091	5112	5160	5166
5199	5253	5268	5304	5313	5367	5391	5394	5445
5544	5562	5595	5637	5643	5730	5748	5826	5871
5877	5892	5916	5985	6000	6030	6051	6054	6081
6096	6162	6213	6219	6222	6249	6252	6258	6318
6381	6435	6489	6603	6795	6816			

Πίνακας 2.4 Υποκάνάλια που περιέχουν συνεχή σύμβολα πλότους

Η δομή του εκπεμπόμενου πλαισίου, μετά την εισαγωγή των συμβόλων-πilotων, φαίνεται στο σχήμα 2.7



Σχήμα 2.5 Δομή εκπεμπόμενου πλαισίου

3.7 Ιδιότητες και χαρακτηριστικά του εκπεμπόμενου σήματος

Το εκπεμπόμενο OFDM σήμα μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$s(t') = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t'} \sum_{k=k_{min}}^{k=k_{max}} c_{m,l-1,k} e^{j2\pi k'(t'-\Delta)/T_u} \right\}$$

Όπου t' είναι ο χρόνος κατά τον οποίον ξεκινά η περίοδος εκπομπής των συμβόλων, T είναι η στοιχειώδης περίοδος. Το k δηλώνει τον αριθμό της εκάστοτε φέρουσας, το l είναι ο αριθμός του OFDM συμβόλου, το m είναι ο αριθμός του εκπεμπόμενου πλαισίου, το K είναι ο αριθμός των μεταδιδόμενων φερόντων (1705 για τη 2K λειτουργία και 6817 για την 8K λειτουργία), T_u είναι η χρήσιμη διάρκεια του OFDM συμβόλου. Το Δ είναι η διάρκεια του διαστήματος φύλαξης, που προστατεύει το σήμα από διασυμβολική παρεμβολή.

Το $T_s = T_u + \Delta$ είναι η συνολική διάρκεια του OFDM συμβόλου, f_c είναι η κεντρική συχνότητα του RF σήματος, K_{min} είναι ο δείκτης της φέρουσας με τη χαμηλότερη συχνότητα (0 και στις δύο λειτουργίες), αντίστοιχα το K_{max} είναι ο δείκτης της φέρουσας με τη μεγαλύτερη συχνότητα (1704 για τη λειτουργία 2K και 6816 για τη λειτουργία 8K). Το k' είναι ο αριθμός της φέρουσας κανονικοποιημένος ως προς την κεντρική συχνότητα και δίνεται από τον τύπο:

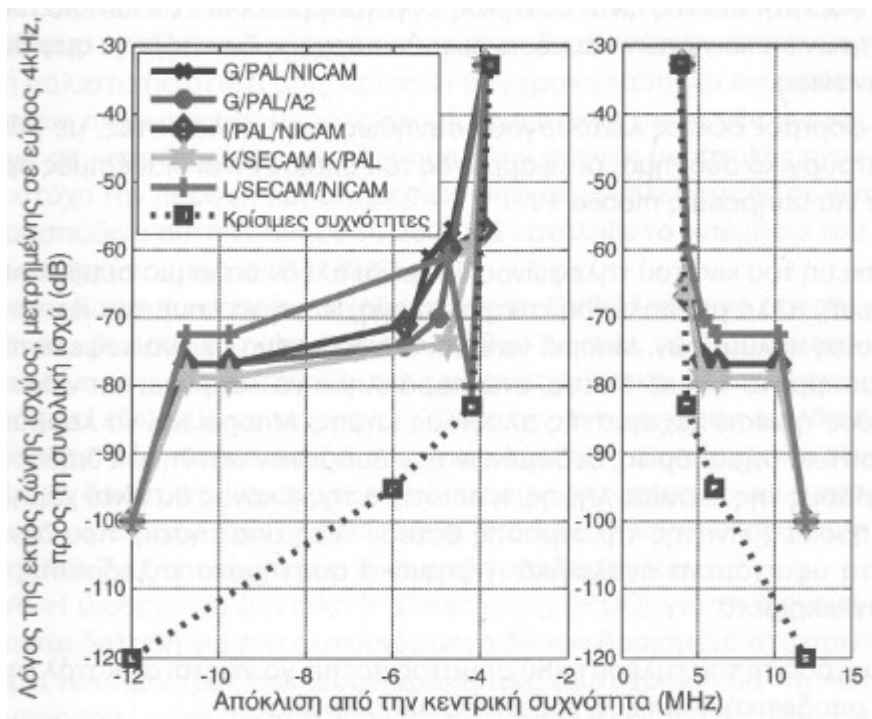
$$k' = k - \left(\frac{K_{max} - K_{min}}{2} \right)$$

Τέλος το $c_{m,i-1,k}$ είναι το μιγαδικό σύμβολο που μεταδίδεται στο k -οστό φέρον, στο σύμβολο με αριθμό l , του πλαισίου με αριθμό m . Το κάθε φέρον μπορεί να διαμορφωθεί είτε με QPSK, 16-QAM είτε με 64-QAM.

Λόγω του ότι η συνολική διάρκεια του OFDM σήματος είναι μεγαλύτερη από το αντίστροφο της απόστασης Δf των κεντρικών συχνοτήτων δύο διαδοχικών υπο-καναλιών, το εύρος του κύριου λοβού για κάθε κανάλι είναι διπλάσιο του Δf , οπότε φασματική πυκνότητα ισχύος δεν είναι σταθερή σε όλο το εύρος ζώνης. Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να είναι 6, 7, ή 8 MHz.

Επειδή τα κανάλια ψηφιακής τηλεόρασης λειτουργούν σε συχνότητες όπου ήδη υπάρχουν αναλογικές εκπομπές, η εκπεμπόμενη ισχύς, εκτός του ονομαστικού εύρους ζώνης, πρέπει να είναι περιορισμένη. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός φίλτρου-μάσκας, το οποίο καθορίζεται από το πρότυπο και απεικονίζεται στο σχήμα 2.5. Οι τιμές που απεικονίζονται εξαρτώνται από το πρότυπο τηλεοπτικής εικόνας που χρησιμοποιείται, ενώ υποθέτουμε ότι οι πομποί ψηφιακής και αναλογικής τηλεόρασης είναι τοποθετημένοι στον ίδιο χώρο και εκπέμπουν την ίδια ισχύ, ενώ δεν χρησιμοποιούν διαφορετική πόλωση για διαχωρισμό των σημάτων τους. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται επίσης κι προδιαγραφή που ισχύει για κρίσιμες συχνότητες, δηλαδή για περιπτώσεις όπου σε γειτονικές συχνότητες υπάρχουν άλλες υπηρεσίες με χαμηλή ισχύ, οπότε κι η προδιαγραφή για τις εκτός ζώνης εκπομπές είναι πολύ αυστηρότερη. Οι κεντρικές ραδιοσυχνότητες εκπομπής για κανάλια επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης εύρους 8MHz δίνονται από τη σχέση:

$$f_c^{(l)} = 470 \text{ MHz} + 4 \text{ MHz} + i_1 * 8 \text{ MHz}, \quad i_1=0,1,2,\dots$$



Σχήμα 3.6 Φασματική "μάσκα" για εκπομπές επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης

2.8 Δίκτυα Μονής Συχνότητας (Single Frequency Networks - SFN)

Τα συμβατικά – αναλογικά – δίκτυα ευρείας εκπομπής χρησιμοποιούν πολλούς πομπούς με διαφορετικές συχνότητες, προκειμένου να καλύψουν την περιοχή λειτουργίας τους. Τα δίκτυα αυτά αναφέρονται ως δίκτυα πολλών συχνοτήτων (Multi-Frequency Networks – MFN). Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου αφού γίνουν οι αρχικές μελέτες ραδιοκάλυψης, επιλέγονται οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση των σταθμών εκπομπής, ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατό καλύτερη κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Γειτονικοί σταθμοί εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες, ώστε στις περιοχές κάλυψης να μην δημιουργείται πρόβλημα παρεμβολών. Απαιτείται λοιπόν μία μελέτη για τη σωστή αξιοποίηση του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων, ώστε οι συχνότητες που χρησιμοποιεί ο κάθε σταθμός ενός δικτύου να είναι εναρμονισμένες με τις συχνότητες των άλλων δικτύων που λειτουργούν στην ίδια περιοχή, αλλά και με σταθμούς του ίδιου δικτύου που λειτουργούν σε – τηλεπικοινωνιακά – όμορους νομούς. Το γεγονός αυτό καθιστά τη σχεδίαση και ανάπτυξη των MFN δικτύων μία πολύπλοκη διαδικασία, αφού προϋποθέτει από κοινού σχεδιασμό και διαχείριση συχνοτήτων για όλα τα δίκτυα που συνυπάρχουν σε μια περιοχή. Επιπλέον, προκειμένου να επεκταθεί το δίκτυο ή να βελτιωθούν οι συνθήκες λήψης του ραδιοσήματος σε περιοχές που υπάρχουν έντονα φαινόμενα σκίασης, απαιτείται η τοποθέτηση νέων πομπών και επανασχεδιασμός συχνοτήτων. Επίσης, προκειμένου για λήψη εν κινήσει, θα πρέπει οι κινούμενοι δέκτες να συντονίζονται σε διαφορετική συχνότητα, όταν μετακινούνται, για να εξακολουθούν να λαμβάνουν το ίδιο πρόγραμμα από εναλλακτικούς πομπούς του ίδιου δικτύου, που εκπέμπουν σε διαφορετική συχνότητα.

Τα προβλήματα αυτά στα σύγχρονα ψηφιακά δίκτυα αντιμετωπίζονται με τη χρήση δικτύων μονής συχνότητας (Single Frequency Networks – SFN) στα οποία όλοι οι πομποί ενός δικτύου εκπέμπουν στην ίδια ραδιοσυχνότητα, το ίδιο σήμα σε όλη την περιοχή κάλυψης. Έτσι δεν υπάρχουν απαιτήσεις σχεδιασμού και εναρμόνισης συχνοτήτων, αφού μία εκχωρείται σε ένα δίκτυο για όλη την περιοχή κάλυψης του, ενώ ένας κινούμενος δέκτης παραμένει συντονισμένος σε μία μόνο συχνότητα στην οποία λαμβάνει, κατά τη διαδρομή του το ίδιο πρόγραμμα. Για την απρόσκοπτη λειτουργία αυτών των δικτύων τίθενται διάφορες απαιτήσεις στο στρώμα δικτύου, που αντιμετωπίζονται με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών.

3.8.1 Σχεδίαση και λειτουργία δικτύων SFN

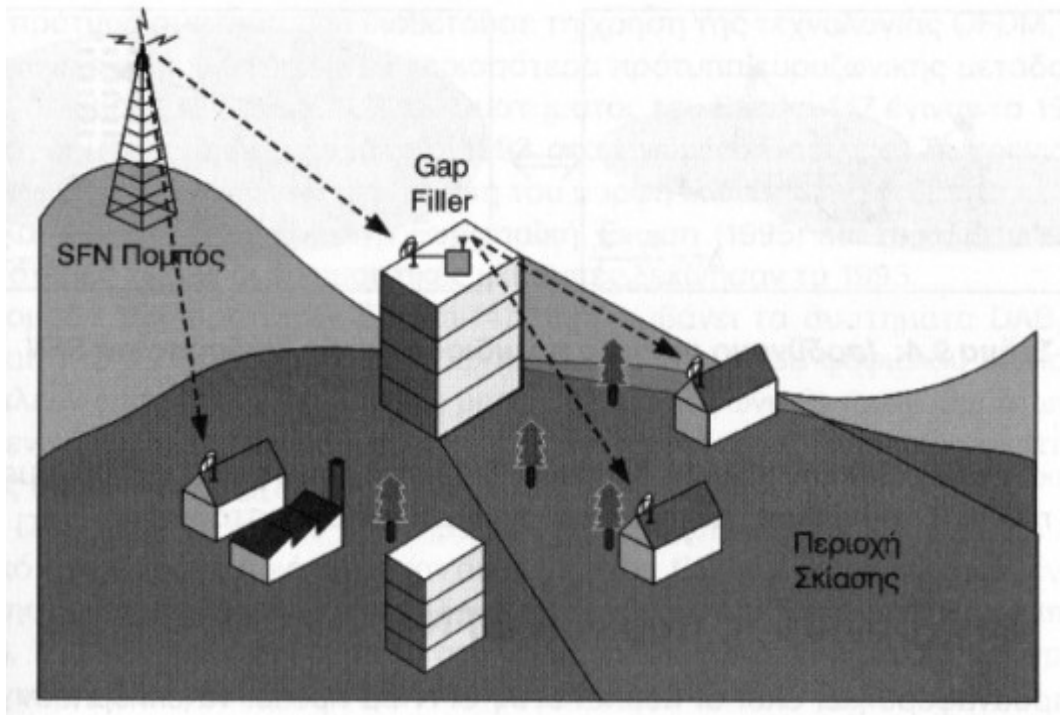
Όπως προαναφέρθηκε ένα, προφανές πλεονέκτημα των δικτύων μονής συχνότητας είναι η ευκολία σχεδιασμού και υλοποίησής τους, αφού δεν υπάρχει ανάγκη κατανομής και διαχείρισης συχνοτήτων: Σε κάθε SFN εκχωρείται μια συχνότητα την οποία χρησιμοποιεί σε όλη την περιοχή όπου το δίκτυο αυτό παρέχει υπηρεσίες.

Σε κάθε σημείο της περιοχής λειτουργίας ενός SFN, ένας δέκτης λαμβάνει το ίδιο σήμα από πολλούς πομπούς του δικτύου. Επειδή τα σήματα αυτά φτάνουν στο δέκτη ακολουθώντας

διαφορετικές διαδρομές, οι διαλείψεις που υφίστανται είναι εν γένει ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Έτσι περιοχές όπου, για οποιοδήποτε λόγο, το σήμα που λαμβάνει ένας δέκτης από κάποιο αναμεταδότη έχει χαμηλή ισχύ, καλύπτονται από γειτονικούς αναμεταδότες του SFN. Ο δέκτης λοιπόν μπορεί να επιλέγει το ισχυρότερο σήμα που λαμβάνει. Αυτό συμβαίνει και στο σύστημα RDS (Radio Data System) της αναλογικής ραδιοφωνίας στα FM, με τη διαφορά ότι εκεί ο δέκτης θα πρέπει κάθε φορά να συντονίζεται στη συχνότητα εκπομπής εκείνου του αναμεταδότη που εξασφαλίζει τις καλύτερες συνθήκες λήψης. Αυτό όμως προϋποθέτει και την ύπαρξη δύο διαφορετικών RF αλυσίδων λήψης. Σε ένα SFN δεν απαιτείται εκ νέου συντονισμός κι έτσι επιτυγχάνεται ουσιαστικά διαφορεική λήψη στην ίδια όμως συχνότητα (on-frequency diversity). Δηλαδή, θεωρώντας το σύνολο των αναμεταδοτών του SFN, η επιτυγχανόμενη ραδιο-κάλυψη είναι καλύτερη από το άθροισμα των καλύψεων που παρέχει ο κάθε αναμεταδότης. Το γεγονός αυτό αναφέρεται ως κέρδος δικτύου.

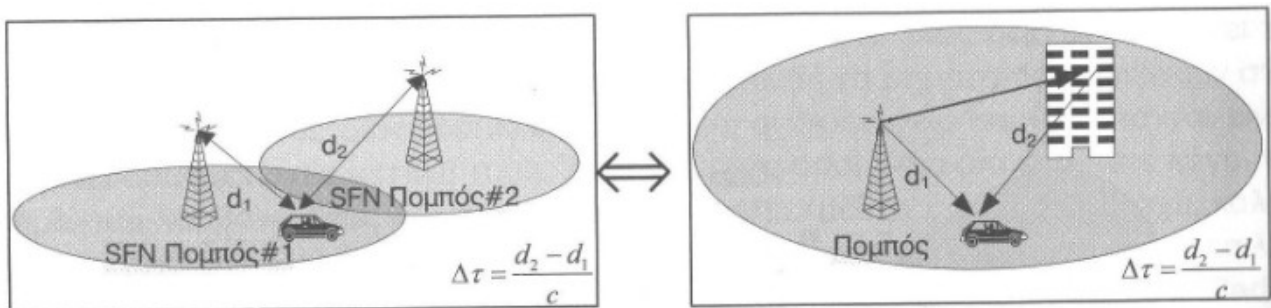
Ένα ακόμα σημαντικότερο πλεονέκτημα που απορρέει από τη δομή των SFNs είναι η ευκολία επέκτασης τους και η δυνατότητα εύκολης αντιμετώπισης προβλημάτων σκίασης. Στα συμβατικά δίκτυα (MFNs) προκειμένου να επεκταθεί η περιοχή κάλυψης του δικτύου απαιτείται η χρήση αναμεταδοτών στους οποίους πρέπει να εκχωρηθούν νέες συχνότητες εκπομπής, άρα απαιτείται σωστή διαχείριση του φάσματος ώστε η παρεμβολή που δέχεται ο νέος πομπός, αλλά και αυτή που προκαλεί στους υφιστάμενους πομπούς, να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Στα SFN αρκεί απλά η τοποθέτηση ενός νέου πομπού, συγχρονισμένου με τους υπόλοιπους πομπούς του ίδιου SFN, που θα εκπέμπει στην ίδια συχνότητα, αυτή του SFN. Ο πομπός αυτός που χρησιμοποιείται για να επεκτείνει την περιοχή κάλυψης του SFN ονομάζεται Coverage Extender.

Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να αντιμετωπιστούν προβλήματα στη λήψη που οφείλονται σε σκίαση: ένας αναμεταδότης τοποθετείται σε κάποιο σημείο που να εξασφαλίζει οπτική επαφή με έναν αναμεταδότη του SFN αλλά και με την περιοχή όπου η λήψη δεν είναι καλή λόγω σκίασης. Ο αναμεταδότης λαμβάνει το σήμα από τον πομπό του SFN και το επανεκπέμπει προς την περιοχή που θέλει να καλύψει, με χαμηλή ισχύ ώστε να μην επηρεάζει το υπόλοιπο δίκτυο (όπως στο σχήμα 3.7). Οι αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό ονομάζονται Gap Fillers. Οι αναμεταδότες αυτοί ουσιαστικά ενισχύουν το σήμα που λαμβάνουν από τον κύριο αναμεταδότη του SFN. Κανονικά, ο αναμεταδότης θα έπρεπε να μετατρέπει το RF σήμα που λαμβάνει σε συχνότητες IF ή ακόμα και στη βασική ζώνη και να μετά να το μετατρέπει εκ νέου σε RF και να το επανεκπέμπει. Όλες αυτές οι διαδικασίες όμως θα εισήγαγαν χρονική καθυστέρηση μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να αντιμετωπίσει το δίκτυο, γι' αυτό αποφεύγονται κι η αναμετάδοση γίνεται απευθείας σε RF, χωρίς να μεσολαβεί αλλαγή συχνότητας. Συνήθως, χρησιμοποιείται κατευθυντική κεραία για την όσο το δυνατό καλύτερη λήψη του σήματος από τον κύριο αναμεταδότη του SFN. Επιπλέον, χρειάζεται προσοχή κατά την εγκατάσταση των κεραιών εκπομπής και λήψης του Gap Filler, ώστε να μην υπάρχουν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης τους. Τέλος, αν στην περιοχή συνυπάρχουν πολλά SFNs, απαιτείται η χρήση κατάλληλων φίλτρων ώστε ο Gap Filler να επανεκπέμπει μόνο το σήμα του δικτύου στο οποίο ανήκει.



Σχήμα 3.7 Λειτουργία του Gap Filler

Όταν ένας δέκτης βρίσκεται μεταξύ δύο σταθμών εκπομπής, τότε λαμβάνει ένα ισχυρό σήμα από τον κοντινότερο και εξασθενημένα σήματα που φτάνουν στο δέκτη από πιο απομακρυσμένους πομπούς. Τα εξασθενημένα αυτά σήματα, επειδή έχουν διανύσει μεγαλύτερες αποστάσεις, φτάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση σε σχέση με το πρώτο, η οποία εξαρτάται από τις αποστάσεις μεταξύ των πομπών του SFN. Επειδή το σήμα που εκπέμπουν όλοι οι πομποί είναι ακριβώς το ίδιο, το εξασθενημένο και καθυστερημένο σήμα που φτάνει στο δέκτη από τον πιο απομακρυσμένο πομπό, ο δέκτης το αντιλαμβάνεται σαν "ηχώ" (echo) του πρώτου σήματος που έφτασε σε αυτόν μέσω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Έτσι λοιπόν, υπάρχει η κατάσταση που απεικονίζεται στο σχήμα 3.8 (όπου για απλούστευση θεωρούμε την ύπαρξη μόνο δύο πομπών) και αντιστοιχεί αντιστοιχεί σε ένα μοντέλο διαύλου πολυδιαδρομικής διάδοσης δύο ακτίνων, με καθυστέρηση $\Delta\tau = (d_2 - d_1)/c$, όπου c η ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 3.8 Ισοδύναμο μοντέλο πολυδιαδρομικής διάδοσης για SFN

Η χρονική αυτή καθυστέρηση παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές, αφού οι αποστάσεις μεταξύ των πομπών είναι της τάξης των μερικών χιλιομέτρων. Για την αντιμετώπιση αυτής της μεγάλης χρονικής διασποράς του διαύλου που προκαλεί ισχυρή διασυμβολική παρεμβολή, απαιτείται η χρήση κατάλληλων ισοσταθμιστών, οι οποίοι έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα, ή η χρήση των τεχνικών που μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά σε περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης, όπως είναι η CDMA με δέκτη RAKE ή η OFDM που απλοποιεί κατά πολύ τη διαδικασία ισοστάθμισης.

3.8.2 Συγχρονισμός πομπών SFN

Όπως προαναφέρθηκε, όλοι οι πομποί ενός SFN θα πρέπει να εκπέμπουν το ίδιο σήμα, στην ίδια συχνότητα, την ίδια χρονική στιγμή, άρα θα πρέπει να είναι τέλεια συγχρονισμένοι. Συνήθως, ένα SFN χρησιμοποιεί τεχνολογία OFDM, οπότε αποκλίσεις στις ράδιο-συχνότητες που εκπέμπουν οι πομποί δημιουργούν απώλεια ορθογωνιότητας μεταξύ των OFDM υποκαναλιών και μειώνουν την ανοχή του συστήματος σε φαινόμενα ολίσθησης συχνότητας, λόγω φαινομένου Doppler. Συνήθως, σε ένα SFN θα πρέπει οι ραδιοσυχνότητες εκπομπής να μην αποκλίνουν από την ονομαστική τους τιμή περισσότερο του 1% του εύρους των OFDM υποκαναλιών, ενώ το μέγιστο χρονικό σφάλμα δε θα πρέπει να υπερβαίνει το 3-5% του διαστήματος φύλαξης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η πιθανή χρονική απόκλιση μεταξύ των πομπών υπερτίθεται στην καθυστέρηση διάδοσης και επιμηκύνεται η φαινομενική μέγιστη χρονική καθυστέρηση διάδοσης. Έτσι ουσιαστικά είναι σαν να μειώνεται το μήκος του διαστήματος φύλαξης, άρα και η μέγιστη επιτρεπτή απόσταση μεταξύ των πομπών. Επομένως, το σφάλμα συγχρονισμού των πομπών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του SFN. Ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται, συνήθως, χρησιμοποιώντας ως αναφορά το δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GPS (Global Positioning System), το οποίο παρέχει αρκετή ακρίβεια για το σκοπό αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE FDD ΚΑΙ LTE TDD

3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G).

Στα σημερινά ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, ένα μεγάλο και συνεχώς αυξανόμενο μέρος της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αφορά υπηρεσίες δεδομένων και τα πρώτα σημάδια του κινητού διαδικτύου έχουν ήδη φανεί. Η δημοτικότητα των υπηρεσιών δεδομένων αυξάνει διαρκώς και στο μέλλον οι υπηρεσίες αυτές θα επικρατήσουν των υπηρεσιών φωνής. Επιπρόσθετα, με την εισαγωγή των συστημάτων 3^{ης} γενιάς οι συνδρομητές του κινητού Διαδικτύου θα συνεχίσουν να αυξάνουν.

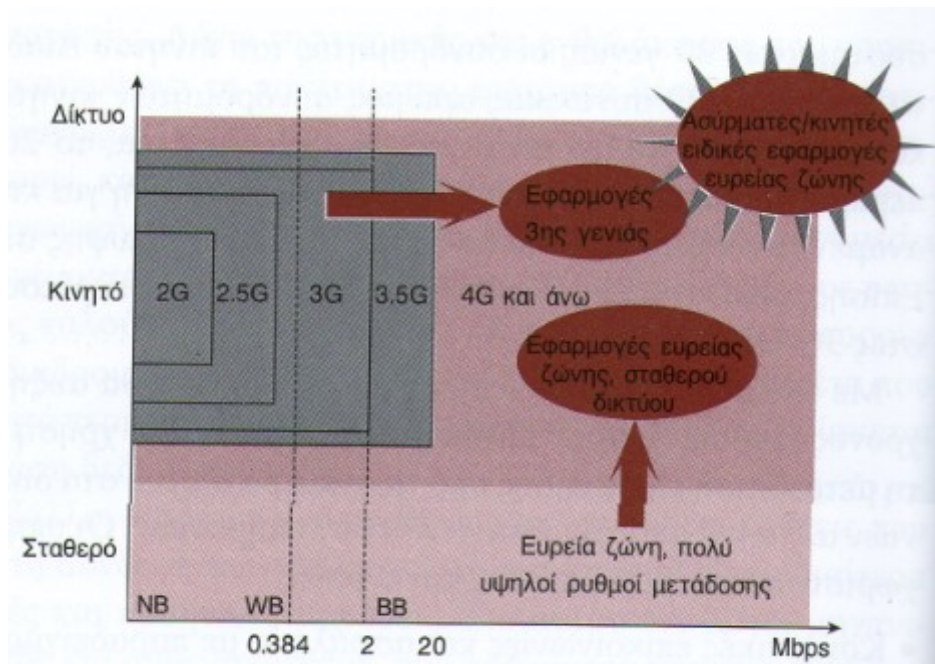
Πέραν από την ανάπτυξη των συστημάτων 3G είναι τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς (4G). Πιστεύεται ότι τα συστήματα 4G θα βασιστούν στα συστήματα 3G και στις εξελιγμένες εκδοχές τους. Ένα πεδίο εφαρμογών, που δικαιολογεί την ανάπτυξη συστημάτων 4G, είναι οι εφαρμογές νοητής πραγματικότητας, οι οποίες απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και στην ασύρματη διεπαφή και στο σταθερό δίκτυο. Τα θέματα της ασύρματης διεπαφής, τα ad hoc δίκτυα και τα δίκτυα πολλαπλών βημάτων χρησιμοποιούνται ως παραδείγματα στην έρευνα για τα συστήματα 4G.

Στις σύγχρονες ερευνητικές δραστηριότητες συμπεριλαμβάνεται και η ανάπτυξη του πλαισίου εργασίας για τα δίκτυα 4G. Υπάρχουν πολλά ερευνητικά προγράμματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά των δικτύων 4G και τις εφαρμογές τους. Μερικά κύρια χαρακτηριστικά (κυρίως από τη σκοπιά του χρήστη) για τα δίκτυα 4G μπορεί να είναι τα εξής:

- Υψηλή χρησιμοποίηση: οποτεδήποτε, οπουδήποτε και με οποιαδήποτε τεχνολογία.
- Υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων με χαμηλό κόστος μετάδοσης.
- Προσωποποίηση των υπηρεσιών
- Ολοκληρωμένες υπηρεσίες.

Με την ευρύτερη ερμηνεία, παρατηρούμε τη συγκλίνουσα τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία να προχωρά προσθέτοντας το Διαδίκτυο και πολλαπλές υπηρεσίες στην ασύρματη επικοινωνία και στην κινητικότητα. Αναπτύσσονται νέες εφαρμογές, οι οποίες εκμεταλλεύονται το πλεονέκτημα του συνδυασμού υψηλών ρυθμών μετάδοσης και κινητικότητας, όπως

φαίνεται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1 Εξέλιξη των εφαρμογών προς την 4^η γενιά

3.1.1 Χαρακτηριστικά δικτύων τέταρτης γενιάς (4G)

Προκείμενου τα συστήματα κινητών επικοινωνιών τέταρτης γενιάς να μπορούν να υποστηρίξουν τις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις νέων υπηρεσιών καθώς και την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service), θα πρέπει να επιτύχουν ορισμένους πολύ σημαντικούς στόχους. Πρώτον, όλα τα δίκτυα 4G είναι ετερογενή δίκτυα βασισμένα στο IP και επιτρέπουν στους χρήστες να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε σύστημα, οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Χρήστες που διαθέτουν ολοκληρωμένα τερματικά μπορεί να χρησιμοποιούν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που παρέχονται από πολλαπλά ασύρματα δίκτυα. Δεύτερον, τα δίκτυα 4G δεν παρέχουν μόνο τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αλλά επίσης υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων. Για την υποστήριξη των εφαρμογών πολυμέσων, παρέχονται υπηρεσίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης και με καλή αξιοπιστία. Ταυτόχρονα, επιδιώκεται να διατηρείται χαμηλό το κόστος μετάδοσης. Τρίτον, τα συστήματα νέας γενιάς θα παρέχουν προσωποποιημένες υπηρεσίες. Αναμένεται ότι με την έλευση των συστημάτων 4G, χρήστες από διάσπαρτες γεωγραφικές περιοχές, με διαφορετικά επαγγέλματα και οικονομικές δυνατότητες θα χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του. Για την ικανοποίηση των ετερόκλητων αυτών χρηστών, οι πάροχοι υπηρεσιών θα πρέπει να σχεδιάσουν προσωπικές υπηρεσίες προσαρμοσμένες στους χρήστες. Τέλος, τα συστήματα 4G θα παρέχουν επίσης υποδομή για ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Οι χρήστες θα μπορούν να χρησιμοποιούν πολλαπλές υπηρεσίες από οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσίας ταυτόχρονα.

3.1.2 Σύγκριση συστημάτων τρίτης (3G) και τέταρτης γενιάς (4G)

Προς το παρόν ερευνώνται διάφορα θέματα και είναι ακόμα ασαφές ποια θα είναι ακριβώς τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων 4G, αφού μάλιστα δεν έχει ολοκληρωθεί η πλήρης ανάπτυξη των συστημάτων 3G. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν αρκετοί και σημαντικοί λόγοι για τους οποίους θα πρέπει να επιστευθεί η ανάπτυξη της τεχνολογίας 4G. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς φαίνονται παρακάτω.

- Τα 3G συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές αποδόσεις, όπως εφαρμογές πολυμέσων, full motion, video και ασύρματη τηλεδιάσκεψη. Επομένως χρειάζεται ένα σύστημα που αυξάνει την ήδη υπάρχουσα χωρητικότητα.
- Υπάρχει μια πλειάδα προτύπων και πρωτοκόλλων κινητών επικοινωνιών με τα οποία θα πρέπει τα συστήματα 3G να είναι συμβατά και να μπορούν να έχουν πρόσβαση. Αυτό είναι πρόβλημα, καθώς θέλουμε υπηρεσίες με μεγάλη φορητότητα και κινητικότητα.
- Το 3G βασίζεται στην υλοποίηση ευρείας ζώνης. Χρειάζονται δίκτυα τα οποία να μπορούν να εξυπηρετήσουν τόσο ασύρματα LAN όσο και ασύρματα κυψελωτά δίκτυα ευρείας ζώνης.
- Οι ανάγκες για μεγαλύτερο εύρος ζώνης γίνονται όλο και πιο έντονες.
- Έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές πιο αποδοτικές φασματικά μέθοδοι κωδικοποίησης, με τις οποίες τα 3G δίκτυα δεν είναι συμβατά.
- Χρειαζόμαστε ετερογενή δίκτυα βασισμένα στο IP, τα οποία θα επιτρέπουν στους χρήστες να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε σύστημα, οπουδήποτε και οποτεδήποτε.

	3G (συμπεριλαμβάνεται 2.5G, sub3G)	4G
Major Requirement Driving Architecture	Predominantly voice driven - data was always add on	Converged data and voice over IP
Αρχιτεκτονική δικτύου	Wide area cell-based	Hybrid - Integration of Wireless LAN (WiFi, Bluetooth) and wide area
Ταχύτητα	384 Kbps έως 2 Mbps	20 έως 100 Mbps εν κινήσει
Ζώνη συχνοτήτων	Εξαρτάται από χώρα και ήπειρο (1800-2400 MHz)	Υψηλές ζώνες συχνοτήτων (2-8 GHz)
Εύρος ζώνης	5-20 MHz	100 MHz (ή παραπάνω)
Είδος μεταγωγής	Κυκλώματος και πακέτου	All digital with packetized voice
Τεχνολογίες πρόσβασης	W-CDMA, 1xRTT, Edge	OFDM και MC-CDMA (Multi Carrier CDMA)
Μηχανισμός διόρθωσης λαθών	Convolutional rate 1/2, 1/3	Concatenated coding scheme
Σχεδιαστική υλοποίηση	Optimized antenna design, multi-band adapters	Smarter Antennas, software multiband and wideband radios
IP	including IP 5.0	Όλα τα IP (IP6.0)

Πίνακας 3.1 Σύγκριση παραμέτρων και χαρακτηριστικών 3G και 4G

Στον πίνακα 3.1 γίνεται σύγκριση σε σημαντικές παραμέτρους και χαρακτηριστικά των 3G και 4G συστημάτων.

3.1.3 Πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας 4G

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες σημαντικές εφαρμογές των δικτύων 4G που θα μπορούσαν να διευκολύνουν σημαντικά την καθημερινότητα του σημερινού ανθρώπου.

- Παροχή υπηρεσιών Internet σε κατοίκους απομακρυσμένων και αραιοκατοικημένων περιοχών, όπου η ενσύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι συνήθως οικονομικά ασύμφορη.
- Περαιτέρω ανάπτυξη των κινητών και ασύρματων δικτύων υπολογιστών. Όπως και τα σταθερά δίκτυα, τα κινητά δίκτυα υπολογιστών θα μπορούν να εξυπηρετούν οικονομικές συναλλαγές, συνεργασία μεταξύ πανεπιστημίων και επιστημόνων καθώς και διάφορες επιχειρηματικές πράξεις.
- Εφαρμογές τηλεϊατρικής. Τα πληρώματα των ασθενοφόρων θα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ιατρικά αρχεία ασθενών, να τηλεδιασκέπτονται με γιατρούς και να στέλνουν χρήσιμες πληροφορίες σε κοντινά νοσοκομεία.
- Υπηρεσία εικονικής πλοήγησης. Μέσω μιας απομακρυσμένης βάσης δεδομένων θα αποδίδονται ολόκληρες πόλεις, κτίρια και δρόμοι μέσω ειδικών γραφικών αναπαραστάσεων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να προδιαγράφει την πορεία που θα ακολουθήσει διαλέγοντας τη συντομότερη διαδρομή, με τη μικρότερη κίνηση κ.ο.κ. Επίσης θα μπορεί να γνωρίζει τα κοντινά εστιατόρια, σινεμά, μουσεία ή αξιοθέατα.

3.2 Ασύρματο σύστημα Long Term Evolution (LTE)

Πρόκειται για ένα ασύρματο ευρυζωνικό σύστημα, που ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη των δικτύων 3^{ης} γενιάς (UMTS) και στοχεύει στην αξιοποίηση των υποδομών του UMTS για την παροχή υπηρεσιών ευρείας ζώνης, υποστηρίζοντας παράλληλα και διαλειτουργικότητα με υφιστάμενα και μελλοντικά ευρυζωνικά δίκτυα. Τα συστήματα LTE αναμένεται να είναι οι κύριοι ανταγωνιστές των WiMAX αλλά βρίσκονται ακόμα σε αρχικά στάδια διαμόρφωσης των προτύπων. Το LTE είναι βελτιστοποιημένο για χρήστες κινούμενους με χαμηλή ταχύτητα, αλλά υποστηρίζει και υψηλές ταχύτητες κίνησης. Στόχος της ομάδας ανάπτυξης , 3rd Generation Partnership Project (3GPP), είναι το LTE να παρέχει αναβαθμισμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα προγενέστερα δίκτυα, όπως επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης ακόμη και στα όρια των κυψελών, αυξημένη φασματική απόδοση, χαμηλό κόστος και αυξημένη αυτονομία τερματικών συσκευών.

Από τους κατ' εκτίμηση 1.8 δισεκατομμύριο ανθρώπους που θα έχουν ευρυζωνικότητα μέχρι το 2012, περίπου τα 2/3 θα είναι κινητοί ευρυζωνικοί καταναλωτές και η πλειοψηφία από αυτούς θα εξυπηρετείται από HSPA (High Speed Packet Access) και LTE (Long Term Evolution) δίκτυα. Το εύρος ζώνης του διαύλου είναι κλιμακούμενο από 1.25 – 20 MHz. Για δίαυλο εύρους 20 MHz, είναι μέγιστη – θεωρητική – ταχύτητα μετάδοσης είναι τα 100 και 50 Mbps για την κάτω και την άνω ζεύξη αντίστοιχα, δηλαδή οι αντίστοιχες τιμές της αποδοτικότητας είναι 5 και 2.5 bits/sec/Hz.

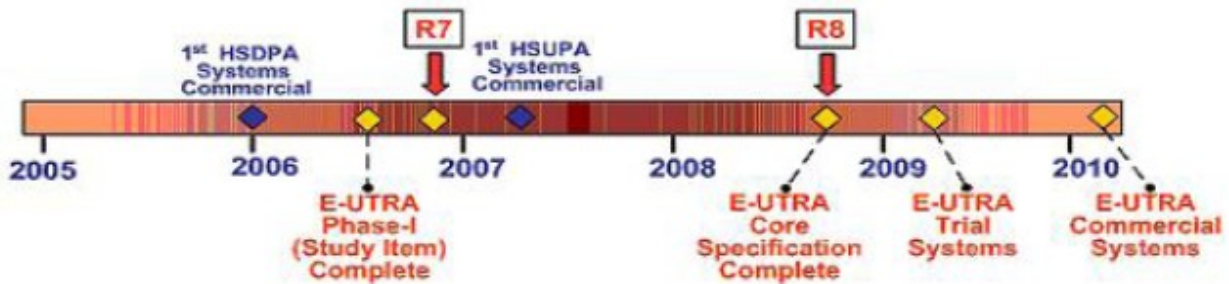
Οι αναλυτικές προδιαγραφές του LTE περιγράφονται αναλυτικά από τη 3GPP. Το LTE είναι μία από τις ανερχόμενες τεχνολογίες και πολλά υποσχόμενες στο χώρο των κινητών επικοινωνιών. Βασισμένο πάνω σε πρότυπα συστημάτων 2G και 3G, όπως το GSM, GSM EDGE, GPRS, WCDMA και το HSPA, το LTE μπορεί να εγγυηθεί υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη απόδοση. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 2.2) φαίνεται η εξέλιξη των διαφόρων τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών μέχρι και το πρόσφατο LTE.

	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA / HSUPA	HSPA+	LTE
Max downlink speed bps	384 k	14 M	28 M	100M
Max uplink speed bps	128 k	5.7 M	11 M	50 M
Latency round trip time approx	150 ms	100 ms	50ms (max)	~10 ms
3GPP releases	Rel 99/4	Rel 5 / 6	Rel 7	Rel 8
Approx years of initial roll out	2003 / 4	2005 / 6 HSDPA 2007 / 8 HSUPA	2008 / 9	2009 / 10
Access methodology	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC-FDMA

Πίνακας 3.2 Εξελικτική πορεία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών έως το LTE

Μέσω του LTE η ομάδα που το ανέπτυξε (3GPP), θα μπορούσε πραγματικά να αποκτήσει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τεχνολογιών κυψελωτών συστημάτων. Το LTE χρησιμοποιεί ως δίκτυο πρόσβασης το Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) και μπορεί να βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό ορισμένες πολύ βασικές παραμέτρους του δικτύου. Τέτοιες παράμετροι είναι η ρυθμαπόδοση, η χωρητικότητα των κυψελών, καθώς και ο χρόνος απόκρισης (latency time). Έτσι μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη κινητικότητα για το χρήστη. Λόγω της επικράτησης του Πρωτοκόλλου Διαδικτύου (IP) για μεταφορά σχεδόν οποιουδήποτε τύπου δεδομένων, το LTE υποστηρίζει την IP κίνηση διατηρώντας σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), ενώ η φωνή μεταφέρεται μέσω του πρωτοκόλλου Voice over IP (VoIP) με αποτέλεσμα την διαλειτουργικότητα και συνύπαρξη με άλλες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

Είναι γεγονός ότι πολλοί τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί εργάζονται πάνω στο LTE και προσπαθούν να το αναπτύξουν. Παρακάτω δίνεται ένα σχήμα με τα διάφορα βήματα τυποποίησης του LTE.



Σχήμα 3.2 Πορεία εξέλιξης του LTE

3.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του LTE

Το LTE από τεχνικής πλευράς έχει πολλές ομοιότητες με το WiMAX και σε αρκετά τμήματα υιοθετεί τις ίδιες τεχνολογικές προσεγγίσεις με το WiMAX, όπως είναι η χρήση της τεχνικής OFDMA, η χρήση εξελιγμένων συστημάτων κεραιών και το δυναμικά μεταβαλλόμενο εύρος ζώνης. Μία από τις σημαντικότερες διαφορές των δύο συστημάτων εντοπίζεται στην άνω ζεύξη, όπου το LTE χρησιμοποιεί τεχνολογία μονής φέρουσας, με σκοπό να μειώσει το λόγο μέγιστης προς μέση ισχύ του επιθυμητού σήματος (PAPR). Το LTE είναι εμπορικά διαθέσιμο από το 2010, δηλαδή αρκετά αργότερα από το WiMAX. Εντούτοις, το οικονομικό όφελος για έναν πάροχο δικτύου θα πολύ μεγάλο, αφού το κόστος ανάπτυξης ενός δικτύου WiMAX είναι πολύ υψηλότερο από το κόστος μετατροπής ενός δικτύου UMTS σε δίκτυο LTE.

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE στο φυσικό επίπεδο, στην κατεύθυνση του downlink χρησιμοποιείται η OFDM / OFDMA τεχνική πρόσβασης και η SC – FDMA στην κατεύθυνση του uplink. Η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) είναι μια μέθοδος πρόσβασης βασισμένη στην OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Η OFDM η οποία εφαρμόστηκε αρχικά σε Wi-Fi δίκτυα (802.11a/g) και άλλα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στον χώρο της κυτταρικής αρχιτεκτονικής στα πλαίσια του προτύπου fixed – access WIMAX 802.16d.

Σύμφωνα με την OFDM μέθοδο πολύπλεξης το εύρος φάσματος διαιρείται σε έναν μεγάλο αριθμό bandwidths τα οποία είναι μαθηματικά ορθογώνια μεταξύ τους μέσω του μετασχηματισμού Fourier (FFT) .Η ανοικοδόμηση γίνεται με αντίστροφο μετασχηματισμό (IFFT). Τυπικά μεγέθη FFT για OFDM συστήματα είναι 512, 1024, 2048. Τα νέα στενότερα εύρη που προκύπτουν αναφέρονται ως υποφέρουσες. Λόγω της ορθογωνιότητας των καναλιών που σχηματίζονται αν και επικαλύπτονται στο πεδίο της συχνότητας δεν δη-

μιουργούνται παρεμβολές μεταξύ τους.

Transmission BW	1.25 MHz	2.5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	
Sub-frame duration	0.5 ms						
Sub-carrier spacing	15 kHz						
Sampling frequency	1.92 MHz (1/2 × 3.84 MHz)	3.84 MHz	7.68 MHz (2 × 3.84 MHz)	15.36 MHz (4 × 3.84 MHz)	23.04 MHz (6 × 3.84 MHz)	30.72 MHz (8 × 3.84 MHz)	
FFT size	128	256	512	1024	1536	2048	
Number of occupied sub-carriers†, ††	76	151	301	601	901	1201	
Number of OFDM symbols per sub frame (Short/Long CP)	7/6						
CP length (μs/samples)	Short	(4.69/9) × 6, (5.21/10) × 1*	(4.69/18) × 6, (5.21/20) × 1	(4.69/36) × 6, (5.21/40) × 1	(4.69/72) × 6, (5.21/80) × 1	(4.69/108) × 6, (5.21/120) × 1	(4.69/144) × 6, (5.21/160) × 1
	Long	(16.67/32)	(16.67/64)	(16.67/128)	(16.67/256)	(16.67/384)	(16.67/512)

Πίνακας 3.3 Κατεύθυνση downlink στο LTE

Η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) είναι μια μέθοδος πρόσβασης

βασισμένη στην OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Η OFDM η οποία εφαρμόστηκε αρχικά σε Wi-Fi δίκτυα (802.11a/g) και άλλα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στον χώρο της κυτταρικής αρχιτεκτονικής στα πλαίσια του προτύπου fixed – access WIMAX 802.16d. Σύμφωνα με την OFDM μέθοδο πολύπλεξης το εύρος φάσματος διαιρείται σε έναν μεγάλο αριθμό bandwidths τα οποία είναι μαθηματικά ορθογώνια μεταξύ τους μέσω του μετασχηματισμού Fourier (FFT). Η ανοικοδόμηση γίνεται με αντίστροφο μετασχηματισμό (IFFT). Τυπικά μεγέθη FFT για OFDM συστήματα είναι 512, 1024, 2048. Τα νέα στενότερα εύρη που προκύπτουν αναφέρονται ως υποφέρουσες. Λόγω της ορθογωνιότητας των καναλιών που σχηματίζονται αν και επικαλύπτονται στο πεδίο της συχνότητας δεν δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ τους.

Πέρα από το προφανές πλεονέκτημα της OFDM, την μείωση δηλαδή των παρεμβολών η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει ικανοποιητικότερα από την CDMA και το φαινόμενο του delay spread. Σε ένα σύστημα CDMA η περίοδος συμβόλου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το delay spread (microseconds) ενώ στην OFDM η περίοδος συμβόλου είναι της τάξης των 100 microseconds και έτσι η επίδραση του delay spread είναι λιγότερο σημαντική στην λήψη του σήματος. Για την περαιτέρω αντιμετώπιση του προβλήματος ένα φάσμα 10 microseconds παρεμβάλλεται μεταξύ των συμβόλων (cyclic prefix).

Ένα άλλο πλεονέκτημα της OFDM προκύπτει από την χρήση εξελιγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος πολλαπλών κεραιών. Οι δύο σημαντικότερες τεχνικές είναι η MIMO και η AAS. Στην MIMO τεχνική εκμεταλλευόμαστε το ότι το σήμα που λαμβάνουμε από μία κεραία διαφέρει από το σήμα που λαμβάνουμε από μια δεύτερη κεραία εξαιτίας των

φαινομένων της πολυόδευσης. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να εκπέμψουμε ένα διαφορετικό σήμα από κάθε κεραία στην ίδια συχνότητα και να ανακτήσουμε τα σήματα αυτά στον δέκτη μετά από την κατάλληλη επεξεργασία. Στην περίπτωση του LTE χρησιμοποιούμε ως MIMO τεχνική την PU^2RC (Per-User Unitary Rate Control). Με την εφαρμογή του pre-coding διαφορετικά σήματα μπορούν να εκπέμπονται ταυτόχρονα προς τους συνδρομητές που στέλνουν αίτηση εξυπηρέτησης. Συγκεκριμένα η κεραία εκπομπής διαθέτει N_t στοιχεία. Το εκπεμπόμενο σήμα διαμορφώνεται ως εξής :

$$x = \sum_{i=1}^k w_i p_i s_i$$

όπου x είναι το διάνυσμα των εκπεμπόμενων συμβόλων διαστάσεων $N_t \times 1$, w το γραμμικό διάνυσμα προκωδικοποίησης ($N_t \times 1$). Το σήμα σχηματίζεται βάσει των πληροφοριών για την κατάσταση του καναλιού που φθάνουν στον σταθμό βάσης από τον εξοπλισμό χρήστη (UE) με την χρήση ενός coded look-up table index.

Η OFDMA αναπτύχθηκε προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή της OFDM εκτός από fixed access ασύρματα συστήματα στα κυτταρικά συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από κινητικότητα. Στην OFDMA οι υπο-φέρουσες ομαδοποιούνται σε μεγαλύτερες μονάδες, τα υπο-κανάλια και αυτά με την σειρά τους ομαδοποιούνται σε bursts τα οποία διατίθενται στους χρήστες. Η κατανομή των bursts μπορεί να αλλάζει από πλαίσιο σε πλαίσιο έτσι ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να διορθώνει τον τρόπο καταμερισμού του bandwidth ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επιπλέον, καθώς κάθε χρήστης χρησιμοποιεί ένα μικρό μόνο μέρος του συνολικού φάσματος η ισχύς κάθε χρήστη μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Τέλος και το SNR είναι δυνατό να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής που τρέχει ο κάθε χρήστης ξεχωριστά (internet, streaming video κ.ο.κ).

Τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν παράλληλα και πολύπλεξη χρόνου και συχνότητας. Αυτή η ελαστικότητα των συστημάτων LTE θα κάνει πιο ομαλή την μετάβαση στα συστήματα τέταρτης γενιάς. Οι πάροχοι ήδη διαμορφώνουν τα κριτήρια επιλογής του OFDMA εξοπλισμού (υπολογιστική ισχύς, χαμηλή κατανάλωση, ελαστικότητα, ενσωμάτωση περιφερειακών υψηλών ταχυτήτων, κτλ) που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα και για την εξυπηρέτηση των δικτύων 4G.

3.2.2 LTE TDD και LTE FDD

Το LTE έχει οριστεί για να φιλοξενήσει τόσο paired ραδιοφάσμα για πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD), όσο και unpaired φάσμα για πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDD). Αναμένεται ότι και το LTE TDD καθώς και το LTE FDD, θα χρησιμοποιηθούν ευρέως καθώς κάθε πρότυπο του LTE έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και μπορούμε να διαλέξουμε όποια μορφή μας εξυπηρετεί καλύτερα αναλόγως με την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει.

Το LTE TDD χρησιμοποιώντας "αντιστοιχισμένο" ραδιοφάσμα, αναμένεται να αποτελέσει το μονοπάτι μετάβασης για τις ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες 3G που χρησιμοποιούνται σε όλο τον κόσμο, οι περισσότερες από τις οποίες χρησιμοποιούν FDD paired φάσμα. Παρ' όλα αυτά, έχει δοθεί πρόσθετη έμφαση στη χρήση TDD unpaired φάσμα. Το LTE TDD γνωστό και ως TD-LTE θεωρείται ως η εξέλιξη ή η αναβάθμιση του TD-SCDMA. Λόγω της πολύ μεγάλης σημασίας που έχουν προσδώσει στο LTE TDD ή TD-LTE οι ερευνητές, οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν και τις δύο λειτουργίες TDD και FDD.

Μέχρι σήμερα έχουν καθοριστεί από τη 3GPP δεκαπέντε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για το FDD και 6 για το TDD, οι οποίες προορίζονται για το LTE και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

E-UTRA Operating Band [hide]	Uplink (UL) Operating Band BS Receive UE Transmit [hide]	Downlink (DL) Operating Band BS Transmit UE Receive [hide]	Duplex Mode [hide]	Channel Bandwidths (MHz)	Alias [hide]	Region(s) [hide]
I (1)	1920 MHz to 1980 MHz	2110 MHz to 2170 MHz	FDD	5, 10, 15, 20	UMTS IMT, "2100"	Japan, Europe, Asia
II (2)	1850 MHz to 1910 MHz	1930 MHz to 1990 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	PCS, "1900"	Canada, United States, Latin America
III (3)	1710 MHz to 1785 MHz	1805 MHz to 1880 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	DCS 1800, "1800"	Finland, [19] Hong Kong [20][21]
IV (4)	1710 MHz to 1755 MHz	2110 MHz to 2155 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	AWS, "1.7/2.1 GHz"	Canada, US, Latin America
V (5)	824 MHz to 849 MHz	869 MHz to 894 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10	Cellular 850, UMTS850	Canada, US, Australia
VI (6)	830 MHz to 840 MHz	875 MHz to 885 MHz	FDD	5, 10	UMTS800	Japan
VII (7)	2500 MHz to 2570 MHz	2620 MHz to 2690 MHz	FDD	5, 10, 15, 20	IMT-E, "2.6 GHz"	EU
VIII (8)	880 MHz to 915 MHz	925 MHz to 960 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10	GSM, UMTS900, EGSM900	EU, Latin America
IX (9)	1749.9 MHz to 1784.9 MHz	1844.9 MHz to 1879.9 MHz	FDD	5, 10, 15, 20	UMTS1700	Canada, US, Japan
X (10)	1710 MHz to 1770 MHz	2110 MHz to 2170 MHz	FDD	5, 10, 15, 20	UMTS, IMT 2000	Brazil, Uruguay, Ecuador, Peru
XI (11)	1427.9 MHz to 1452.9 MHz	1475.9 MHz to 1500.9 MHz	FDD	5, 10, 15, 20	PDC	Japan (Softbank, KDDI, DoCoMo) [22]
XII (12)	698 MHz to 716 MHz	728 MHz to 746 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10		
XIII (13)	717 MHz to 737 MHz	746 MHz to 756 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10	Verizon's 700 MHz Block C	
XIV (14)	788 MHz to 798 MHz	758 MHz to 768 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10	700 MHz Block D	
XV (15)	704 MHz to 716 MHz	734 MHz to 746 MHz	FDD	1.4, 3, 5, 10	AT&T's 700 MHz Block B	
XXXIII (33)	1900 MHz to 1920 MHz		TDD	5, 10, 15, 20		
XXXIV (34)	2010 MHz to 2025 MHz		TDD	5, 10, 15		
XXXV (35)	1850 MHz to 1910 MHz		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20		
XXXVI (36)	1930 MHz to 1990 MHz		TDD	1.4, 3, 5, 10, 15, 20		
XXXVII (37)	1910 MHz to 1930 MHz		TDD	5, 10, 15, 20		
XXXVIII (38)	2570 MHz to 2620 MHz		TDD	5, 10		EU
XXXIX (39)	1880 MHz to 1920 MHz		TDD	5, 10, 15, 20		
XL (40)	2300 MHz to 2400 MHz		TDD	10, 15, 20	IMT-2000	China

Πίνακας 3.4 Ζώνες συχνοτήτων LTE TDD και LTE FDD

Τόσο τα FDD όσο και τα TDD έχουν τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα τους. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές εφαρμογές ή αναλόγως με τα

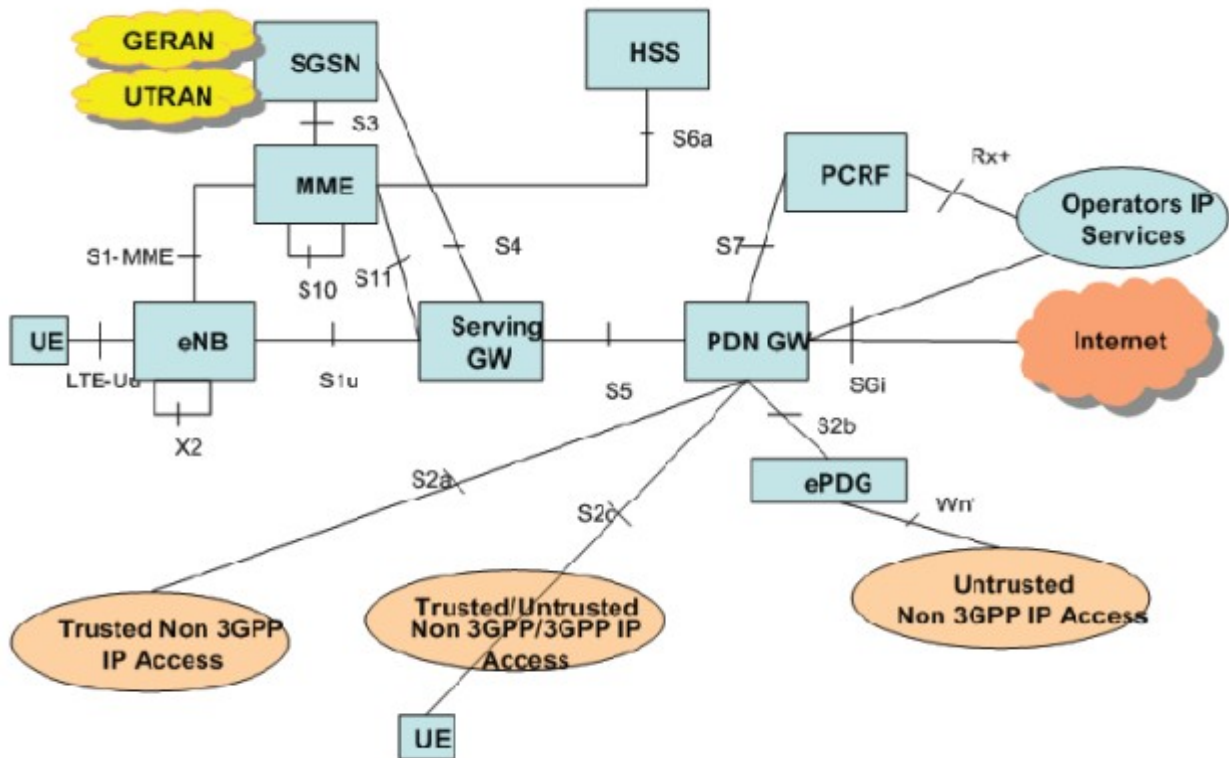
χαρακτηριστικά που έχει ο τρόπος επικοινωνίας που επιθυμούμε. Υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα της TDD και της FDD που ενδιαφέρουν αρκετά τους διαχειριστές κινητών και κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Αυτά βέβαια έχουν άμεση επίδραση στο LTE.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	LTE-TDD	LTE-FDD
Paired ραδιοφάσμα	Δεν απαιτεί paired φάσμα, αφού η εκπομπή και η λήψη γίνονται στο ίδιο κανάλι	Απαιτεί unpaired φάσμα με επαρκή διαχωρισμό συχνοτήτων που επιτρέπουν την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη
Κόστος Hardware	Χαμηλότερο κόστος καθώς δεν απαιτείται διπλέκτης για να απομονωθεί ο πομπός και δέκτης. Καθώς το κόστος της UES είναι μείζονος σημασίας, λόγω των τεράστιων αριθμών που παράγονται, αυτό είναι ένα βασικό στοιχείο.	Ο διπλέκτης είναι απαραίτητος και το κόστος είναι υψηλότερο.
Αμοιβαιότητα καναλιού	Το κανάλι διάδοσης είναι το ίδιο και στις δύο κατευθύνσεις που επιτρέπει μετάδοση και λήψη να χρησιμοποιούν προκαθορισμένες παραμέτρους	Κανάλια με διαφορετικά χαρακτηριστικά και στις δύο κατευθύνσεις, ως αποτέλεσμα της χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων
UL / DL ασυμμετρία	Είναι δυνατόν να αλλάξει δυναμικά τον UL και DL λόγο χωρητικότητας για να ανταποκριθεί στη ζήτηση	UL / DL χωρητικότητα που καθορίζεται από την κατανομή των συχνοτήτων που καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να γίνουν δυναμικές αλλαγές για να ταιριάζει με χωρητικότητα. Ρυθμιστικές αλλαγές θα έπρεπε κανονικά να απαιτούνται και η χωρητικότητα συνήθως ισοκατανέμεται έτσι ώστε να είναι το ίδιο σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.
Διάστημα φύλαξης / Ζώνης φύλαξης	Το διάστημα φύλαξης απαιτείται για την εξασφάλιση ότι uplink και downlink μεταδόσεις δεν έρχονται σε σύγκρουση. Μεγάλο διάστημα φύλαξης θα περιορίσει τη χωρητικότητα Μεγαλύτερο διάστημα φύλαξης κατά κανόνα απαιτείται, αν οι αποστάσεις είναι αυξημένες για να φιλοξενήσει μεγαλύτερους χρόνους μετάδοσης.	Η ζώνη φύλαξης απαιτείται για να παρέχει επαρκή μόνωση μεταξύ uplink και downlink. Μεγάλη ζώνη φύλαξης δεν έχει επιπτώσεις στη χωρητικότητα.
Ασυνεχής μετάδοση	Ασυνεχής μετάδοση απαιτείται για να επιτρέψει τόσο uplink και downlink μεταδόσεις. Αυτό μπορεί να υποβαθμίσει τις επιδόσεις του ενισχυτή RF στον πομπό.	Η συνεχής μετάδοση απαιτείται.
Παρεμβολές μεταξύ χρονοσχισμών	Οι Σταθμοί Βάσης πρέπει να συγχρονιστούν σε σχέση με τις χρονικές στιγμές της uplink και της downlink ζεύξης. Αν γειτονικοί Σταθμοί Βάσης χρησιμοποιούν διαφορετικές uplink και downlink αναθέσεις και μοιράζονται το ίδιο κανάλι, τότε ενδέχεται να προκύψει παρεμβολή μεταξύ των κυψελών.	Δεν ισχύει

Πίνακας 3.5 Σύγκριση LTE TDD και LTE FDD

3.2.3 Αρχιτεκτονική Δικτύου LTE

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα των δικτύων η αρχιτεκτονική του LTE διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Αρχιτεκτονική LTE Δικτύου

Τα σημαντικότερα λειτουργικά στοιχεία είναι τα εξής:

Evolved Radio Access Network (E-RAN)

Το εξελιγμένο RAN για το LTE αποτελείται από έναν κόμβο για παράδειγμα το eNodeB (eNB) που διαφάπτεται με τον εξοπλισμό χρήστη (UE). Το eNB περιλαμβάνει τα : PHY (Physical), MAC (Medium Access Control), RLC (Radio Link Control) και PDCP (Packet Data Control Protocol) επίπεδα. Επίσης παρέχει το Radio Source Control (RSC) και παρέχει υπηρεσίες διαχείρισης των πόρων.

Serving Gateway (SGW)

Το SGW δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων.

Mobility Management Entity (MEE)

Το MEE είναι ο κύριος κόμβος ελέγχου για το δίκτυο πρόσβασης του LTE.

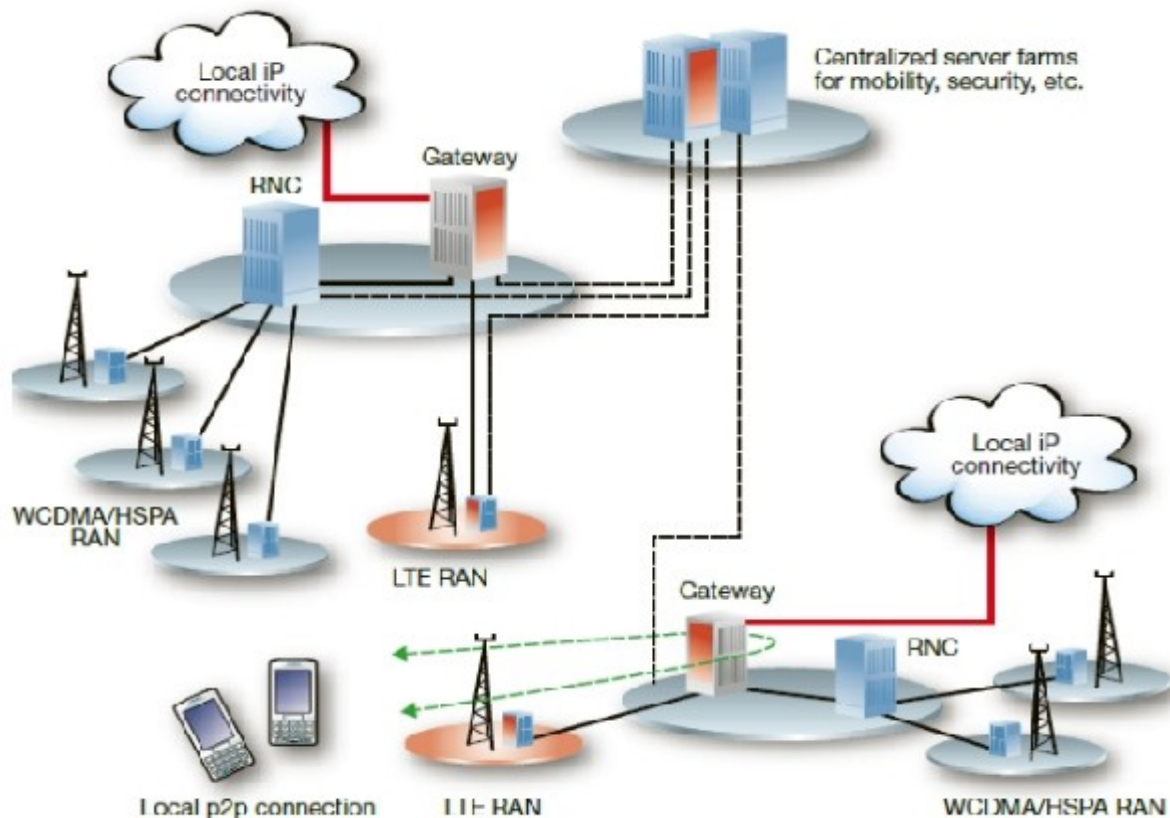
Packet Data Network Gateway (PDN GW)

Εξασφαλίζει την συνδεσιμότητα σε εξωτερικά δίκτυα καθώς αποτελεί το σημείο εξόδου της κίνησης στο UE . Επίσης αποτελεί την διεπαφή σε 3GPP και μη 3GPP τεχνολογίες όπως το WiMAX.

Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει στους παρόχους να μειώσουν το κόστος κατοχής και λειτουργίας των δικτύων καθώς τους δίνει την δυνατότητα να έχουν ξεχωριστά CN ενώ μοιράζονται τους πόρους ενός μοναδικού E – UTRAN. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ικανότητας του eNB να συνδέεται με διαφορετικά CN .

3.2.4 Τοπολογία Δικτύου LTE

Οι περισσότεροι πάροχοι σχεδιάζουν να επαναχρησιμοποιήσουν στοιχεία της WCDMA αρχιτεκτονικής και να τα ενσωματώσουν στα νέα δίκτυα διατηρώντας παράλληλα τις ίδιες διεπαφές σε επίπεδο software. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κατασκευαστές τερματικών να διευκολύνονται στην προσαρμογή των προϊόντων τους ενώ η συνύπαρξη του LTE, GSM και WCDMA/HSPA στη κοινή πλατφόρμα του LTE καθιστούν δυνατή την παγκόσμια κάλυψη και μεταγωγή από την πρώτη μέρα εφαρμογής του νέου συστήματος.



Σχήμα 3.4 Τοπολογία Δικτύου LTE

3.2.5 Απόδοση Δικτύου LTE

Το E – UTRAN πρόκειται να υποστηρίξει υπηρεσίες όπως το web browsing, το FTP ,το video streaming, το VoIP και το real time video. Επομένως το LTE είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποτελέσει ένα σύστημα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλή latency. Το εύρος φάσματος για το UE είναι 20 MHz τόσο για μετάδοση όσο και για λήψη. Ο πάροχος όμως μπορεί στα κελιά να χρησιμοποιήσει όλα τα εύρη που φαίνονται στον πίνακα 3.6.

Metric	Requirement
Peak data rate	DL: 100Mbps UL: 50Mbps (for 20MHz spectrum)
Mobility support	Up to 500kmph but optimized for low speeds from 0 to 15kmph
Control plane latency (Transition time to active state)	< 100ms (for idle to active)
User plane latency	< 5ms
Control plane capacity	> 200 users per cell (for 5MHz spectrum)
Coverage (Cell sizes)	5 – 100km with slight degradation after 30km
Spectrum flexibility	1.25, 2.5, 5, 10, 15, and 20MHz

Πίνακας 3.6 Χαρακτηριστικά απόδοσης LTE

Το LTE έχει ως στόχο και την ελαχιστοποίηση του κόστους και της κατανάλωσης ισχύος εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την αποδοτική οικονομικά μετάβαση από το UMTS. Η αποδοτικότητα του φάσματος αναμένεται να είναι στην κατεύθυνση του downlink 3 με 4 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με του Release 6 HSDPA και 2 με 3 φορές στην κατεύθυνση του uplink σε σχέση με το Release 6 HSUPA. Όσον αφορά την διαδικασία μεταγωγής, ο χρόνος διακοπής θα μειωθεί σε σχέση με τα circuit switched δίκτυα 2G.

Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων που έχουν γίνει δίνουν μια εικόνα των δυνατοτήτων του LTE και επιβεβαιώνουν την υψηλή του απόδοση. Τόσο το throughput όσο και η αποδοτικότητα του φάσματος είναι σημαντικά βελτιωμένα σε σχέση με το UMTS (UTRAN) υπερκαλύπτοντας τις απαιτήσεις απόδοσης που απαιτούνται.

3.2.6 Λειτουργία, συντήρηση και ασφάλεια

Μία από τις βασικότερες απαιτήσεις είναι η μείωση του OPEX. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα αυτοδιαχειριζόμενα στοιχεία του συστήματος. Τα αυτόνομα αυτά στοιχεία όχι μόνο μειώνουν το κόστος αλλά και επιταχύνουν την εφαρμογή της LTE τεχνολογίας κάνοντας δυνατή την γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση και ενσωμάτωση των σταθμών βάσης χωρίς να απαιτείται μεγάλη προετοιμασία και αλληλεπίδραση μεταξύ των παρόχων. Παράλληλα οι αυτοματοποιημένες λειτουργίες ελέγχου που περιλαμβάνουν την βελτιστοποίηση των γειτονικών κελιών και των συντονισμό όλων των παραμέτρων κατά την μεταγωγή καθώς και άλλους αλγόριθμους διαχείρισης συμβάλλουν στην απλοποίηση των διαδικασιών συντήρησης.

Το LTE έχει σχεδιαστεί εξ αρχής έτσι ώστε να εξυπηρετεί μικρές, υψηλής απόδοσης και αποδοτικές ενεργειακά τερματικές συσκευές. Έκτος από συσκευές κινητής τηλεφωνίας και φορητούς υπολογιστές το πεδίο εξοπλισμού χρήστη περιλαμβάνει και άλλου τύπου συσκευές με υψηλές απαιτήσεις σε downlink και uplink bit rates (φορητές συσκευές τηλεόρασης, βιντεοκάμερες) και χαμηλού latency (κονσόλες online gaming).

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την ανάπτυξη του LTE και επιβραδύνουν την εφαρμογή του είναι η εξασφάλιση των επικοινωνιών πάνω στα ευαίσθητα IP δίκτυα. Για την διασφάλιση του απορρήτου των επικοινωνιών η από άκρη σε άκρη προσέγγιση του δικτύου επιβάλλει:

- εξελιγμένες μεθόδους πιστοποίησης
- ασφαλή πρωτόκολλα και αποθήκευση δεδομένων
- έλεγχο στα άκρα του δικτύου.

3.3 Συμπεράσματα

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι μέχρι τώρα το UMTS έχει καλύψει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις που οδήγησαν στην ανάπτυξη των συστημάτων τρίτης γενιάς. Φυσικά υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης τόσο της χωρητικότητας του συστήματος όσο και της ικανότητας κάλυψης του. Όμως με την υιοθέτηση του έγινε πράξη η ενσωμάτωση των IP δικτύων στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που είναι παράλληλα και το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη των συστημάτων τέταρτης γενιάς. Προωθήθηκε ακόμα η διαδικτυακή συνεργασία και χρησιμοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι ώστε μπορούμε σήμερα να μιλάμε για ένα “διαδίκτυο” παγκόσμιας κλίμακας με αυξημένη χωρητικότητα μέσα στο οποίο παρέχονται πολλές δυνατότητες περιαγωγής και μέσω του οποίου οι συνδρομητές έχουν πρόσβαση σε μια πληθώρα υπηρεσιών. Είναι επίσης πολύ σημαντικό το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο μέρος της τεχνολογίας δεύτερης γενιάς όπως το GPRS και η βασική δομή του core network.

Το LTE, η νέα έκδοση που έχει προωθήσει το 3GPP, θα καλύπτει ακόμη περισσότερες ανάγκες μέχρι τελικά να παγιωθεί και να εφαρμοστεί πλήρως η τετάρτη γενιά των των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων τα οποία θα είναι πλέον IP δίκτυα και θα αλλάξουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την δομή και την φιλοσοφία των επικοινωνιακών δικτύων ανοίγοντας νέους ορίζοντες στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΕΡΙΣΜΑ ΣΤΙΣ ΡΑΔΙΟΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΕΡΙΣΜΑ

Ο όρος "ψηφιακό" μέρισμα αναφέρεται στην επικείμενη μείωση του ράδιο-φάσματος που απαιτείται για την παροχή τηλεοπτικών υπηρεσιών, όταν η τεχνολογία εκπομπής μετατραπεί από αναλογική σε ψηφιακή. Αυτή η μείωση προκύπτει από τη δυνατότητα που έχει η ψηφιακή τεχνολογία να διανέμει μεγαλύτερο αριθμό τηλεοπτικών σταθμών σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης φάσματος, σε σχέση με την αναλογική μετάδοση. Σε αντίθεση με την αναλογική μετάδοση, η οποία απαιτεί ένα ολόκληρο κανάλι συχνότητας 8MHz για να μεταδώσει ένα τηλεοπτικό σταθμό, πολλοί ψηφιακοί σταθμοί μπορούν να μεταδοθούν σε οποιοδήποτε κανάλι συχνότητας χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους πολυπλεξίας. Αναλόγως με την τεχνολογία, ένα ψηφιακό σήμα μπορεί να συμπίεσει τέσσερα ή και περισσότερα τηλεοπτικά κανάλια απλής ευκρίνειας, έναν ή δύο σταθμούς υψηλής ευκρίνειας, ή είκοσι ή και παραπάνω σταθμούς κινητής τηλεόρασης. Έτσι, σε κάθε σταθμό εκπομπής απαιτείται μικρότερος αριθμός συχνοτήτων για να μεταδοθεί συγκεκριμένος αριθμός τηλεοπτικών σταθμών σε ψηφιακή μορφή, απ' ό,τι σε αναλογική μορφή.

Εκτός από αυτή την εξοικονόμηση φάσματος, η ψηφιακή τεχνολογία είναι πιο ανθεκτική σε υψηλότερα επίπεδα παρεμβολής απ' ό,τι η αναλογική, κάτι που σημαίνει ότι οι γεωγραφικοί περιορισμοί μεταξύ σταθμών εκπομπής που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι, θα μπορούν να είναι πιο χαλαροί. Είναι επίσης δυνατό να χρησιμοποιηθεί η ίδια συχνότητα εκπομπής σε πολλαπλούς σταθμούς μέσα σε μία δεδομένη περιοχή (τυπικά μέχρι ακτίνα 100 χιλιομέτρων), δεδομένου ότι το σήμα εκπομπής είναι το ίδιο. Οι δύο αυτοί παράγοντες συνεισφέρουν στην περαιτέρω εξοικονόμηση του φάσματος που απαιτείται για εκπομπή τηλεοπτικών υπηρεσιών σε ψηφιακή μορφή.

Τα τελευταία πέντε χρόνια, το ενδιαφέρον για τη χρησιμοποίηση του ψηφιακού μερίσματος για υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών, έχει αυξηθεί σημαντικά. Γίνεται επίσης μεγάλη προσπάθεια για εναρμόνιση μέρους του ψηφιακού μερίσματος στις ευρωπαϊκές χώρες με σκοπό να δοθεί η δυνατότητα στους παρόχους δικτύου και στους κατασκευαστές εξοπλισμού να λειτουργήσουν σε μια διευρυμένη ευρωπαϊκή αγορά, μειώνοντας το κόστος παροχής αυτών των υπηρεσιών. Κάποιες επιπλέον συχνότητες πέρα από το εναρμονισμένο ψηφιακό μέρισμα, μπορεί σε ορισμένες χώρες να είναι διαθέσιμες για διάφορες υπηρεσίες, όπως επικοινωνίες για τη δημόσια ασφάλεια, ασύρματη πρόσβαση και πολλές άλλες.

Οι τέσσερις κύριες κατηγορίες υπηρεσιών οι οποίες αναμένεται να χρησιμοποιήσουν το φάσμα του ψηφιακού μερίσματος είναι:

- Δημόσιες κινητές / ασύρματες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες,
- Υπηρεσίες Δημόσιας Τάξης,
- Υπηρεσίες Κατάστροφης Προγράμματος και Ειδικών Γεγονότων (PMSE) και
- Επιπρόσθετες ενσύρματες κι ασύρματες υπηρεσίες τηλεοπτικής ευρυεκπομπής μέσης (SDTV) και υψηλής ευκρίνειας (HDTV).

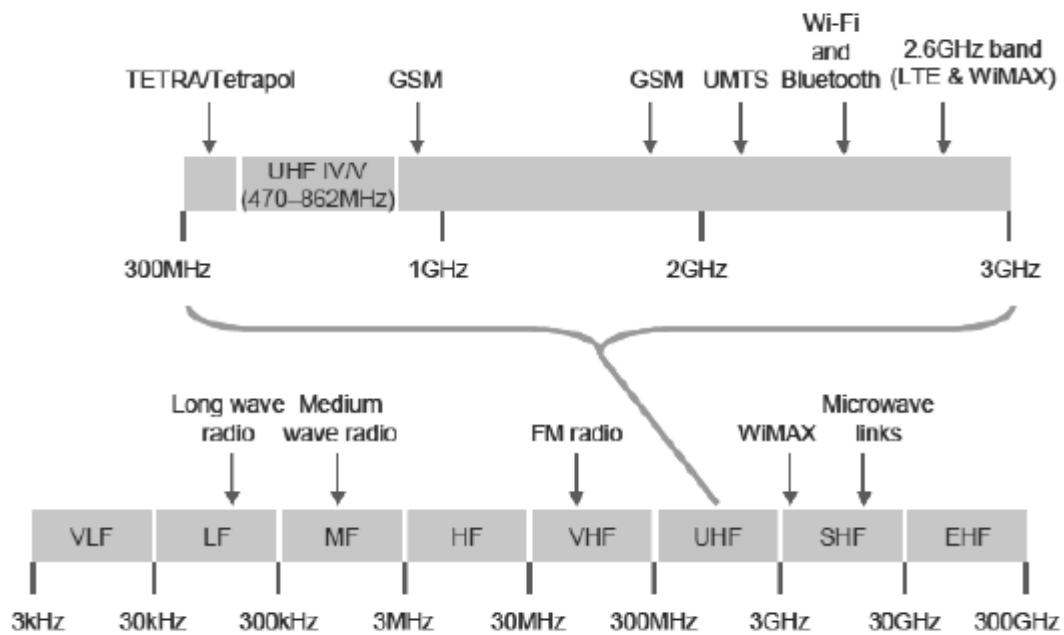
Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με το κατάλληλο φάσμα πού μπορεί να χρησιμοποιούν διάφορες υπηρεσίες και εφαρμογές μέσα στη ζώνη συχνοτήτων για τηλεοπτική εκπομπή.

ΥΠΗΡΕΣΙΑ	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΦΑΣΜΑ	ΣΧΟΛΙΑ
Κινητή Τηλεφωνία	790 -862 MHz	Χρειάζεται οικονομία κλίμακος. Επομένως είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί από χώρες που υιοθετούν μη εναρμονισμένη προσέγγιση.
Ευρυζωνική πρόσβαση σε αραιοκατοικημένες περιοχές.	Ζώνη UHF	Δυνατό σε χώρες που επιθυμούν να επιτύχουν συντονισμένη ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση.
Επικοινωνίες για τη Δημόσια Ασφάλεια	Το χαμηλό μέρος των ζωνών	Το ιδανικό φάσμα με βάση τις συμβάσεις είναι 385 – 390 μαζί με τη ζώνη 390 – 400 MHz
PMSE	Ελεύθερο μέρος του φάσματος	Μπορεί να είναι δύσκολο να βρεθεί ελεύθερο φάσμα. Θα απαιτούσε περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής για τα μικρόφωνα ραδιοφώνων. Πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί ένα κεντρικό διάστημα 12MHz μεταξύ της λειτουργίας downlink και uplink ενός κινητού υποκαναλιού.
Ευρυεκπομπή (περισσότερα προγράμματα HDTV κ.α)	Οπουδήποτε στη ζώνη VHF και UHF	Χρήση της τεχνολογίας DVB-T2 θα προσέδιδε επιπλέον χωρητικότητα στην πολυπλεξία τουλάχιστον 30%, κάτι το οποίο θα μπορούσε να υποστηρίξει επιπλέον προγράμματα και HDTV

Κινητή τηλεόραση	Στρατιωτικές επικοινωνίες	Ζώνη συχνοτήτων 790 – 862 MHz

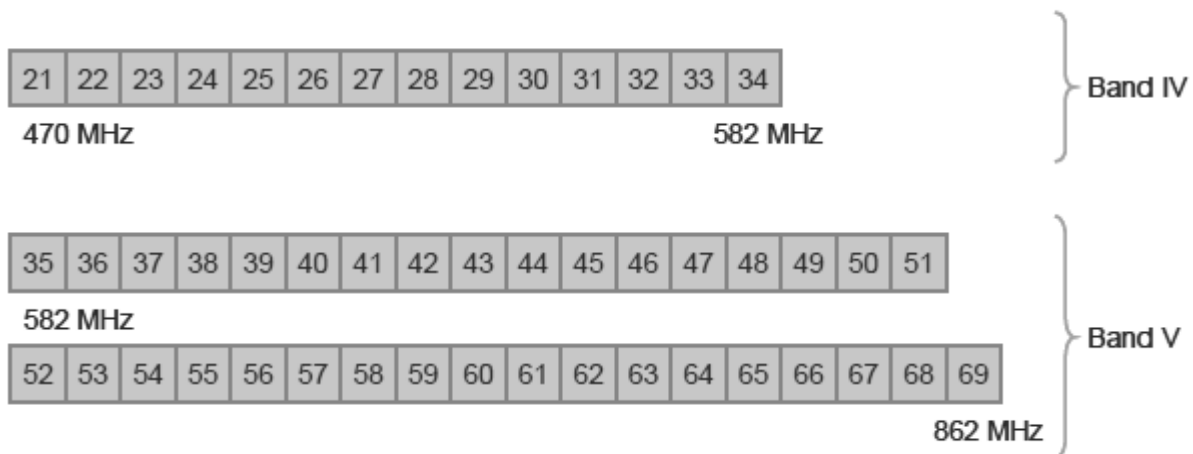
Πίνακας 4.1 Καταλληλότητα του φάσματος από το ψηφιακό μέρισμα για διάφορες εφαρμογές

Η κατανομή των συχνοτήτων του ραδιοφάσματος, καθώς επίσης κι οι υπηρεσίες οι οποίες αναπτύσσονται σε κάθε ζώνη, δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.1 Κατανομή συχνοτήτων ραδιοφάσματος

Επίσης στο σχήμα 4.2 φαίνεται πως οι συχνότητες 470-862 MHz διαιρούνται σε 49 κανάλια, όπου το καθένα έχει εύρος 8 MHz. Τα κανάλια αυτά αριθμούνται από το 21 έως το 69, όπου τα κανάλια 21-34 ανήκουν στη ζώνη IV ενώ τα κανάλια 35-69 ανήκουν στη ζώνη V.



Σχήμα 4.2 Κατανομή καναλιών στις συχνότητες 470 – 862 MHz

4.2 Ευρωπαϊκές και Διεθνής αποφάσεις για το ψηφιακό μέρισμα

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες κι έχουν σημειωθεί αξιόλογες εξελίξεις τόσο στην Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο με σκοπό να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη από το ψηφιακό μέρισμα. Στη παγκόσμια διάσκεψη ραδιοεπικοινωνιών της ITU, το 2007 (WRC-07) αποφάσισε να παραχωρηθεί η ζώνη 790-862 MHz για κινητές υπηρεσίες σε πρώτη φάση, ενώ αργότερα θα χρησιμοποιηθεί και από υπηρεσίες ευρυεκπομπής σε όλη την Ευρώπη και την Αφρική μέχρι το 2015. Στην Ευρώπη, ο οργανισμός CEPT (Conference Europeenne des Administrations des Postes et des Telecommunications) αναπτύσσει σχέδια για τη διευκόλυνση παροχής κινητών υπηρεσιών σε αυτό το φάσμα, σε εναρμονισμένη αλλά όχι υποχρεωτική βάση. Το πεδίο εργασιών της CEPT καλύπτει τεχνικά χαρακτηριστικά για κινητές υπηρεσίες, ρύθμιση διαύλων και θέματα διασυνοριακού συντονισμού.

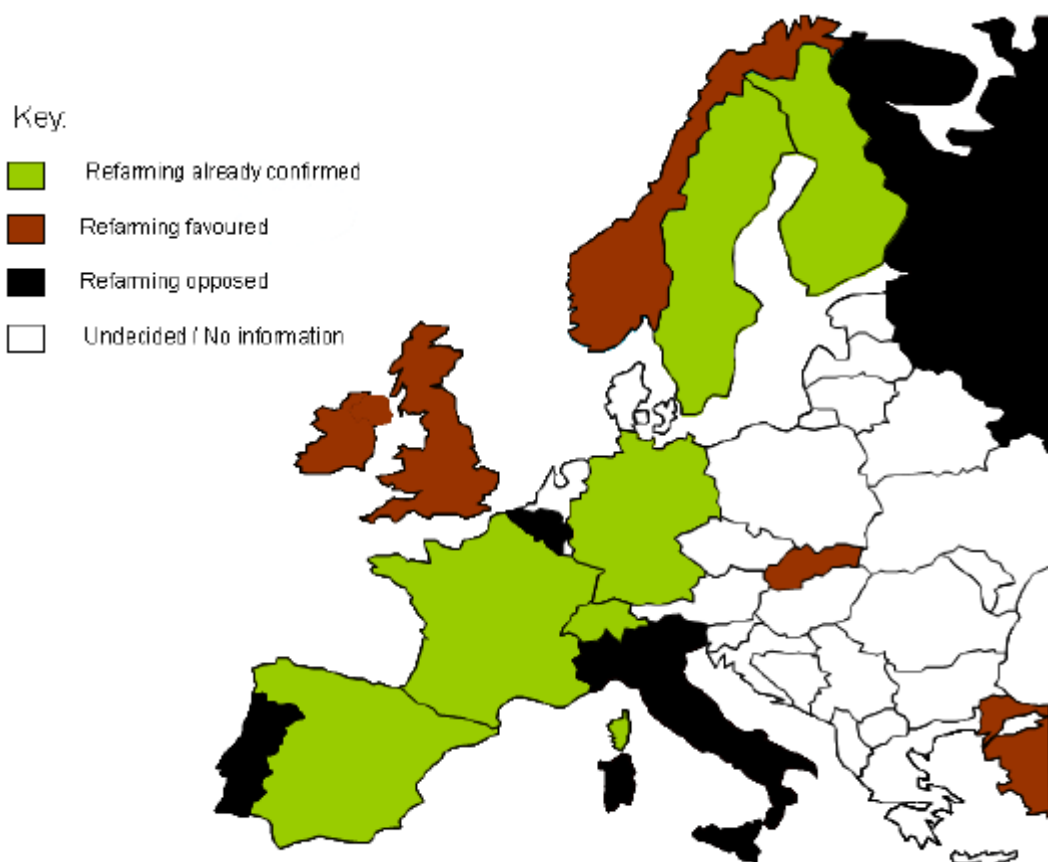
Το προτεινόμενο σχέδιο καναλιών για λειτουργία FDD στο εναρμονισμένο ευρωπαϊκό εναρμονισμένο ψηφιακό μέρισμα δίνεται στο επόμενο σχήμα.

791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821 - 832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Downlink						Duplex gap	Uplink					
30 MHz (6 blocks of 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)					

Σχήμα 4.3 Κατανομή καναλιών στη λειτουργία FDD

Αν και υπάρχει εναλλακτικό σχέδιο και για λειτουργία TDD, αυτή η προσέγγιση δεν ενδείκνυται για δίκτυα ευρείας περιοχής με μεγάλο μέγεθος κυψέλης, εξαιτίας της δυσκολίας συγχρονισμού μεταξύ του σήματος εκπομπής και λήψης σε περιοχές μεγάλης έκτασης. Έχουν οριστεί όρια διασυνοριακού συντονισμού παρεμβολών για κινητούς σταθμούς, κινητούς σταθμούς βάσης και οικιακούς τηλεοπτικούς δέκτες.

Παρότι φαίνεται να επικρατεί η άποψη για υιοθέτηση μιας εναρμονισμένης ζώνης για το ψηφιακό μέρισμα στην Ευρώπη, αυτή η άποψη δεν τυγχάνει καθολικής αποδοχής. Ορισμένες χώρες, όπως η Ιταλία και το Βέλγιο, αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω της παρούσας ή σχεδιαζόμενης ευρείας χρησιμοποίησης των καναλιών 61-69 για ψηφιακή τηλεόραση. Το παρακάτω σχήμα 4.4 δείχνει ποιες χώρες έχουν ήδη υιοθετήσει την εναρμονισμένη ζώνη, ποιες υποστηρίζουν αυτή την στρατηγική και ποιες είναι αντίθετες.



Σχήμα 4.4 Στρατηγική που εφαρμόζουν οι ευρωπαϊκές χώρες απέναντι στην απελευθέρωση της περιοχής 790-862 MHz του φάσματος

Ένας αριθμός ευρωπαϊκών χωρών (13 από τα 27 κράτη μέλη) χρησιμοποιούν ήδη στρατιωτικά συστήματα που λειτουργούν σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, μόνο τέσσερις από αυτές (το Βέλγιο, η Γαλλία, η Γερμανία και η Ελλάδα) έχουν ζητήσει επίσημα την προστασία αυτών των υπηρεσιών από την ITU και πιστεύεται ότι σε καμία περίπτωση η παρουσία στρατιωτικών εφαρμογών δεν θα επηρεάσει την ομαλή λειτουργία της ψηφιακής τηλεόρασης καθώς και οποιασδήποτε άλλης εμπορικής υπηρεσίας που χρησιμοποιεί αυτή τη ζώνη συχνοτήτων.

Επίσης, μία άλλη κατηγορία υπηρεσιών που χρησιμοποιεί την UHF ζώνη της τηλεόρασης, είναι οι υπηρεσίες PMSE, τις οποίες έχουμε προαναφέρει. Οι υπηρεσίες αυτές χρησιμοποιούν ασύρματα μικρόφωνα και προσωρινές συνδέσεις σε αυτή τη ζώνη, συχνά χρησιμοποιώντας συχνότητες που δεν χρησιμοποιούνται από τηλεοπτικούς σταθμούς τοπικά. Οι υπηρεσίες PMSE έχουν λιγότερες πιθανότητες να μοιραστούν συχνότητες με τηλεοπτικούς σταθμούς ύστερα από την ψηφιακή μετάβαση.

Η απελευθέρωση επιπλέον συχνοτήτων πέρα από την εναρμονισμένη ζώνη συχνοτήτων, θα μπορούσε να αποδειχθεί πολύ σημαντική για υπηρεσίες PMSE ή ευρυζωνικής πρόσβασης, οι οποίες εξαρτώνται πολύ λιγότερο από οικονομίες κλίμακας και από τη παγκόσμια περιαγωγή (roaming) απ' ό,τι οι κινητές υπηρεσίες κι έτσι εξαρτώνται πολύ λιγότερο από εναρμονισμένες συχνότητες. Μέχρι τώρα, μόνο μία χώρα (το Ηνωμένο Βασίλειο) έχει ρητά δεσμευτεί να ελευθερώσει επιπλέον φάσμα για άλλες υπηρεσίες πάνω από την προτεινόμενη εναρμονισμένη ζώνη, αν και η Ιρλανδία έχει κάνει πρόσφατα μια παρόμοια πρόταση και αναμένεται κι άλλες χώρες να λάβουν αντίστοιχες πρωτοβουλίες μόλις καταλήξουν στο τελικό τους σχέδιο για την ψηφιακή μετάβαση.

Το πλάνο συχνοτήτων της ITU στη Γενεύη το 2006 (GE-06), αποτελεί τη βάση για το σχεδιασμό της ψηφιακής τηλεόρασης στην Ευρώπη. Σύμφωνα με το σχέδιο αυτό, οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες έχουν παραχωρήσει αρκετό φάσμα που αντιστοιχεί σε 7 ή 8 ψηφιακά κανάλια. Επιπροσθέτως, μερικές χώρες σχεδιάζουν επιπλέον κανάλια να παρέχεται τοπική ή μερικώς εθνική κάλυψη. Δεν υπάρχει κοινή προσέγγιση για την αδειοδότηση υπηρεσιών ψηφιακής τηλεόρασης πανευρωπαϊκά, παρ' όλα αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις ο λειτουργός του καναλιού είναι ανεξάρτητος από αυτόν που μεταδίδει το περιεχόμενο του καναλιού. Μία εξαίρεση σε αυτό τον κανόνα είναι η περίπτωση μεγαλύτερων οργανισμών που είναι αναμεταδότες δημόσιων υπηρεσιών, οι οποίοι μπορούν να έχουν τον απόλυτο έλεγχο των καναλιών τους για αναμεταδώσουν τα προγράμματα τους.

Σε αντίθεση με άλλους τομείς της αγοράς ηλεκτρονικών επικοινωνιών, πολλές άδειες DTT είναι τεχνολογικά προκαθορισμένες να παρέχουν βεβαιότητα στους καταναλωτές σε ότι έχει να κάνει με τη συμβατότητα των ψηφιακών τους δεκτών με τα τοπικά δίκτυα μετάδοσης. Αυτό μπορεί να εξασθενήσει με τον καιρό, καθώς οι ολοκληρωμένοι ψηφιακοί δέκτες νέας γενιάς αποκτούν μεγαλύτερη ευελιξία. Οι συχνότητες γενικά υπόκεινται σε έλεγχο από τον πάροχο του δικτύου (π.χ. Digea ή EPT) κι όχι στους παρόχους περιεχομένου που μεταδίδουν το τηλεοπτικό πρόγραμμα. Οι πάροχοι περιεχομένου συνήθως λαμβάνουν άδειες οι οποίες τους δίνουν το δικαίωμα να μεταδίδουν σε μία συχνότητα. Αυτό είναι κάτι

διαφορετικό από αυτό που συμβαίνει στην Ελλάδα, όπου οι συχνότητες ανατίθενται κατευθείαν στους ιδιοκτήτες των τηλεοπτικών σταθμών οι οποίοι ύστερα καλούνται να εκσυγχρονιστούν και να κάνουν το σήμα τους ψηφιακό.

4.3 Απελευθέρωση του ψηφιακού μερίσματος στην Ελλάδα.

Η ελληνική τηλεοπτική αγορά περιλαμβάνει κρατικούς και ιδιωτικούς σταθμούς πανελλαδικής εμβέλειας καθώς και τοπικούς σταθμούς μικρής εμβέλειας. Υπάρχουν τέσσερις κρατικοί σταθμοί οι οποίοι λειτουργούν υπό την εποπτεία της ΕΡΤ, και αναμένεται να υπάρξουν και άλλοι 8 ιδιωτικοί ψηφιακοί σταθμοί. Οι τοπικοί σταθμοί καθώς και οι σταθμοί περιορισμένης εμβέλειας είναι όλοι ιδιωτικοί κι ο αριθμός τους ποικίλει ανάλογα με την περιοχή, ενώ σε ορισμένες περιοχές έχουν αδειοδοτηθεί επίσημα έως και επτά σταθμοί. Υπάρχουν επίσης και δύο συνδρομητικά τηλεοπτικά προγράμματα. Σε όλους τους κρατικούς και ιδιωτικούς σταθμούς πανελλαδικής εμβέλειας έχει δοθεί η δυνατότητα να εκπέμπουν ψηφιακό σήμα όταν ολοκληρωθεί η μετάβαση. Υπάρχει επίσης μία πιθανότητα να συμπεριληφθούν και οι τοπικοί σταθμοί, αλλά αυτό ακόμα δεν έχει ξεκαθαριστεί πλήρως.

Ο σχεδιασμός για την ψηφιακή εποχή θα πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον τα υπάρχοντα κρατικά και ιδιωτικά κανάλια εθνικής εμβέλειας, όπως ορίζει η σχετική νομοθεσία. Η ΕΡΤ πρόκειται να λειτουργήσει ακόμα δύο κανάλια, ένα το οποίο θα το μοιραστεί μαζί με τα άλλα δύο συνδρομητικά κανάλια, κι ένα ακόμα κανάλι θα αδειοδοτηθεί για υπηρεσίες κινητής τηλεόρασης. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι θα υπάρξει απαίτηση για έξι ψηφιακά εθνικά κανάλια, δεδομένου ότι το κάθε ψηφιακό κανάλι μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και τέσσερα αναλογικά κανάλια. Ο αριθμός των ψηφιακών καναλιών που θα απαιτηθεί για την υποστήριξη και των τοπικών καναλιών, διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και εξαρτάται από τον αριθμό των αναλογικών καναλιών που ήδη υπάρχουν σε κάθε περιοχή.

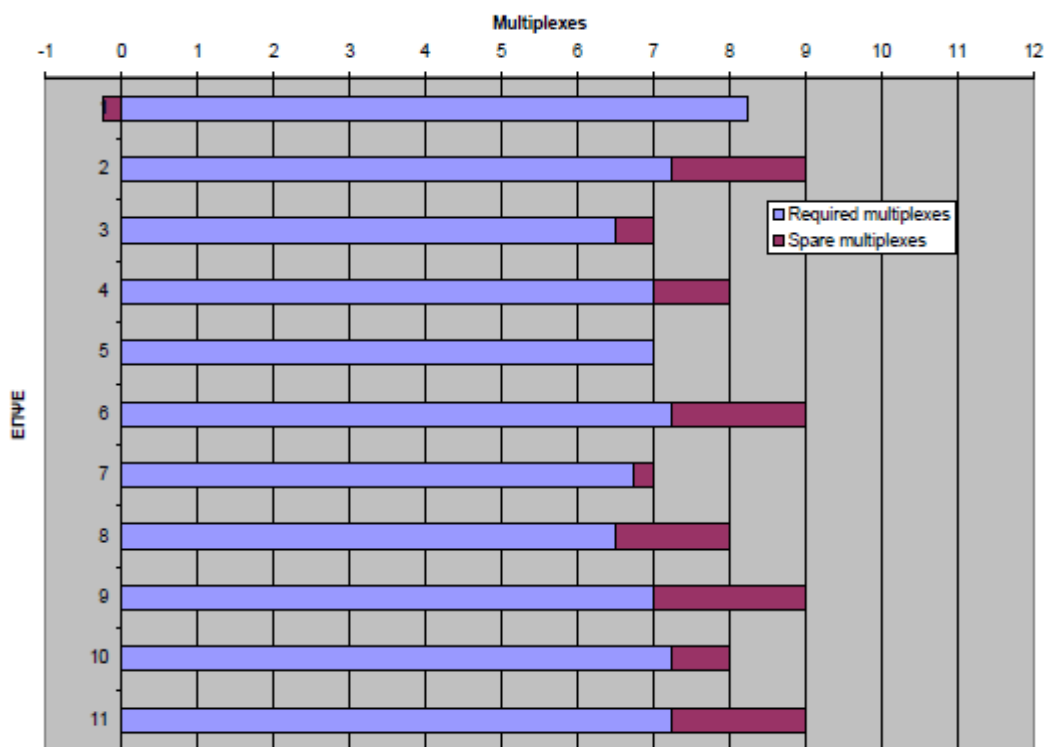
Το σχέδιο για τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), η οποία και εκπόνησε μελέτη για την ψηφιακή μετάβαση, η οποία αργότερα υιοθετήθηκε από την αρμόδια επιτροπή του Υπουργείου Μεταφορών και Επικοινωνιών με κοινή υπουργική απόφαση (ΚΥΑ ψηφιακής μετάβασης). Το σχέδιο κάνει λόγο για 8-12 συχνότητες οι οποίες θα ανατεθούν σε καθένα από τα 23 ορισμένα δίκτυα μονής συχνότητας (SFNs) τα οποία εξυπηρετούν 11 ευρύτερες περιοχές κάλυψης (ΕΠΨΕ). Κρίνοντας από τις συχνότητες που έχουν παραχωρηθεί από το κράτος στα κανάλια εθνικής και τοπικής εμβέλειας σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε όλες τις ΕΠΨΕ εξαιρουμένης μίας, δεν αναμένεται να υπάρξουν πάνω από πέντε κανάλια πανελλαδικής εμβέλειας, κάτι το οποίο θα απαιτούσε την παραχώρηση δύο ακόμα ψηφιακών καναλιών (οκτώ κανάλια συνολικά).

Επίσης θα υπήρχε μεγάλο όφελος εάν ήταν δυνατή η απελευθέρωση επιπλέον φάσματος σε εθνικό επίπεδο που θα μπορούσε για παράδειγμα να χρησιμοποιηθεί για ευρυζωνική ασύρ-

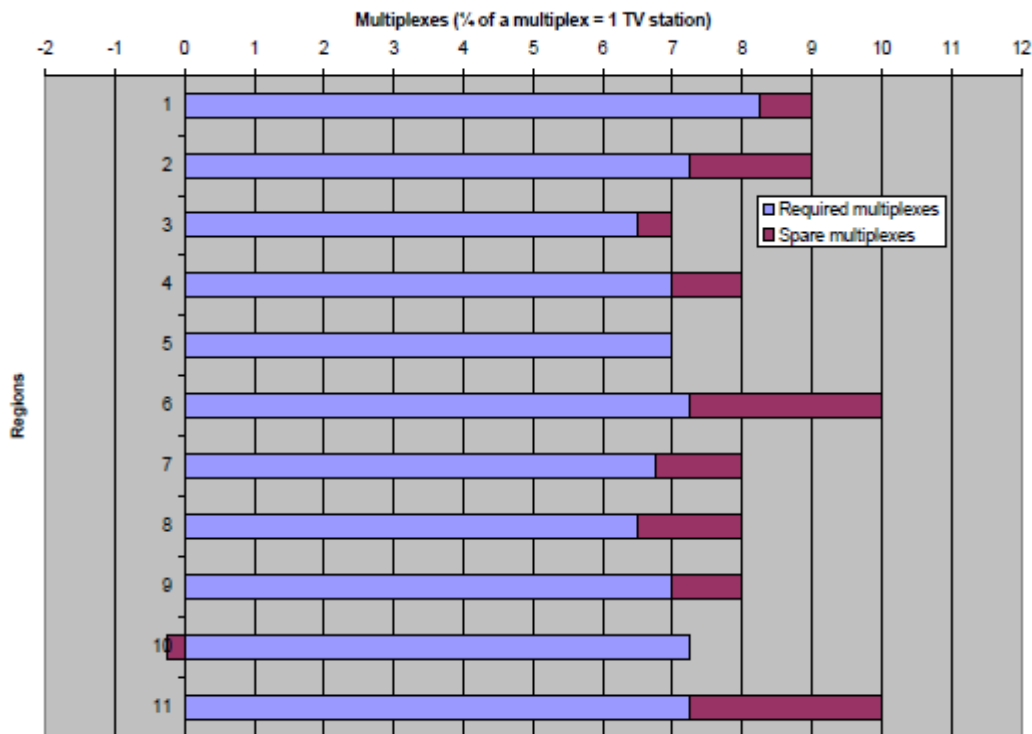
ατη πρόσβαση. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν γίνει μελέτες οι οποίες επιχειρήσαν να βρουν την ευρύτερη δυνατή ζώνη συχνοτήτων η οποία θα μπορούσε να ελευθερωθεί χωρίς παράλληλα να επηρεάζεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης των κρατικών και ιδιωτικών καναλιών σε κάθε περιοχή. Βρέθηκε ότι η αποδέσμευση των συχνοτήτων που αντιστοιχούν στην ομάδα καναλιών 28-32 θα μπορούσε να επιτύχει τον παραπάνω σκοπό. Στην περιοχή ΕΠΨΕ 1, μπορεί να ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μία από τις διαθέσιμες συχνότητες στο πλάνο GE-06 η οποία αυτή τη στιγμή είναι εκτός του ελληνικού ψηφιακού σχεδίου συχνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, αυτή η αλλαγή μπορεί να μην είναι απαραίτητη στην πράξη, καθώς υπάρχουν λιγότεροι σταθμοί στην πράξη από αυτούς που έχουν τυπικά αδειοδοτηθεί.

Το σχήμα 4.5 παρακάτω δείχνει την επίδραση που θα είχε η αφαίρεση των καναλιών 61-69 και 28-32 από τον αριθμό των συχνοτήτων που είναι διαθέσιμες για κάθε δίκτυο μονής συχνότητας (SFN) στο ελληνικό σχέδιο ψηφιακών συχνοτήτων.

Η χρησιμότητα του εναρμονισμένου ψηφιακού μερίσματος στην Ελλάδα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συνολική ζώνη συχνοτήτων που είναι διαθέσιμη, κυρίως σε εθνική κλίμακα. Διαφαίνεται επίσης ότι η διαθεσιμότητα των τριών τελευταίων καναλιών (838-862 MHz) μπορεί να είναι φυσικός αδύνατη λόγω της παρούσας χρησιμοποίησής τους από το στρατό.



Σχήμα 4.5 Αριθμός αναγκαίων ψηφιακών καναλιών και κενός χώρος που απομένει σε κάθε ΕΠΨΕ, θεωρώντας ότι τα κανάλια 61-69, 57-58 και 28-32 έχουν απελευθερωθεί πλήρως από το ψηφιακό πλάνο



Σχήμα 4.6 Αριθμός αναγκαίων ψηφιακών καναλιών και κενός χώρος που απομένει σε κάθε ΕΠΨΕ, θεωρώντας ότι τα κανάλια 61-69, 57-58 και 30-32 έχουν απελευθερωθεί πλήρως από το ψηφιακό πλάνο

Στο παραπάνω σχήμα 4.6 φαίνεται ότι η μεταφορά των συχνοτήτων για στρατιωτική χρήση σε μία άλλη περιοχή συχνοτήτων ίδιου εύρους (24 MHz) (αναλόγως με τα κανάλια που θα επιλεγθούν), έχει επίδραση μόνο σε μία περιοχή ΕΠΨΕ. Οποιοδήποτε κόστος υποστεί ο στρατός μπορεί να αναπληρωθεί από την αναμενόμενη απελευθέρωση φάσματος.

Συμπερασματικά, από την ανάλυση που έγινε μέχρι τώρα προκύπτει ότι η αποδέσμευση των συχνοτήτων πάνω από τα 790 MHz δεν θα έχει ουσιαστική επίδραση που να αφορά την δυνατότητα μετάδοσης όλων των ψηφιακών τηλεοπτικών σταθμών που προβλέπει η ελληνική νομοθεσία. Παρ' όλα αυτά, εάν τα κανάλια 67-69 δεν καταστούν διαθέσιμα, το φάσμα για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες θα μειωθεί σε μόλις 2 x 5 MHz και το όφελος θα μειωθεί σημαντικά. Υιοθετώντας τα κανάλια 57, 58 και 65, για παράδειγμα, για στρατιωτική χρήση θα αντιμετώπιζε αυτό το πρόβλημα σε μεγάλο βαθμό. Μικρότερο όφελος σε σχέση με το ψηφιακό μέρισμα, θα υπήρχε πιθανότατα στην απελευθέρωση επιπλέον καναλιών (π.χ 28-32) αλλά αυτά δεν θα ήταν εναρμονισμένα. Θα μπορούσαν να αποδειχθούν χρήσιμα για υπηρεσίες δημόσιας ασφάλειας ή νέες υπηρεσίες ευρυεκπομπής όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας HDTV.

4.4 Τεχνικοί κανονισμοί για την εναρμονισμένη ζώνη 790-862 MHz

Ύστερα από απόφαση της Ευρωπαϊκής επιτροπής προβλέπεται ότι όλα τα κράτη-μέλη που πρόκειται να διαθέσουν τη ζώνη 790-862 MHz για υπηρεσίες εκτός τηλεοπτικής μετάδοσης, θα πρέπει παράλληλα να υιοθετήσουν τους ίδιους εναρμονισμένους τεχνικούς κανόνες. Οι τεχνικοί αυτοί κανόνες εξασφαλίζουν ότι ο τωρινός εξοπλισμός ραδιοεπικοινωνιών (κινητά τηλέφωνα ή σταθμοί βάσης) στη ζώνη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για ασύρματα ευρυζωνικά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα ο σημερινός διαχωρισμός συχνοτήτων ο οποίος έχει προταθεί από τη CEPT για την εναρμονισμένη ζώνη συχνοτήτων και για FDD συστήματα δίνεται στο παρακάτω σχήμα.

791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821 - 832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Downlink						Duplex gap	Uplink					
30 MHz (6 blocks of 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocks of 5 MHz)					

Σχήμα 4.7 FDD τεχνική στις συχνότητες 790-862 MHz

Όπως φαίνεται στο σχήμα, αποτελείται από έξι μπλοκ των 5MHz τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη. Τα μπλοκ αυτά διαχωρίζονται μεταξύ τους με ένα διάστημα (duplex gap) της τάξεως των 11MHz, ενώ για την προστασία έναντι των παρεμβολών με τα DTT συστήματα έχει εισαχθεί ένα διάστημα φύλαξης μεγέθους 1MHz στις συχνότητες 790-791 MHz. Το αντίστοιχο σχήμα για την TDD λειτουργία φαίνεται παρακάτω.

790-797	797-802	802-807	807-812	812-817	817-822	822-827	827-832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Guard band	Unpaired												
7 MHz	65 MHz (13 blocks of 5 MHz)												

Σχήμα 4.8 TDD τεχνική στις συχνότητες 790-862 MHz

Για τα TDD συστήματα προτείνεται μία ζώνη προστασίας της τάξεως των 7 MHz, για ενδεχόμενες παρεμβολές που θα προκαλέσει η άνω ζεύξη των TDD συστημάτων. Τα FDD συστήματα δεν απαιτούν τόσο μεγάλο εύρος ζώνης, καθώς η άνω ζεύξη των FDD συστημάτων τοποθετείται στις συχνότητες 832-862 MHz, παρέχοντας έτσι ικανοποιητική φασματική απόσταση από το κοντινότερο DTT κανάλι για την αποφυγή παρεμβολών.

Όσον αφορά τους σταθμούς βάσης, δεν είναι υποχρεωτική η θέσπιση ενός ορίου EIRP εντός των ορίων του φασματικού τμήματος. Ωστόσο τα κράτη μπορούν να καθορίζουν τα όρια και εφόσον δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος, τα όρια αυτά κατά κανόνα κυμαίνονται στην περιοχή από 56 dBm/5 MHz έως 64 dBm/5 MHz. Για περιοχές εκτός ορίου φάσματος τα όρια του EIRP για TDD και FDD συστήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Περιοχή συχνοτήτων για εκπομπές εκτός φασματικού τμήματος	Μέγιστη μέση EIRP εκτός φασματικού τμήματος	Εύρος ζώνης μέτρησης
Χρησιμοποιούμενες συχνότητες FDD ανερχόμενης ζεύξης	- 49,5 dBm	5 MHz
Χρησιμοποιούμενες συχνότητες για TDD	- 49,5 dBm	5 MHz

Πίνακας 4.2 Όρια του EIRP εκτός φασματικού τμήματος για σταθμό βάσης

Επίσης στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα όρια του EIRP εκτός φασματικού τμήματος για σταθμό βάσης σε συχνότητες κάτω από τα 790 MHz.

Περίπτωση		EIRP εντός φασματικού τμήματος σταθμών βάσης, P dBm/10 MHz	Μέγιστη μέση EIRP εκτός φασματικού τμήματος	Εύρος ζώνης μέτρησης
A	Για προστατευόμενα κανάλια τηλεόρασης	$P \geq 59$	0 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P - 59) dBm	8 MHz
		$P < 36$	- 23 dBm	8 MHz
B	Για κανάλια τηλεόρασης ενδιάμεσου επιπέδου προστασίας	$P \geq 59$	10 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P - 49) dBm	8 MHz
		$P < 36$	- 13 dBm	8 MHz
Γ	Για κανάλια τηλεόρασης χωρίς προστασία	Χωρίς περιορισμό	22 dBm	8 MHz

Πίνακας 4.3 Όρια EIRP εκτός φασματικού τμήματος για σταθμό βάσης σε συχνότητες κάτω από τα 790 MHz.

Οι περιπτώσεις A, B και Γ που φαίνονται στον πίνακα μπορούν να ισχύουν ανά κανάλι μετάδοσης ή/και ανά περιοχή, ώστε το ίδιο κανάλι εκπομπής να έχει διαφορετικά επίπεδα προστασίας σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και διαφορετικά τηλεοπτικά κανάλια να έχουν διαφορετικά επίπεδα προστασίας στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Τα κράτη εφαρμόζουν τη βασική τους υποχρέωση στην περίπτωση A, όταν κατά την εγκατάσταση επίγειων συστημάτων ικανών να παρέχουν υπηρεσίες ηλεκτρονικών επικοινωνιών είναι σε χρήση επίγεια ψηφιακά κανάλια εκπομπής. Τα κράτη μπορούν να εφαρμόσουν τις βασικές απαιτήσεις στις περιπτώσεις A, B ή Γ σε περιπτώσεις όπου τα σχετικά κανάλια εκπομπής δεν είναι σε χρήση κατά την εγκατάσταση επίγειων συστημάτων ικανών να παρέχουν υπηρεσίες ηλεκτρονικών επικοινωνιών. Λαμβάνουν υπόψη ότι οι περιπτώσεις A και B παρέχουν τη δυνατότητα μεταγενέστερης ενεργοποίησης των σχετικών καναλιών εκπομπών για επίγεια ψηφιακή εκπομπή, ενώ η περίπτωση Γ ενδείκνυται όταν δεν υπάρχουν σχέδια χρησιμοποίησης των σχετικών τηλεοπτικών καναλιών.

4.5 Τεχνολογικές και εμπορικές εξελίξεις σε σχέση με το ψηφιακό μέρισμα

Ένας σημαντικός αριθμός εξελίξεων έχει σημειωθεί στον τομέα που αφορά το ψηφιακό μέρισμα και μπορεί να γίνει εφικτή η απελευθέρωση του φάσματος, για παράδειγμα, επιτρέποντας υπηρεσίες ψηφιακής τηλεόρασης να χρησιμοποιούν το φάσμα πιο αποδοτικά. Η βελτιωμένη απόδοση και το χαμηλότερο κόστος των υπηρεσιών 3G έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της αγοράς για κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες τόσο που σε ορισμένες χώρες η τεχνολογία κινητών υπηρεσιών αποτελεί πολύ μεγάλο μέρος της ευρύτερης αγοράς ευρυζωνικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα η διείσδυση της κινητής ευρυζωνικής πρόσβασης είναι σχεδόν διπλάσια του ευρωπαϊκού μέσου όρου και οι κινητές αποτελούν σχεδόν τις μισές από το σύνολο των ευρυζωνικών συνδέσεων.

Η ανάγκη για ασύρματη ευρυζωνικότητα χαμηλού κόστους στις αραιοκατοικημένες περιοχές φαίνεται από το σχέδιο του κράτους για τις επικοινωνίες (Government's Strategy for Electronic Communications) για την περίοδο 2008-2013, οποίο ανακοινώθηκε το Φεβρουάριο του 2008. Στις πιο απομακρυσμένες περιοχές θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ασύρματη πρόσβαση ενώ για την ελαχιστοποίηση του κόστους σε αυτές τις περιοχές πολλά θα εξαρτηθούν από την πρόσβαση σε φάσμα σε εναρμονισμένες ζώνες συχνοτήτων κάτω από 1GHz.

Στον τομέα των ευρεκπομπών, το πρόσφατα υιοθετημένο πρότυπο DVB-T2 προσφέρει τη δυνατότητα αύξησης της χωρητικότητας του καναλιού έως και 50% χωρίς να χρειάζεται αλλαγή του αρχικού σχεδιασμού. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει σχεδιαστεί εξ' αρχής να λαμβάνεται από τα ήδη υπάρχοντα οικιακά συστήματα κεραιών DVB-T και να συνυπάρχει με τις υπάρχουσες εκπομπές DVB-T. Το νέο σύστημα κωδικοποίησης MPEG-4/H.264 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το DVB-T2 και είναι περίπου δύο φορές πιο αποδοτικό από το MPEG-2 που χρησιμοποιείται για κανάλια περιορισμένης ευκρίνειας. Αν και υπάρχουν ορισμένες ανησυχίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα κατάλληλου εξοπλισμού εκπομπής και λήψης, τα πλεονεκτήματα σε αποδοτικότητα φάσματος του προτύπου DVB-T2 φαίνεται να είναι τόσο σημαντικά που θα ήταν άστοχο να παραμερίζαμε το προηγούμενο πρότυπο σε αυτό το σημείο.

Οι βασικές αλλαγές στο καινούριο πρότυπο είναι ένα πολύ βελτιωμένο σχήμα κωδικοποίησης (χρησιμοποιώντας κώδικες LDPC/BCH) το οποίο προσεγγίζει το όριο του Shannon όσο περισσότερο γίνεται, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ανώτερης τάξης διαμόρφωση (256 QAM). Κάποιες επιπρόσθετες βελτιώσεις παρέχουν προστασία στην περίπτωση κρουστικού θορύβου και στην περίπτωση καναλιών αντίστροφης διάδοσης.

Υπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, οι πρώτες εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι αυτές οι βελτιώσεις μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα ενός καναλιού 8 MHz έως και 50% χωρίς να χρειάζεται αλλαγή του αρχικού σχεδιασμού. Αυτό το νούμερο το οποίο θα πρέπει να περιμένουμε να επιβεβαιωθεί και σε δοκιμές μεγαλύτερης κλίμακας, είναι σίγουρα πολύ παραπάνω από το 30% που αναμενόταν αρχικά. Το σύστημα επίσης μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία επιτρέποντας στα δίκτυα SFN να καλύψουν μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές.

Τα προϊόντα κι οι υπηρεσίες οι οποίες χρησιμοποιούν το DVB-T2 έχουν ήδη γίνει εμπορικά διαθέσιμα στην αγορά και ένα πιθανό σενάριο θα ήταν η παροχή υπηρεσιών τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας με το DVB-T2 σε νέες συχνότητες μαζί με υπηρεσίες τηλεόρασης περιορισμένης ευκρίνειας που χρησιμοποιούν το DVB-T, όταν τελειώσει η αναλογική μετάδοση.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το MPEG-2 και το MPEG-4 δεν είναι κομμάτια των προτύπων DVB-T και DVB-T2. Τηλεοπτικά προγράμματα τα οποία έχουν κωδικοποιηθεί με οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους μπορούν να μεταδοθούν και με DVB-T και με DVB-T2, ενώ το MPEG-4 ήδη χρησιμοποιείται με το DVB-T στην Γαλλία και τη Νορβηγία. Χρησιμοποιώντας διαφορετική διαμόρφωση (π.χ 16 QAM αντί για 64 QAM) μπορούμε να βελτιώσουμε την κάλυψη κρατώντας ταυτόχρονα την ισχύ εκπομπής στα ίδια επίπεδα.. Για παράδειγμα στο Ηνωμένο Βασίλειο το BBC χρησιμοποιεί 16 QAM στα κανάλια 1 και B για να παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη, ενώ μόλις ολοκληρωθεί η ψηφιακή μετάβαση και η ισχύς μπορεί να αυξηθεί, το BBC θα χρησιμοποιήσει την 64 QAM.

Όσον αφορά την Ελλάδα, υπάρχουν σίγουρα ορισμένες ανησυχίες σχετικά με την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού εκπομπής και λήψης και σχετικά με την καθυστέρηση για τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή, αλλά τα οφέλη στην απόδοση φάσματος στο DVB-T2 φαίνονται να είναι τόσο σημαντικά που θα ήταν άστοχο να επιμείνουμε στο παλαιότερο πρότυπο σε αυτό το στάδιο. Το Ηνωμένο Βασίλειο, έχοντας ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών με εξοπλισμό μη συμβατό με το DVB-T2, πρόκειται να αντιμετωπίσει σημαντικά προβλήματα για να καταφέρει την μετάβαση στο νέο πρότυπο, το οποίο αναπόφευκτα θα πάρει αρκετά χρόνια. Η Ελλάδα είναι στην ευχάριστη θέση να έχει την ευκαιρία να το αποφύγει και να εγκαταστήσει ένα δίκτυο DTT υψηλής απόδοσης. Δεν απαιτούνται αλλαγές στο παρόν σχέδιο συχνοτήτων DTT για να μπορέσει να χρησιμοποιήσει το DVB-T2.

Επιπλέον, ειδικά στις ΗΠΑ έχει εκδηλωθεί έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τεχνολογίας συστημάτων cognitive radio σε ένα μέρος του φάσματος που χρησιμοποιείται για τηλεοπτικές μεταδόσεις. Αυτές οι τεχνολογίες εκμεταλλεύονται τα κενά που υπάρχουν στη χρησιμοποίηση των συχνοτήτων UHF, ανιχνεύοντας ποιες συχνότητες χρησιμοποιούνται ήδη για τηλεοπτική μετάδοση σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία και χρησιμοποιώντας τις υπόλοιπες συχνότητες σε σχετικά χαμηλή ισχύ εκπομπής οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για σταθερές ή κινητές ασύρματες εφαρμογές. Αν και χρειάζεται περισσότερες έρευνες να γίνουν όσον αφορά τη συμβατότητα αυτών των συσκευών με δίκτυα ευρυεκπομπής υψηλής πυκνότητας και άλλες εφαρμογές, μπορεί μακροπρόθεσμα να είναι κατάλληλες για μετάδοση ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών.

Η απελευθέρωση επιπρόσθετου φάσματος κάτω από το 1 GHz για κινητές υπηρεσίες είναι πιθανό να έχει μεγαλύτερη επίδραση σε χώρες που στηρίζονται περισσότερο στην κινητή τεχνολογία για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών. Η Ελλάδα αυτή τη στιγμή βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα σταθερής ευρυζωνικότητας ενώ σε αντίθεση έχει πολύ υψηλά επίπεδα κινητής ευρυζωνικότητας. Το σχέδιο του κράτους για τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες-

ες για την περίοδο 2008-2013 είναι προφανές ότι δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην ασύρματη πρόσβαση παρά στο xDSL σε αγροτικές περιοχές. Η απουσία μίας ενσύρματης ευρυζωνικής επιλογής στην Ελλάδα σημαίνει ότι η κινητή ευρυζωνική σύνδεση αναμένεται να παίξει πολύ πιο σημαντικό ρόλο παρέχοντας μία συμφέρουσα εναλλακτική λύση από το xDSL απ' ό τι στις άλλες χώρες όπου υπάρχει η δυνατότητα ενσύρματης σύνδεσης. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αποτελούν ισχυρό κίνητρο για την απελευθέρωση του εναρμονισμένου ψηφιακού μερίσματος.

4.6 Επιλογές σχεδίασης δικτύου

Μέχρι στιγμής έχουν υιοθετηθεί δύο εναλλακτικοί τρόποι για τη σχεδίαση των DTT δικτύων: MFN (multi-frequency network) ή SFN (single-frequency network). Σε ένα MFN δίκτυο, διαφορετικές συχνότητες ανατίθενται σε κάθε σταθμό εκπομπής και η κάλυψη παρέχεται από έναν πομπό. Στην περίπτωση δικτύου SFN, η ίδια συχνότητα ανατίθεται σε όλους τους σταθμούς εκπομπής, οι οποίοι θα πρέπει να είναι συνεχώς συντονισμένοι μεταξύ τους και να εκπέμπουν όλοι το ίδιο σήμα. Η κάλυψη επιτυγχάνεται με τη βοήθεια όλων των πομπών καθώς δεν μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα.

Στην περίπτωση χρησιμοποίησης SFN δικτύων υπάρχουν μερικές εναλλακτικές προσεγγίσεις που μπορούν να υιοθετηθούν, όπως:

- Χρήση μερικών πομπών υψηλής ισχύος
- Χρήση λιγότερων πομπών μικρότερης ακτινοβολούμενης ισχύος
- Χρήση gap-fillers (σταθμοί χαμηλής ισχύος) για την υποστήριξη των κύριων σταθμών

Επιπλέον, τα δίκτυα SFN μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή σε εθνική ή σε τοπική κλίμακα. Τα κυριότερα μειονεκτήματα από τη χρήση SFNs είναι ότι πρέπει να θυσιάσει ορισμένη χωρητικότητα δεδομένων για να υπάρχει η δυνατότητα ικανοποιητικών διαστημάτων φύλαξης, ενώ χάνεται η δυνατότητα παροχής τοπικού περιεχομένου.

Το πλεονέκτημα των δικτύων SFN είναι μεγαλύτερη απόδοση φάσματος, επιτρέποντας έτσι σε έναν μεγαλύτερο αριθμό ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών προγραμμάτων, σε σχέση με τα παραδοσιακά MFN δίκτυα, να εκπέμπουν στην ίδια περιοχή του φάσματος. Ένα SFN μπορεί να αυξήσει την περιοχή κάλυψης και να μειώσει την πιθανότητα εξασθένησης της ισχύος σε σύγκριση με ένα MFN, αφού η συνολική λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να αυξηθεί στο ενδιάμεσο μεταξύ των πομπών. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ σημαντικός για δίκτυα κινητής ή φορητής λήψης.

Ο σχεδιασμός δικτύου που υιοθέτησε η Ελλάδα βασίζεται στην τοπική χρήση των SFNs.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες ευρύτερες περιοχές κάλυψης (ΕΠΨΕ) υπάρχουν περισσότερα από ένα δίκτυα SFN με σκοπό να επιτευχθεί η απαιτούμενη κάλυψη. Ακόμα δεν έχει ξεκαθαριστεί αν είναι δυνατή η χρησιμοποίηση gap-fillers με σκοπό να μειωθούν τα κανάλια που απαιτούνται.

4.7 Θέματα διασυνοριακού συντονισμού

Σε περίπτωση που η πλειοψηφία των γειτονικών χωρών της Ελλάδας υιοθετήσουν την εναρμονισμένη προσέγγιση για απελευθέρωση της ζώνης 790-862 MHz για άλλες εφαρμογές (όχι αναμετάδοση) που όπως κινητές υπηρεσίες, πρόκειται να υπάρξουν λίγοι περιορισμοί για τη χρήση του φάσματος. Οι διασυνοριακές συμφωνίες έχουν ήδη τεθεί σε ισχύ για κινητές υπηρεσίες σε άλλες ζώνες συχνοτήτων και θα πρέπει να εφαρμοστούν επίσης για τη ζώνη 790-862 MHz. Παρ' όλα αυτά, προς το παρόν φαίνεται ότι είναι πιθανό η Ιταλία να αποφασίσει να μην υιοθετήσει την πρόταση για το εναρμονισμένο φάσμα και μπορεί να διατηρήσει μεταδόσεις υψηλής ισχύος μέσα σε αυτή την ζώνη συχνοτήτων.

Στην πράξη, από τις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί φαίνεται ότι η επίδραση της συνεχιζόμενης χρήσης της εναρμονισμένης ζώνης για DTT από την Ιταλία, πάνω στις κινητές υπηρεσίες στην Ελλάδα, θα περιοριζόταν κυρίως σε ορεινές αραιοκατοικημένες περιοχές. Εξαίρεση θα μπορούσε να αποτελέσει το νησί της Κέρκυρας και θα ήταν προτιμότερο να γίνουν πιο λεπτομερείς μελέτες για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα.

Σε αυτά το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα κανάλια 67-69 περιλαμβάνονται σε πολλές ψηφιακές παραχωρήσεις σε άλλες γειτονικές χώρες στα σύνορα ή κοντά στα σύνορα της Ελλάδας. Αν και αυτό δεν θα είναι πρόβλημα σε περίπτωση που η Ελλάδα και οι γειτονικές προς αυτήν χώρες υιοθετήσουν το εναρμονισμένο ψηφιακό μέρισμα, μπορεί να έχει επίδραση σε οποιαδήποτε συνεχιζόμενη μακροπρόθεσμη χρήση αυτών των συχνοτήτων από το στρατό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά την εν λόγω πειραματική διαδικασία ελήφθησαν μετρήσεις παραμέτρων ποιότητας ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος, υπό την παρεμβολή από σήματα ευρείας ζώνης LTE FDD και LTE TDD, ενώ ο τηλεοπτικός ψηφιακός δέκτης κινούταν στο χώρο. Στο παρόν σύγγραμμα παρουσιάζεται η ανάλυση για τις μετρήσεις που ελήφθησαν υπό την επίδραση του συστήματος LTE FDD. Οι μετρήσεις και οι αντίστοιχες παρατηρήσεις για το LTE TDD παρουσιάζονται στην διπλωματική εργασία του συναδέλφου Χρήστου Ζαγανά.

5. Όργανα μέτρησης και συνδέσεις του πειράματος

Ολόκληρη η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στην αίθουσα Η/Μ συμβατότητας (EMC). Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν ένας ψηφιακός δέκτης, μία γεννήτρια ευρυζωνικών σημάτων, ένας αναλυτής φάσματος, δύο κεραίες λήψης, μία κεραία εκπομπής καθώς και ένα εξειδικευμένο λογισμικό για την επιλογή των επιθυμητών παραμέτρων του εκπεμπόμενου σήματος από τη γεννήτρια. Παρακάτω ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή αυτών των οργάνων και δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους:

- Ψηφιακός τηλεοπτικός δέκτης Promax TV Explorer II+ .

Ο εν λόγω φορητός ψηφιακός τηλεοπτικός δέκτης έχει σχεδιασθεί για να πραγματοποιεί μετρήσεις κατά τη μετάβαση από το αναλογικό στο ψηφιακό σήμα. Είναι κατάλληλος για κάλυψη επίγειων, δορυφορικών, καλωδιακών και κινητών σημάτων, ενώ υποστηρίζει επίσης λειτουργίες τηλεόρασης (αναλυτής φάσματος, μετρήσεις, κωδικοποιητής σήματος). Στο πείραμα μας ο δέκτης ήταν συντονισμένος σε κεντρική συχνότητα 682 MHz (678-686 MHz) στο κανάλι 47 το μπουκέτο του οποίου περιλαμβάνει τους σταθμούς ΣΚΑΙ, Antenna και STAR. Επίσης χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή έξι τιμών Power, CNR, MER,

Μετρήσεις	Άμεση απεικόνιση των μετρήσεων
Αναλογικό	Level, Video/Audio, C/N
Ψηφιακό	Ισχύς, C/N, προσδιορισμός καναλιού
COFDM 2k/4k/8k	MER, CBER, VBER, Noise margin, MER by carrier
QPSK	MER, CBER, VBER, Noise margin
8PSK	MER, CBER, LBER
QAM 16/32/64/128/256	BER, MER

CBER και VBER, οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Σε επόμενη ενότητα γίνεται εκτενής αναφορά στο τι είναι το καθένα από τα μετρούμενα μεγέθη και ποια η σημασία τους. Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας με τα κύρια χαρακτηριστικά του ψηφιακού δέκτη.

Πίνακας 5.1 Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά ψηφιακού δέκτη



Σχήμα 5.1 Ψηφιακός δέκτης Promax Explorer II+

- Κεραία λήψης ψηφιακού δέκτη (Meliconi AD-Elegance)

Η κεραία αυτή ήταν συνδεδεμένη με τον ψηφιακό τηλεοπτικό δέκτη και χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη του ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος. Πρόκειται για μία ενισχυμένη εσωτερική κεραία, η οποία προσφέρει πολύ καλή λήψη σημάτων DAB και DVB-T με τη βοήθεια αποκωδικοποιητή. Παρέχει επίσης βέλτιστη ενίσχυση του σήματος έως και 20dB χάρη στην τεχνολογία Digital Vision. Το σήμα που τελικά καταφθάνει στον δέκτη είναι αρκετά ευκρινές, χάρη σε ειδικά φίλτρα τα οποία αποβάλλουν διάφορες εξωτερικές παρεμβολές, ενώ χαρακτηρίζεται επίσης

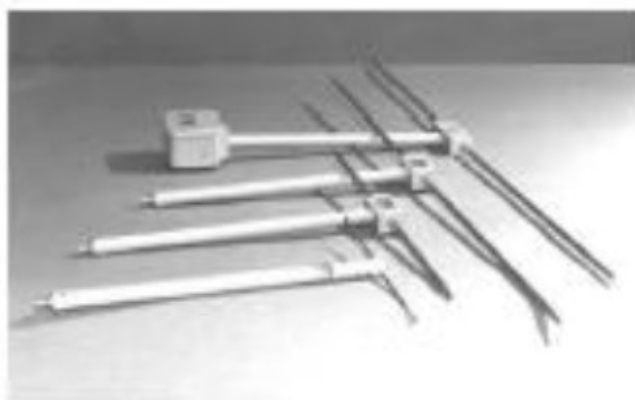
από πολύ χαμηλό συντελεστή θορύβου (<3.5dB). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η κεραία αυτή ήταν βέλτιστα προσανατολισμένη με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη λήψη του ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος και μετακινούνταν μέσα σε ένα διάστημα 10-280 cm με βήμα 10 cm.

- Κεραία μέτρησης πεδίου του αναλυτή φάσματος (Electro - Metrics Tunable Dipole Antenna EM 6927)

Η συγκεκριμένη κεραία είναι ένα δίπολο το οποίο λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων 400-1000 MHz. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ισχύος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ενώ ήταν τοποθετημένη πολύ κοντά στην κεραία λήψης του ψηφιακού δέκτη. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα τεχνικά της χαρακτηριστικά.

Βάρος	227g
Μήκος	46.7cm
Διάμετρος ράβδου	46.7cm
Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου	50Ohms
Μέγιστη Απώλεια λόγω συνδεσμολογίας	0.5dB
VSWR	< 1:6:1
Μέγιστη συνεχόμενη ισχύς	20W

Πίνακας 5.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά κεραίας μετρητή φάσματος



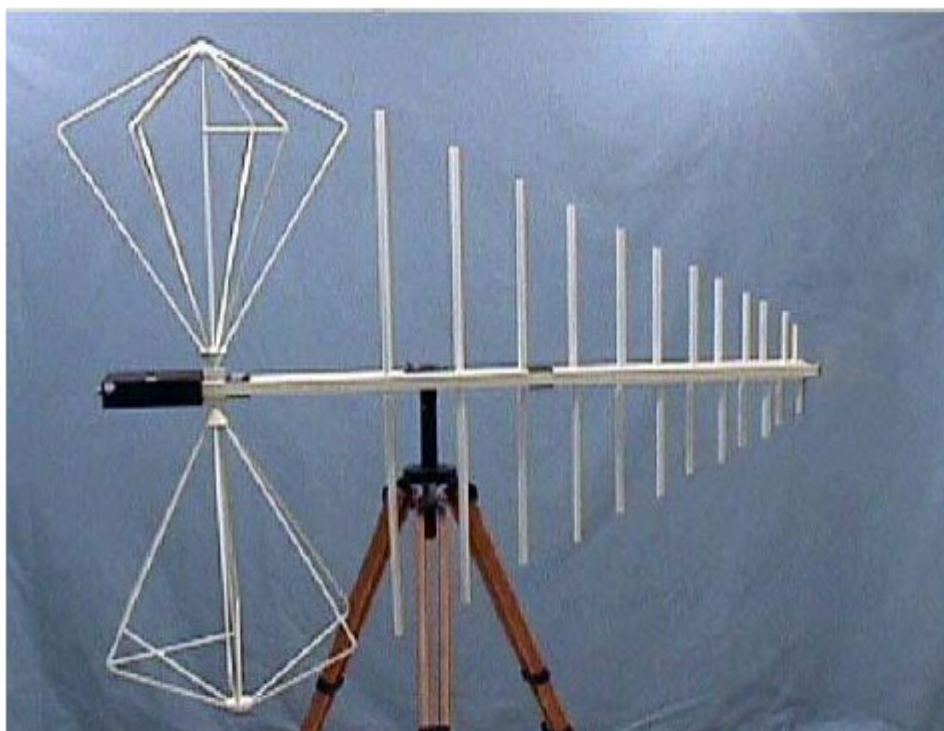
Σχήμα 5.2 Κεραία λήψης Electro – Metrics Tunable Dipole Antenna EM6927

- Κεραία εκπομπής παρεμβολών (Electro – Metrics EM-6917C - 1)

Η κεραία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπομπή και λήψη στη ζώνη συχνοτήτων 30 MHz – 1 GHz. Στο πείραμα μας χρησιμοποιήθηκε για την εκπομπή ευρυζωνικών σημάτων υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών. Τα σήματα με τα οποία τροφοδοτήθηκε η συγκεκριμένη κεραία ήταν LTE FDD και LTE TDD. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της φαίνονται παρακάτω.

Βάρος	4.5kg
Μήκος/Πλάτος/Ύψος	1.45/1.02/0.55m
Διάμετρος ράβδου	46.7cm
Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου	50Ohms (ονομαστική)
Μέγιστη Απώλεια λόγω συνδεσμολογίας	0.5dB
VSWR	< 2:0:1
Μέγιστη ισχύς	1KW

Πίνακας 5.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά κεραίας παρεμβολών



Σχήμα 5.3 Κεραία εκπομπής παρεμβολών

- Γεννήτρια ευρυζωνικών σημάτων (Agilent MXG Vector Signal Generator N5182A)

Η γεννήτρια αυτή χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ευρυζωνικών σημάτων κινητής επικοινωνίας με τα οποία τροφοδοτήθηκε η κεραία εκπομπής. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας φαίνονται παρακάτω.

Εύρος Συχνοτήτων	100kHz-6MHz
Εύρος παρεχόμενης ισχύος	-110dBm - +17dBm
SWR	$\leq 2.1\text{GHz } 1:4:1$
Παρεχόμενα σήματα	WLAN, WiMAX, CDMA,cdma2000, GSM, TD- SCDMA, WCDMA.
Διαμόρφωση	PSK,QAM,FSK,MSK,ASK

Πίνακας 5.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας



Σχήμα 5.4 Η γεννήτρια Agilent MXG Vector Signal Generator N5182A

- Αναλυτής φάσματος (Agilent E4403B-BAS ESA-L Basic Spectrum Analyzer)

Ο συγκεκριμένος αναλυτής φάσματος λειτουργούσε σε συχνότητες 9kHz – 3GHz και συνδεόταν απευθείας με το δίπολο. Ο αναλυτής χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο της συχνότητας, ενώ μετρούσε επίσης και την ισχύ του σήματος το οποίο λάμβανε από το δίπολο.

- Λογισμικό επιλογής παραμέτρων των εκπεμπόμενων ευρυζωνικών σημάτων (Agilent Signal Studio)

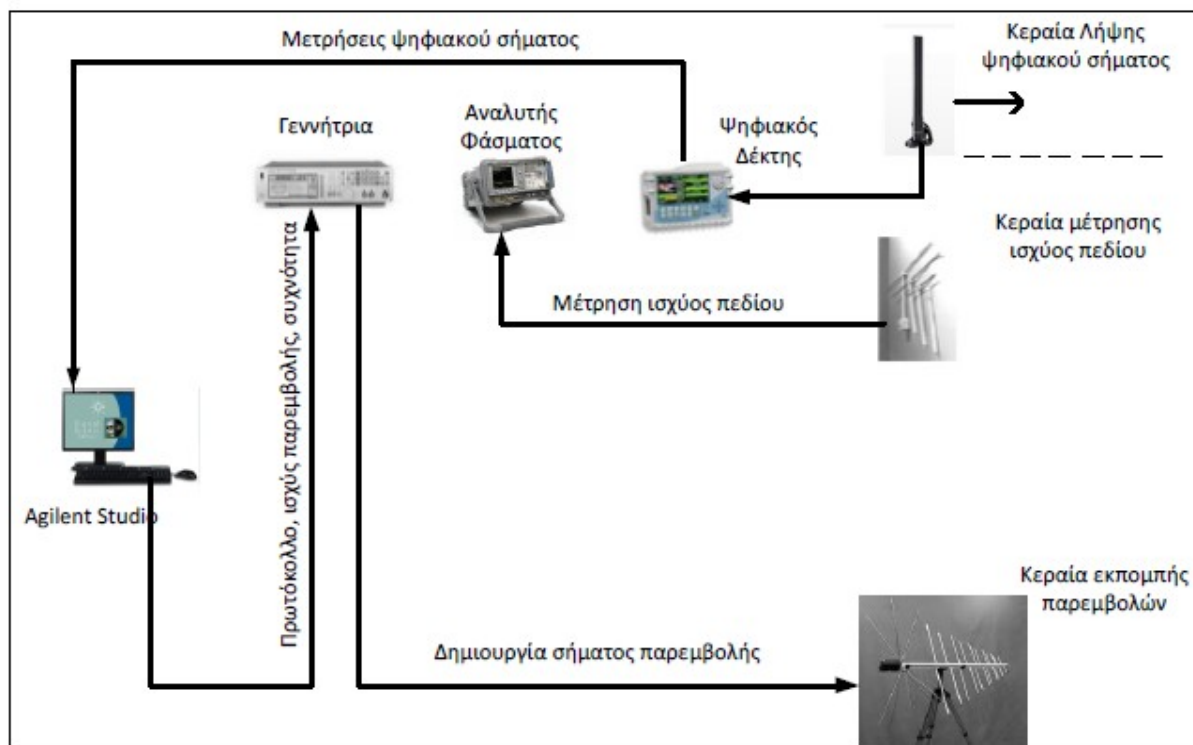
Πολύ χρήσιμο εργαλείο κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν το παραπάνω λογισμικό. Μέσω αυτού του προγράμματος περνούσαμε τις κατάλληλες παραμέτρους (συχνότητα, ισχύ και πρωτόκολλο κινητής επικοινωνίας) στη γεννήτρια

και η γεννήτρια με τη σειρά της έστειλε το αντίστοιχο σήμα στην κεραία εκπομπής των παρεμβολών. Τέλος, οι μετρήσεις αποθηκευόντουσαν στη βάση δεδομένων του ψηφιακού δέκτη με τη μορφή αρχείων μετρήσεων (data loggers), τα οποία ύστερα μετατράπηκαν σε αναγνώσιμη μορφή μέσω του λογισμικού Signal Studio και ειδικότερα μέσω του προγράμματος pk tools.



Σχήμα 5.5 Αναλυτής φάσματος (Agilent E4403B-BAS ESA-L Basic Spectrum Analyzer)

Παρακάτω δίνεται επίσης ένα συνοπτικό διάγραμμα το οποίο δείχνει την λογική διαδρομή που ακολούθησαν τα σήματα που χρησιμοποιήθηκαν μεταξύ των οργάνων.



Σχήμα 5.6 Διαδρομές σημάτων του πειράματος

5.2 Πειραματική διάταξη

Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα χρειάστηκαν δύο σέτ οργάνων μέτρησης. Το ένα σέτ αποτελούνταν από την γεννήτρια παρεμβολών και το laptop μέσω του οποίου δινόντουσαν οι διάφορες παράμετροι στην γεννήτρια μέσω του λογισμικού διαχείρισης Agilent Signal Studio. Το άλλο σέτ περιελάμβανε τον ψηφιακό δέκτη, την κεραία του δέκτη καθώς και τον αναλυτή φάσματος. Το δίπολο (κεραία) του δέκτη στηρίχθηκε σε ένα τρίποδο σε κοντινή απόσταση από το τραπέζι έτσι ώστε να βρίσκεται στο ίδιο ύψος με την κεραία του ψηφιακού δέκτη (promax). Για να έχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη λήψη και μέτρηση του πεδίου στο δέκτη, το δίπολο ήταν βέλτιστα προσανατολισμένο με την κεραία εκπομπής των ευρυζωνικών σημάτων κι η απόσταση του με την κεραία λήψης ήταν 50 cm. Στα σχήματα παρακάτω δίνεται η διάταξη κι η συνδεσμολογία των οργάνων στα δύο τραπέζια που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 5.7 Ο υπολογιστής κι η γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 5.8 Η κεραία εκπομπής ευρυζωνικών σημάτων

Η κεραία εκπομπής τοποθετήθηκε δίπλα στο τραπέζι με τη γεννήτρια και τον υπολογιστή σε μία γωνία της αίθουσας EMC σε απόσταση άνω των 3m από την κεραία του δέκτη, έτσι ώστε η κεραία του δέκτη να βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της κεραίας εκπομπής. Επιπλέον, ο κύριος λοβός ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής ήταν βέλτιστα προσανατολισμένος τόσο ως προς το δίπολο όσο κι ως προς την κεραία λήψης του ψηφιακού σήματος.



Σχήμα 5.9 Κεραία ψηφιακού δέκτη και ο αναλυτής φάσματος

5.3 Μεγέθη που μετρήθηκαν

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι παράμετροι καναλιού που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

- Λόγος σήματος προς θόρυβο (Carrier to Noise Ratio – CNR).

Η συγκεκριμένη παράμετρος αναφέρεται στο λόγο της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και μετριέται σε dB. Αποτελεί ένα από τα πολύ σημαντικά μεγέθη για την αξιολόγηση της ποιότητας του σήματος. Είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια καθώς είναι αδύνατον να απενεργοποιηθεί ο αναμεταδότης και να μετρηθεί μόνο ο θόρυβος. Στο συγκεκριμένο πείραμα ο ψηφιακός δέκτης μετρούσε το θόρυβο σε συχνότητα $f_{\text{θορύβου}} = f_{\text{συντονισμού}} \pm 1/2 * \text{εύρος ζώνης καναλιού}$.

- Περιθώριο Θορύβου (Noise Margin).

Το περιθώριο θορύβου μας δείχνει το κατά πόσο η τιμή του CNR του σήματος που

λαμβάνει ο δέκτης, υπερβαίνει μια τιμή κατωφλιού (CNR_{th}), που χρειάζεται για τη σωστή λήψη του σήματος. Πιο ειδικά το περιθώριο θορύβου προκύπτει από τη σχέση $Noise\ Margin\ (dB) = CNR(dB) - CNR_{th}(dB)$. Το περιθώριο θορύβου δεν είναι σταθερό και μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι (απόσταση, εξασθένιση, ισχύς εκπεμπόμενου σήματος, παρουσία θορύβου στο κανάλι). Σε περίπτωση που το noise margin αυξηθεί σημαίνει μείωση του θορύβου στο κανάλι τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σε αντίθετη περίπτωση αν το noise margin μειωθεί σημαίνει αύξηση του θορύβου στο κανάλι τη δεδομένη στιγμή.

- **Ισχύς Καναλιού (Power).**

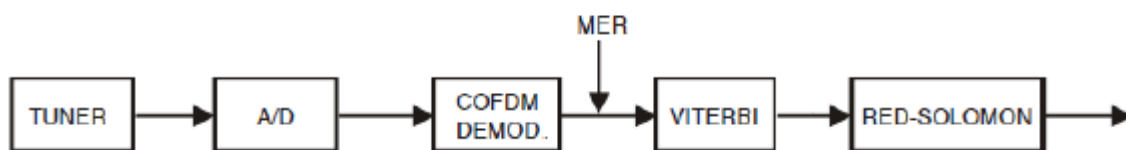
Αυτή η παράμετρος μας δείχνει τα επίπεδα του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη. Στο πείραμα μας η μέτρηση της ισχύος του καναλιού έγινε σε dBμV/m υποθέτοντας ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε όλο το εύρος του καναλιού.

- **Ρυθμός Σφαλμάτων Διαμόρφωσης (Modulation Error Ratio – MER).**

Αυτό το μέγεθος είναι ενδεικτικό της ποιότητας του καναλιού και συνδέεται άμεσα με τον ρυθμό μετάδοσης εσφαλμένων bit στο κανάλι. Ο ρυθμός σφαλμάτων διαμόρφωσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος των μεταδιδόμενων συμβόλων (P_{signal}) του σηματοστερισμού της διαμόρφωσης του καναλιού, προς την ισχύ του σφάλματος διαμόρφωσης. Η μονάδα μέτρησης του είναι dB.

$$MER_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{P_{Error}} \right)$$

Ο λόγος αυτός μας δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η ισχύς των μεταδιδόμενων συμβόλων σε σχέση με το σφάλμα διαμόρφωσης και γιαυτό θέλουμε ο λόγος αυτός να παίρνει μεγάλες τιμές.

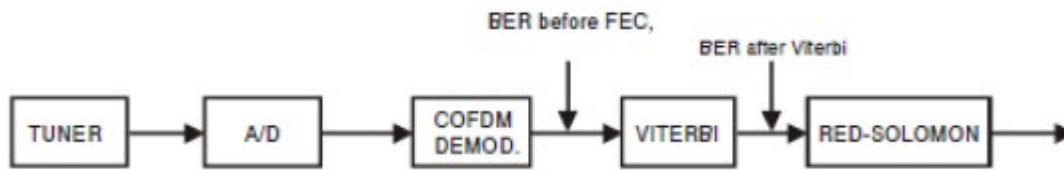


Σχήμα 5.10 Μέτρηση MER στον ψηφιακό δέκτη

- **Ρυθμός Εσφαλμένων Bit πριν και μετά τον αποκωδικοποιητή Viterbi (CBER και VBER).**

Ο ρυθμός εσφαλμένων bit μας δείχνει την ποιότητα του λαμβανόμενου ψηφιακού σήματος εκφράζοντας το πόσο συχνά λαμβάνουμε ένα λανθασμένο bit από την εισερχόμενη ροή δεδομένων. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του CBER τόσο καλύτερη λήψη έχουμε στο δέκτη. Στο πείραμα μας οι μετρήσεις της παραμέτρου αυτής έγιναν πριν και μετά τον αποκωδικοποιητή Viterbi, κι έτσι μετρήθηκαν δύο ξεχωριστά μεγέ-

θη CBER (Channel Bit Error Ratio) και VBER (Viterbi Bit Error Ratio). Όλα αυτά φαίνονται αναλυτικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.11 Μέτρηση παραμέτρων CBER και VBER στον ψηφιακό δέκτη

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι μετρήσεις των παραπάνω πέντε παραμέτρων γίνονταν από τον ψηφιακό δέκτη (Power, CNR, Noise Margin, CBER, VBER). Εκτός των παραπάνω τιμών μετρούσαμε και την ισχύ του πεδίου που έφτανε στο δίπολο με τη βοήθεια του αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer).

5.4 Διαδικασία λήψεως μετρήσεων

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάσαμε τα όργανα μέτρησης του πειράματος, τη συνδεσμολογία μεταξύ τους, καθώς και τις παραμέτρους καναλιού που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία διεξαγωγής των μετρήσεων.

Ο σκοπός του πειραματικού μέρους της εργασίας ήταν η εύρεση της τιμής της παρεμβάλλουσας ισχύος σε κάθε θέση (10cm – 280cm) και για τις δύο συχνότητες 682 MHz και 688,5 MHz, έτσι ώστε ο ψηφιακός δέκτης να μπορεί να κάνει σωστή λήψη του σήματος. Ο ψηφιακός δέκτης ήταν μονίμως συντονισμένος στη συχνότητα 682 MHz, που είναι η κεντρική συχνότητα του καναλιού 47. Δεδομένου ότι τα κανάλια έχουν εύρος 8 MHz, το επόμενο κανάλι περιλαμβάνει τις συχνότητες 686 – 694 MHz. Όμως το γειτονικό κανάλι καταλαμβάνεται από το παρεμβαλλόμενο πρωτόκολλο LTE FDD το οποίο έχει εύρος 5 MHz, άρα η κεντρική συχνότητα είναι στα 2,5 MHz και συνεπώς η κεντρική συχνότητα του διπλανού καναλιού από το κανάλι 47 θα είναι 688,5 MHz. Για αυτό το χρησιμοποιούμε ως συχνότητα του πρωτοκόλλου παρεμβολής.

Σε κάθε θέση η πρώτη μέτρηση γινόταν απουσία παρεμβολών με τη γεννήτρια κλειστή, ενώ μετρούσαμε το πεδίο κοντά στην κεραία του ψηφιακού δέκτη. Εν συνεχεία, μέσω του λογισμικού Agilent Signal Studio, τροφοδοτούσαμε τη γεννήτρια με το επιθυμητό ευρυζωνικό σήμα (πρωτόκολλο κινητών επικοινωνιών), ρυθμίζαμε τη συχνότητα και την ισχύ παρεμβολής. Βρισκόμενοι πλέον σε περιβάλλον παρεμβολών ο δέκτης δεν ήταν πάντα σε θέση να πραγματοποιήσει σωστή λήψη του σήματος.

Ο εντοπισμός της ισχύος παρεμβολής στην οποία ο δέκτης έκανε σωστή λήψη του σήματος γινόταν με δοκιμές. Έχοντας βρει αυτή την συγκεκριμένη αυτή ισχύ της γεννήτριας καταγραφόντουσαν οι μετρήσεις από από τον ψηφιακό δέκτη (Promax). Τα μετρούμενα με-

γέθη όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα ήταν POWER, CNR, MER, NOISE MARGIN, CBER και VBER. Επίσης καταγράψαμε και την τιμή ισχύος του αναπτυσσόμενου πεδίου στην κεραία λήψης του ψηφιακού δέκτη, μέσω του αναλυτή φάσματος.

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω πραγματοποιούνταν σε κάθε θέση της κεραίας λήψης του κινητού ψηφιακού δέκτη από 10cm έως 280cm, ενώ κάθε φορά η κεραία μετακινούνταν με βήμα 10cm. Επίσης εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι σε κάθε θέση η γεννήτρια παρεμβολών ήταν αρχικά κλειστή, ύστερα δίναμε σήμα παρεμβολής στα 682 MHz κι εν συνεχεία δίναμε το ευρυζωνικό σήμα στα 688,5 MHz.

Το πείραμα τελειώνει με την καταγραφή των μετρήσεων για το πρωτόκολλο LTE FDD.

5.5 Επεξεργασία των μετρήσεων - Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή θα γίνει στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων που ελήφθησαν για το πρωτόκολλο LTE FDD. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται με σκοπό να αποφανθούμε αν τα μετρούμενα μεγέθη POWER, CNR, MER, NOISE MARGIN, CBER και VBER ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, για κάθε μία από τις δύο συχνότητες 682 και 688,5 MHz, με τη γεννήτρια κλειστή ή ανοιχτή αντίστοιχα σε κάθε περίπτωση.

Αρχικά ορίζουμε διαστήματα τιμών τις οποίες μπορεί να πάρει κάθε μία παράμετρος σε κάθε περίπτωση, ενώ στη συνέχεια καταγράφουμε πόσες τιμές της παραμέτρου μετρήθηκαν μέσα σε αυτό το διάστημα και ταυτόχρονα υπολογίζουμε το δείκτη Π_i που είναι ο λόγος της συχνότητας εμφάνισης της τιμής της παραμέτρου μέσα στο εκάστοτε διάστημα τιμών. Ύστερα, υπολογίζουμε την πιθανότητα που έχει μία παράμετρος να βρεθεί μέσα σε ένα ορισμένο διάστημα τιμών παίρνοντας το ολοκλήρωμα, από το κάτω έως το πάνω όριο του διαστήματος, της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh :

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad x \geq 0,$$

ενώ η αντίστοιχη συνάρτηση κατανομής είναι:

$$F(x) = 1 - e^{-x^2/2\sigma^2} \quad x \in [0, \infty).$$

Το αποτέλεσμα καταγράφεται στο δείκτη Θ_i . Στη συνέχεια υπολογίζουμε για κάθε περίπτωση διαστήματος την τιμή $(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$ και τέλος υπολογίζουμε το άθροισμα αυτών των επιμέρους τιμών $\sum \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$. Τέλος ελέγχουμε εάν αυτό το άθροισμα είναι μικρότερο από 40,113 (ποσότητα που προκύπτει μέσα από στατιστικούς πίνακες). Εάν είναι μικρότερο τότε το συγκεκριμένο μέγεθος ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, αλλιώς αυτό

δεν ισχύει.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας δίνονται παρακάτω αναλυτικά για όλες τις περιπτώσεις:

• **682 MHz γεννήτρια κλειστή**

POWER

περιοχές τιμών (dBμV/m)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
41 - 46	5	5/26	0,06125825	0,280353361
46 - 48	5	5/26	0,027084737	1,007896992
48 - 50	5	5/26	0,026649416	1,029766075
50 - 55	6	6/26	0,066155304	0,409608047
55 - 58	5	5/26	0,038165545	0,622545848
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,421243251

CNR

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
21 - 23	5	5/26	0,026635652	1,030469423
23 - 26	7	7/26	0,04265156	1,203663783
26 - 29	5	5/26	0,045257899	0,47778713
29 - 32	5	5/26	0,047388197	0,443183354
32 - 35	4	4/26	0,048320795	0,230451521
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,385555211

MER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
16 - 20	6	6/28	0,054479467	0,468764436
20 - 22	5	5/28	0,030233469	0,727807656
22 - 23	5	5/28	0,015746335	1,683694085
23 - 26	6	6/28	0,049334819	0,552363643
26 - 29	6	6/28	0,051732957	0,510765292
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,942395112

NOISE MARGIN

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
4 - 9	6	6/28	0,027426936	1,273062475
9 - 11	6	6/28	0,01650029	2,370811305
11 - 12	5	5/28	$9,359695 \cdot 10^{-3}$	3,059139297
12 - 15	6	6/28	0,032233624	1,028210901
15 - 18	5	5/28	0,037899182	0,522140054
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	8,253364033

CBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$3 \cdot 10^{-5} - 10 \cdot 10^{-5}$	3	3/26	$6,34551 \cdot 10^{-7}$	20980,91884
$1 \cdot 10^{-4} - 10 \cdot 10^{-4}$	6	6/26	$6,9054729 \cdot 10^{-5}$	770,730288
$1 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$	7	7/26	$6,88149100 \cdot 10^{-3}$	10,00177778
0,01 - 0,02	6	6/26	0,020565153	2,148574062
0,02 - 0,03	4	4/26	0,033333207	0,435702762
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	21764,23518

VBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$1*10^{-7} - 1,7*10^{-7}$	13	13/26	$2,07182*10^{-7}$	1206667,533
$1,7*10^{-7} - 10*10^{-7}$	4	4/26	$1,069072*10^{-5}$	2213,634789
$1*10^{-6} - 10*10^{-6}$	3	3/26	$1,089362318*10^{-3}$	11,99179066
$1*10^{-5} - 10*10^{-5}$	6	6/26	0,103153115	0,157880574
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	1208893,317

• 682 MHz γεννήτρια ανοιχτή

POWER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
42 - 47	5	5/27	0,070436165	0,186940013
47 - 49	6	6/27	0,027863579	1,355722544
49 - 52	5	5/27	0,032126507	0,729209651
52 - 55	5	5/27	0,040038548	0,526181576
55 - 58	6	6/27	0,038667796	0,871325259
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,669379044

CNR

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
21 - 24	5	5/27	0,039570713	0,535840092
24 - 26	4	4/27	0,027736676	0,522734686
26 - 27	4	4/27	0,014322742	1,250405776
27 - 30	4	4/27	0,044451397	0,241905022
30 - 32	6	6/27	0,030640124	1,1978966
32 - 35	4	4/27	0,046972275	0,217927645
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,966774941

MER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
14 - 17	4	4/28	0,045224686	0,21077198
17 - 19	5	5/28	0,033440154	0,629874098
19 - 21	7	7/28	0,035617636	1,290366323
21 - 23	4	4/28	0,037390767	0,297448404
23 - 25	5	5/28	0,038201741	0,515778827
25 - 27	3	3/28	0,0402265932	0,11107462
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,055344889

NOISE MARGIN

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
3 - 7	6	6/28	0,022807512	1,602313718
7 - 9	8	8/28	0,048152965	1,172002204
9 - 12	7	7/28	$4,072751415 \cdot 10^{-3}$	14,84996393
12 - 15	7	7/28	0,042306883	1,012140486
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	18,63632034

CBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$2,8 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$	4	4/27	$7,1480813 \cdot 10^{-5}$	306,7494407
0,01 - 0,02	5	5/27	0,012912058	2,298474058
0,02 - 0,025	7	7/27	$7,37297934 \cdot 10^{-3}$	8,60529985
0,025 - 0,032	5	5/27	0,012939545	2,292859646
0,032 - 0,06	6	6/27	0,079522199	0,256070592
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	320,2021449

VBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$1*10^{-5} - 10*10^{-5}$	4	4/24	$8,83853*10^{-6}$	3142,471845
$1*10^{-4} - 3*10^{-4}$	4	4/24	$7,1354*10^{-5}$	388,9620512
$3*10^{-4} - 10*10^{-4}$	5	5/24	$8,1210466*10^{-4}$	53,02815362
$1*10^{-3} - 1,7*10^{-3}$	6	6/24	$1,68457188*10^{-3}$	36,60309932
$1,7*10^{-3} - 10*10^{-3}$	5	5/24	0,082838749	0,190115023
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3621,255264

• 688,5 MHz γεννήτρια κλειστή

POWER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
40 - 45	3	3/26	0,07359886	0,023723864
45 - 48	4	4/26	0,04352064	0,27967693
48 - 50	3	3/26	0,028494986	0,264952146
50 - 52	7	7/26	0,02795437	2,082475864
52 - 54	4	4/26	0,027317117	0,58606467
54 - 59	5	5/26	0,064962633	0,249632186
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,486525723

CNR

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
20 - 24	5	5/27	0,05328376	0,326515733
24 - 26	5	5/27	0,029105658	0,836978703
26 - 30	8	8/27	0,060555726	0,917726878
30 - 35	9	9/27	0,079996058	0,802286721
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	2,883508135

MER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
17 - 19	4	4/27	0,03193871	0,422829648
19 -21	4	4/27	0,034096473	0,381499418
21 - 23	6	6/27	0,035884631	0,967592446
23 - 25	5	5/27	0,037297133	0,586395634
25 - 26	4	4/27	0,01906079	0,874231657
26 - 28	4	4/27	0,038714005	0,30934013
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,541888933

NOISE MARGIN

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
5 - 8	5	5/28	0,019938771	1,262079797
8 - 10	4	4/28	0,018047326	0,863146727
10 - 12	7	7/28	0,021564	2,4199131
12 - 14	5	5/28	0,02493265	0,946745503
14 - 17	7	7/28	0,042870098	1,00076273
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	6,492647857

CBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$2,8*10^{-5} - 10*10^{-5}$	6	6/28	$5,011191*10^{-5}$	915,8879229
$1*10^{-4} - 10*10^{-4}$	9	9/28	$5,368604164*10^{-3}$	18,6070531
$1*10^{-3} - 10*10^{-3}$	5	5/28	0,0450803228	0,164395789
0,01 – 0,02	4	4/28	0,016093124	0,099850821
0,02 – 0,04	4	4/28	0,061814187	0,1062532289
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	934,8654759

VBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$1*10^{-7} - 1*10^{-6}$	20	20/28	$3,58976756*10^{-3}$	140,7023492
$1*10^{-6} - 1*10^{-5}$	2	2/28	0,296007734	0,170386715
$1*10^{-5} - 5*10^{-5}$	6	6/28	0,700501882	0,337299843
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	141,2100357

• 688,5 MHz γεννήτρια ανοιχτή

POWER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
43 - 48	6	6/27	0,076827403	0,275157725
48 - 50	8	8/27	0,029544804	2,408422091
50 - 54	6	6/27	0,056445057	0,486881756
54 - 60	7	7/27	0,076837953	0,433087167
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,603548739

CNR

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
19 - 23	4	4/27	0,079542755	0,059163381
23 - 24	4	4/27	0,020798219	0,779778521
24 - 25	4	4/27	0,021042479	0,767773185
25 - 27	5	5/27	0,042582284	0,477559809
27 - 28	5	5/27	0,021425166	1,111592098
28 - 33	5	5/27	0,106325938	0,0584879
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,254354894

MER

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
11 - 15	5	5/28	0,05818653	0,249070082
15 - 16	7	7/28	0,043627115	0,976222417
16 - 18	7	7/28	0,035366793	1,302561234
18 - 21	5	5/28	0,057452231	0,255346128
21 - 23	4	4/28	0,040534668	0,258294674
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	3,041489278

NOISE MARGIN

περιοχές τιμών (dB)	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
1 - 4	6	6/27	0,010449183	4,291992986
4 - 5	5	5/27	$6,21699084 \cdot 10^{-3}$	5,151948171
5 - 7	7	7/27	0,016388816	3,599932847
7 - 9	5	5/27	0,021426642	1,251566179
9 - 12	4	4/27	0,04080501	0,282380749
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	14,57721656

CBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$3 \cdot 10^{-4} - 10 \cdot 10^{-4}$	3	3/27	$3,19504 \cdot 10^{-6}$	3863,791694
$1 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$	9	9/27	$3,4762781 \cdot 10^{-4}$	318,9603274
0,01 – 0,02	5	5/27	$1,052692737 \cdot 10^{-3}$	32,2066477
0,02 – 0,04	5	5/27	$4,199684536 \cdot 10^{-3}$	7,799574269
0,04 – 0,16	5	5/27	0,080381593	0,136645624
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	4222,895906

VBER

περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων	Π_i	Θ_i	$(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i$
$1*10^{-7} - 1*10^{-6}$	5	5/26	$4,131*10^{-9}$	8952371,564
$1*10^{-6} - 1*10^{-5}$	4	4/26	$4,08165*10^{-7}$	57987,61154
$1*10^{-5} - 1*10^{-4}$	8	8/26	$4,0901697*10^{-5}$	2314,069942
$1*10^{-4} - 1*10^{-3}$	5	5/26	$4,081815653*10^{-3}$	8,679711103
$1*10^{-3} - 4,48*10^{-3}$	4	4/26	0,0754555746	0,081439206
			$\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$	9012682,007

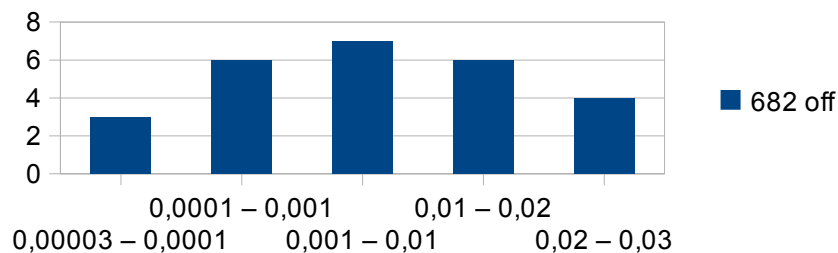
Σε αυτό το σημείο κι έχοντας παραθέσει τα αντίστοιχα διαγράμματα, παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα μεγέθη POWER, CNR, MER και NOISE MARGIN ακολουθούν κατανομή Rayleigh αφού το άθροισμα $\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$ προκύπτει μικρότερο από 40,113.

Σε αντίθεση τα μεγέθη CBER και VBER καμία περίπτωση δεν ακολουθούν την κατανομή Rayleigh, αφού τα αντίστοιχα αθροίσματα $\Sigma \{(\Pi_i - \Theta_i)^2/\Theta_i\}$ προκύπτουν πολύ μεγαλύτερα από 40,113.

Επίσης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στα 682 MHz, με κλειστή τη γεννήτρια παρεμβολλών, η τιμή του CBER ακολουθεί την κανονική κατανομή όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει το πλήθος των μετρήσεων που βρίσκονται μέσα στα διαστήματα που έχουν οριστεί, ενώ δίνεται και ο αντίστοιχος πίνακας.

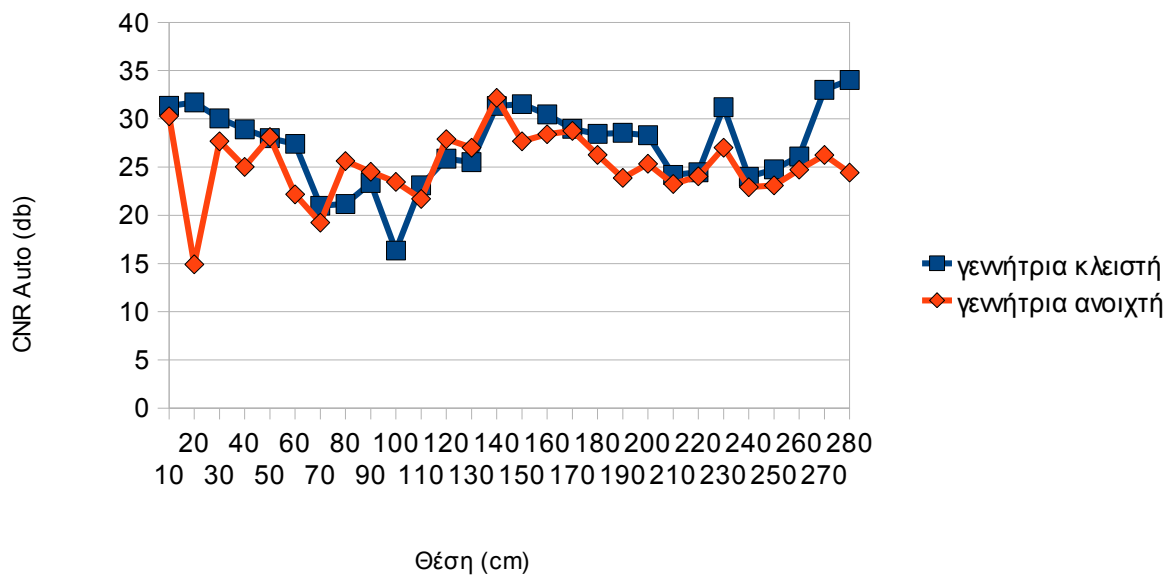
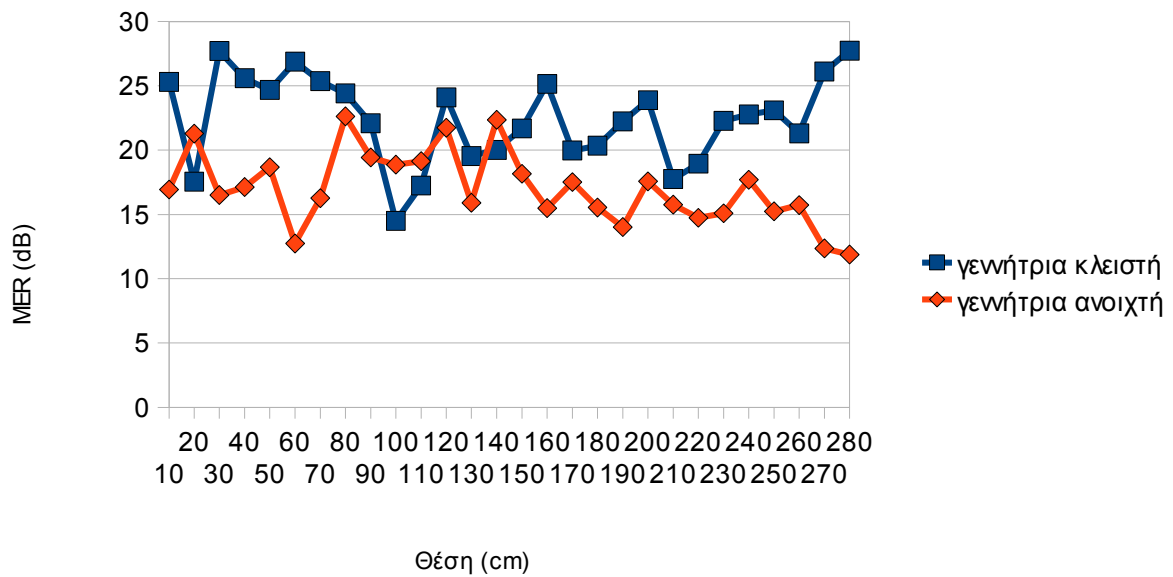
περιοχές τιμών	Πλήθος μετρήσεων
$3*10^{-5} - 10*10^{-5}$	3
$1*10^{-4} - 10*10^{-4}$	6
$1*10^{-3} - 10*10^{-3}$	7
0,01 - 0,02	6
0,02 - 0,03	4

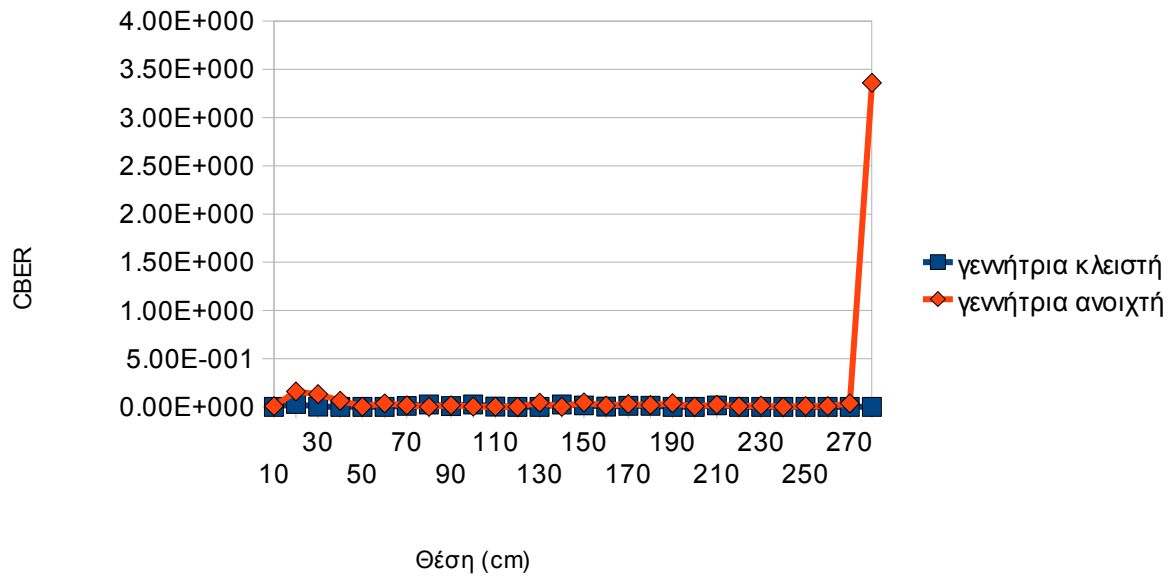
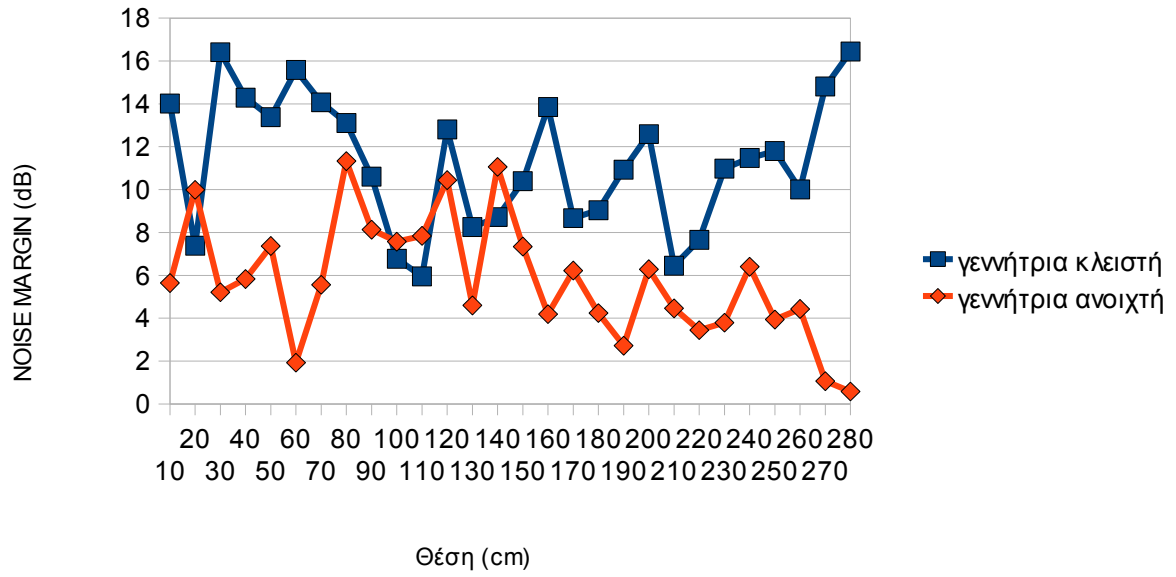
Κανονική κατανομή CBER

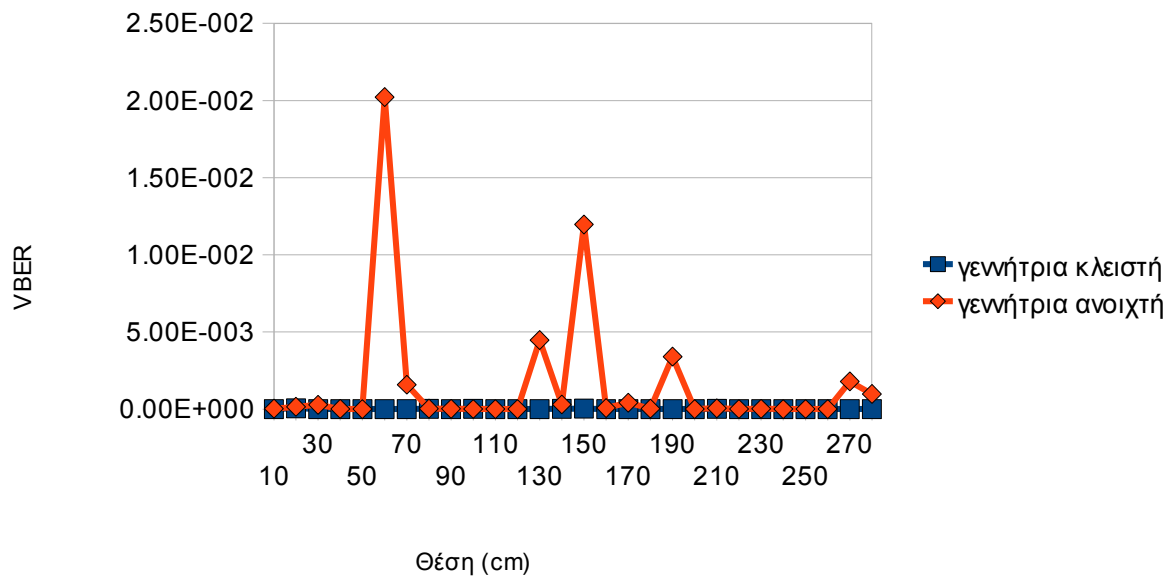


Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα των έξι μεγεθών που μετρήθηκαν, για τις δύο συχνότητες παρεμβολής, συναρτήσει της θέσης του κινητού ψηφιακού δέκτη.

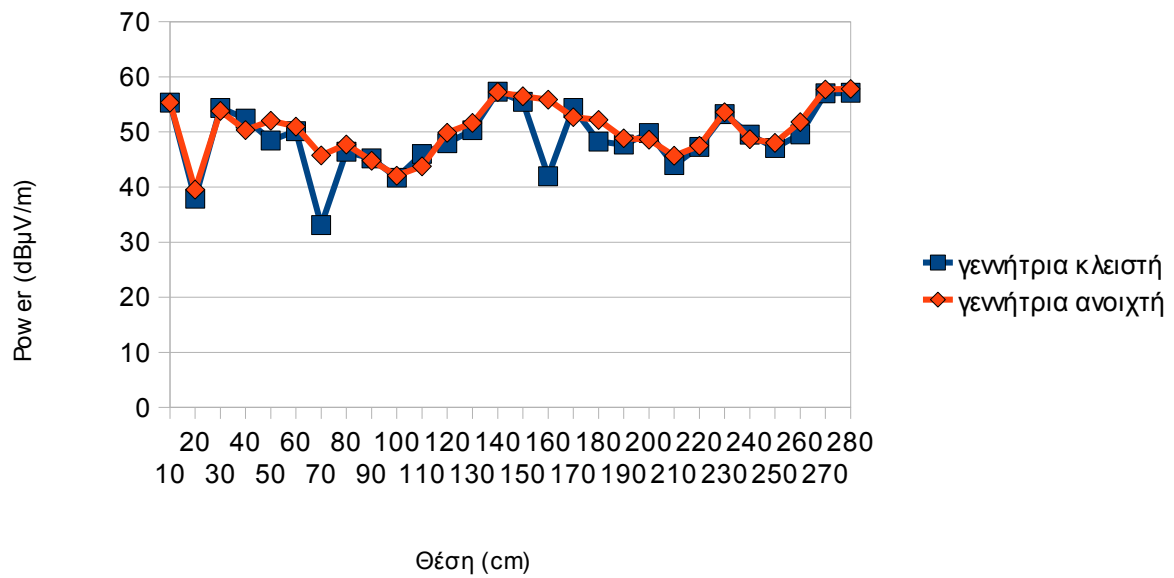
•682 MHz

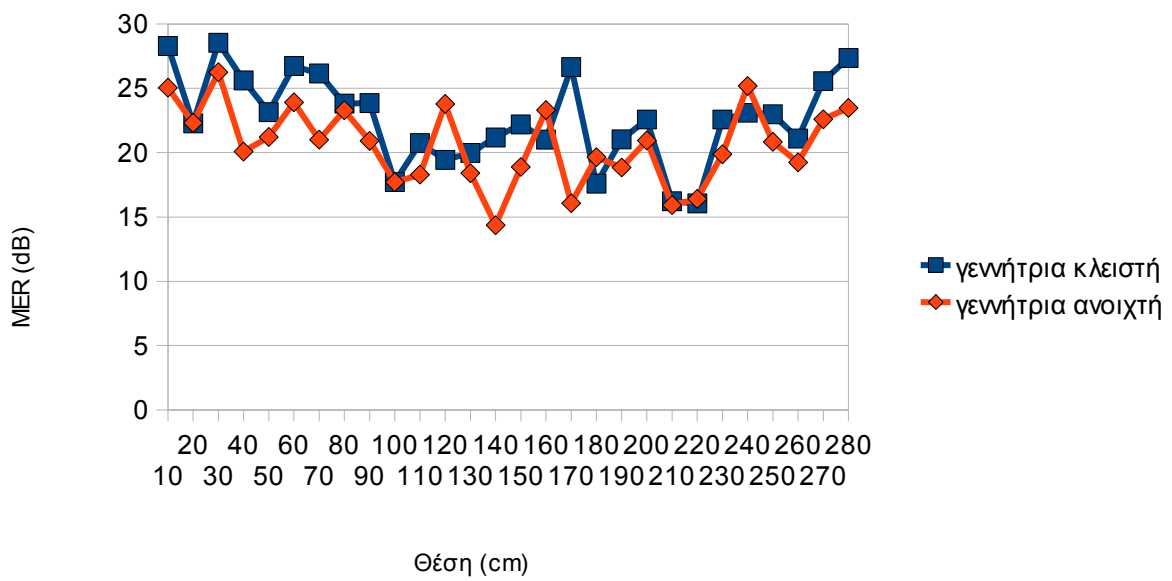
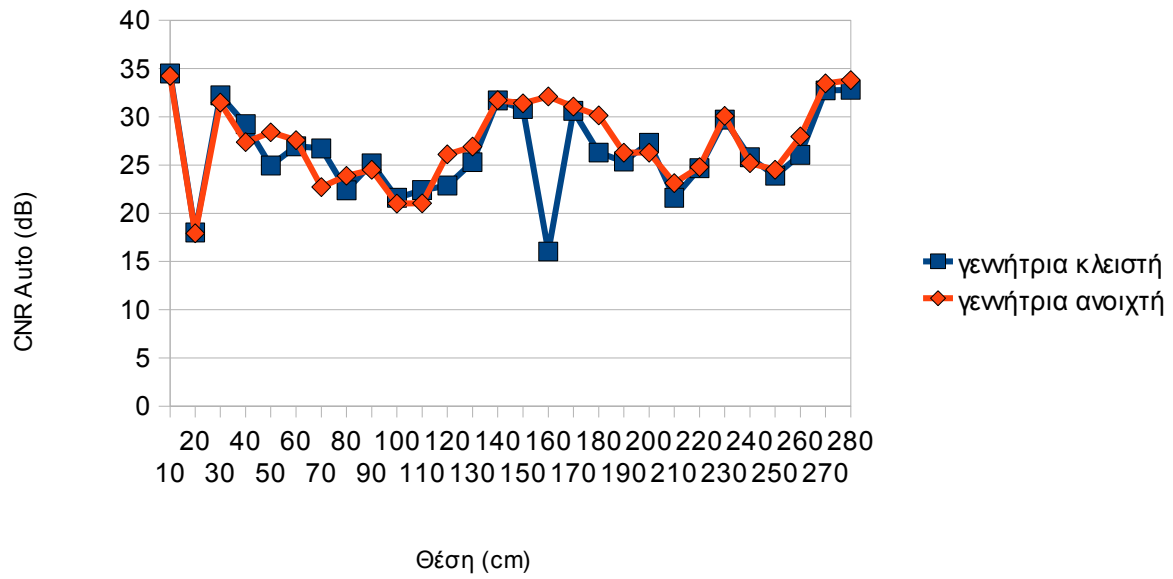


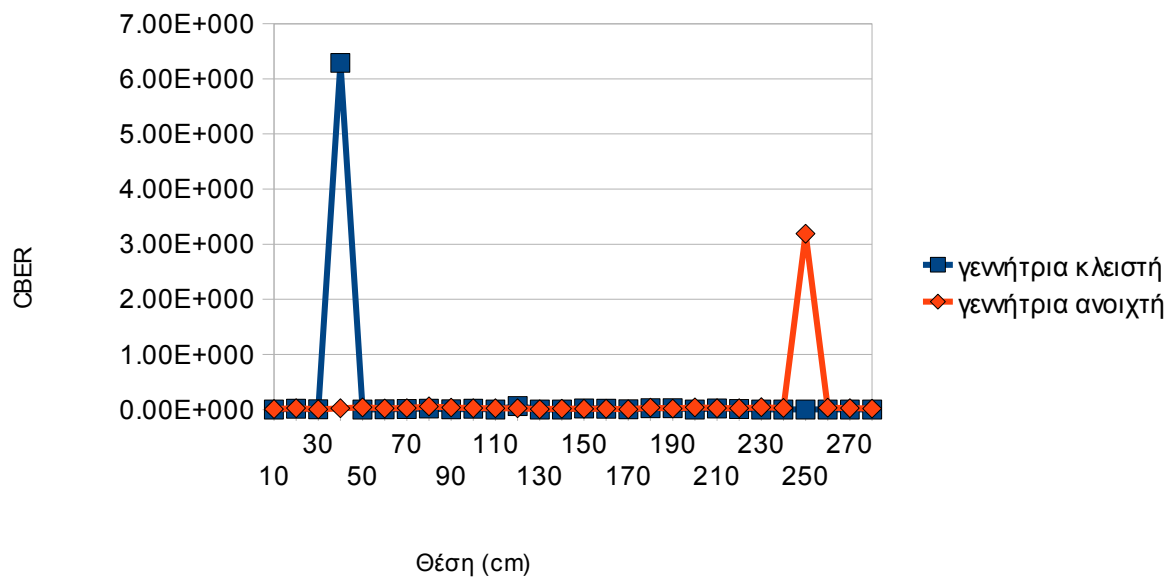
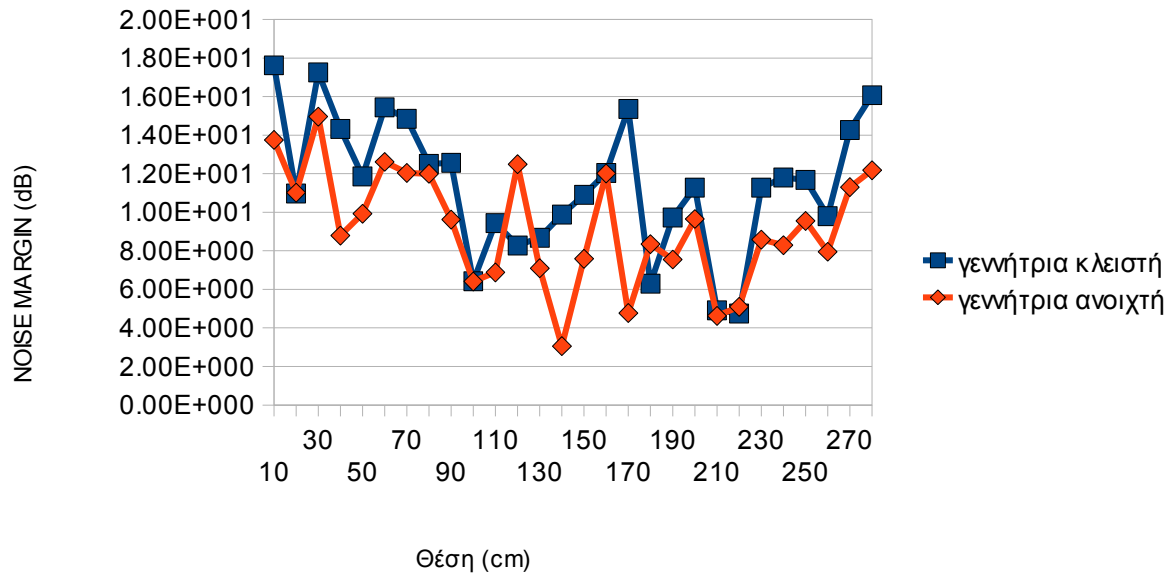


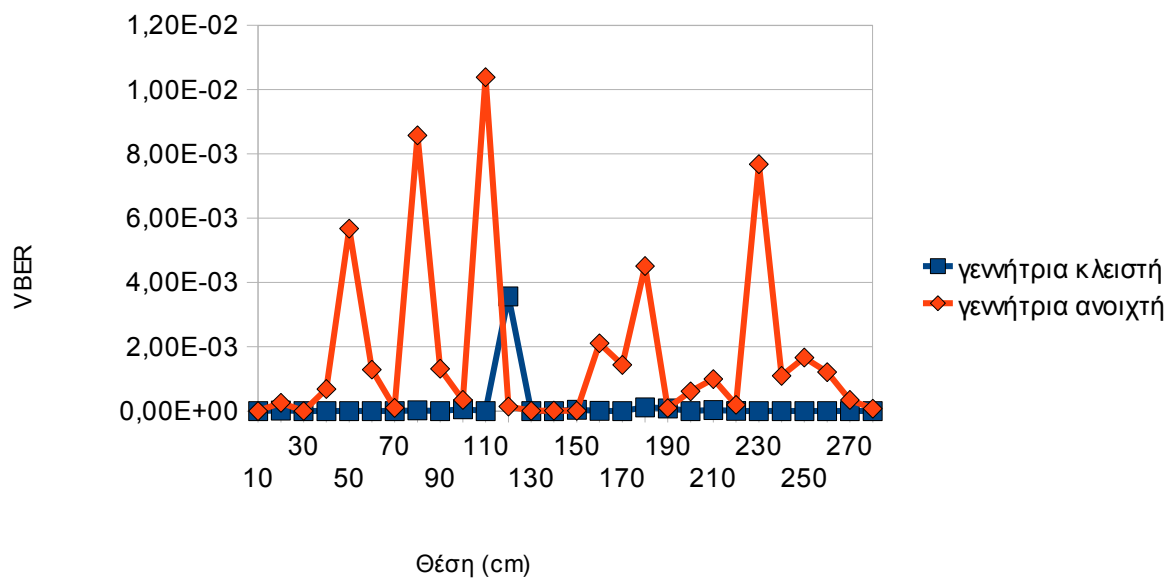


• 688,5 MHz









ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Δορυφορικές Επικοινωνίες* , Π.Κωττής, Χ.Καψάλης , Εκδόσεις Τζιόλα (2006)
2. *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών* , Μ.Θεολόγου, Εκδόσεις Τζιόλα (2007)
3. *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών* , Α.Κανατάς, Φ.Κωνσταντίνου, Γ.Πάντος, Εκδόσεις Παπασωτηρίου (2008)
4. *Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)* , Χ.Καψάλης, Π.Τρακάδας, Εκδόσεις Τζιόλα (2006)
5. *Χάρτης Συχνότητων Πλάνου Ψηφιακής Τηλεόρασης* , Χ.Καψάλης (2008)
6. *Digital Dividend and other questions on Spectrum Policy and Broadcasting(2007)*, EBU
7. *Review of Digital Dividend Options in Greece (2009)*, AEGIS Spectrum Engineering
8. *Βελτιστοποίηση της Ποιότητας των Παρεχομένων Υπηρεσιών σε Διαλειπτικά Κανάλια (fading channels) για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς* , Κολέττι Θεοχάρη Αλέξανδρου, Διπλωματική εργασία, Πάτρα Σεπτεμβρίου 2010
9. *Digital Video Broadcasting; Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television* , European Telecommunications Standards Institute, 2004
10. *Single frequency networks in DTV* , A.Mattsson, IEEE Transactions on Broadcasting December 2005
11. *Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for cable systems* , European Norm ETSI EN 300 429
12. *Television Fundamentals* , John Watkinson, Focal Press (1996)
13. *Optimal power allocation for multiuser OFDM* , Z.Shen, J.G.Andrews, B.Evans, San Francisco, December 2003
14. *Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation* , Rhee.W. and Cioffi, Tokyo, May 2000

15. *Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολών στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες WCDMA, TD-SCDMA, GSM-EDGE* , Ραδάμανθης Δερεδάκης, Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 2010
16. *The Wireless Last Mile* , S.M.Cherry, IEEE Spectrum (2003)
17. *Exploiting the Digital Dividend – a European approach (2009)* , Analysis Mason
18. *Digital Television Systems (2009)*, M.Alencar, Cambridge University Press
19. *Δίκτυα Υπολογιστών* , A.S.Tanenbaum, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 4η Έκδοση, 2003

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- <http://www.3gpp.org/>
- <http://www.dvb.org/>
- <http://www.3gpp2.org/>
- <http://www.eett.gr>
- <http://www.ebu.ch/>
- <http://www.itu.int/imt>

