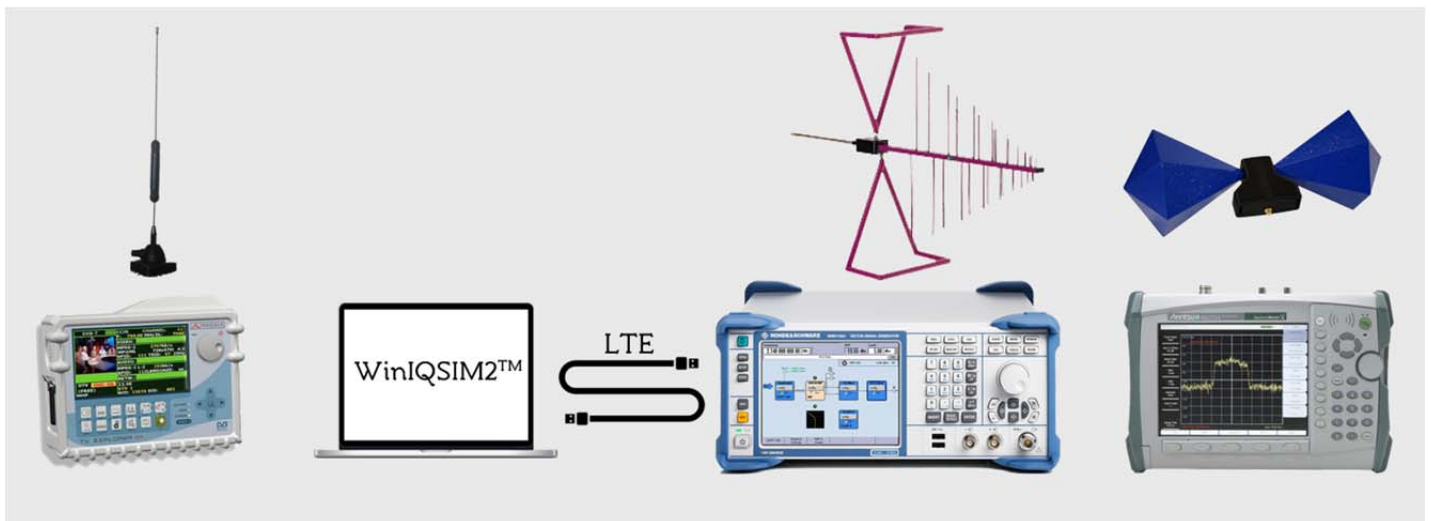




Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας
Υλικών

Παρεμβολή κινητών υπηρεσιών τέταρτης γενιάς (LTE) στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση

Διπλωματική Εργασία
του
Χρήστου Αθανασίου Παππά



Επιβλέπων: Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας
Υλικών

**Παρεμβολή κινητών υπηρεσιών τέταρτης γενιάς (LTE) στην επίγεια
ψηφιακή τηλεόραση**

Διπλωματική Εργασία
του
Χρήστου Αθανασίου Παππά

Επιβλέπων: Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την ...^η Ιουνίου 2015

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

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2015

.....
Χρήστος Αθανασίου Παππάς

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

Copyright © Χρήστος Παππάς, 2015

Με επιφύλαξη παντός νόμιμου 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 στον συγγραφέα στην ηλεκτρονική διεύθυνση el07694@gmail.com.

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

Στην οικογένεια μου

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την παρεμβολή που προκαλούν υπηρεσίες κινητής επικοινωνίας στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση.

Αρχικά παρουσιάζεται μία ανάλυση σε θεωρητικό επίπεδο τόσο της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης και συγκεκριμένα του προτύπου DVB-T όσο και των πρωτοκόλλων κινητής επικοινωνίας (LTE).

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται το πειραματικό κομμάτι της εργασίας. Αποτυπώνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνιών Μεγάλων Αποστάσεων του Ε.Μ.Π. σχετικά με τις παρεμβολές που δημιουργήθηκαν στην ψηφιακή τηλεόραση από τα πρωτόκολλα κινητής επικοινωνίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με μορφή διαγραμμάτων για διάφορα μετρούμενα μεγέθη που δείχνουν την ποιότητα του σήματος τηλεοπτικής λήψης και την ανοχή του στις παρεμβολές.

Λέξεις κλειδιά

Ψηφιακή τηλεόραση, DVB-T, LTE, OFDMA, Συχνότητες UHF

Abstract

This diploma thesis deals with the interjection that causes services of mobile communication in the terrestrial digital television.

Initially is presented an analysis in theoretical level of both terrestrial digital television (concretely model DVB-T) and the protocols of mobile communication that were reported before.

Furthermore is presented the experimental part of this thesis. In this part were realized measurements in the laboratory of Radio and Communication of Big Distances on the interjections that create in the digital television the protocols of mobile communication that were reported before. The results are presented with diagrams for various measurements that show the quality of signal of television reception followed from various observations and conclusions.

Key Words

Terrestrial digital television, DVB-T, LTE, OFDMA, UHF Frequencies

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο εργαστήριο Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Χρήστο Καψάλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτής της εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, όσο και τους έτερους εξεταστές, τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Κωττή και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Φικιώρη.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων Νικόλαο Καψάλη, Σωτήρη Σπαντιδέα, Σαράντη Καρκαράκη, Αργύρη Μπακλέζο, Χρήστο Νικολόπουλο, Αδριανό Κατσούρη, Χριστίνα Τσιτούρη για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αναφέρω ότι η εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου για την ηθική στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών και όχι μόνο.

Χρήστος Αθανασίου Παππάς
Μάιος 2015

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Κεφάλαιο 1 Ψηφιακή τηλεόραση | 19 |
| 1.1 Εισαγωγή | 19 |
| 1.2 Ψηφιακά είδη διαμόρφωσης | 19 |
| 1.2.1 Εισαγωγή στην διαμόρφωση φάσης | 19 |
| 1.2.2 Διαμόρφωση BPSK | 19 |
| 1.2.3 Διαμόρφωση QPSK | 20 |
| 1.2.4 Διαμόρφωση QAM | 21 |
| 1.2.5 Εισαγωγή στο σύστημα διαμόρφωσης OFDM | 22 |
| 1.2.6 Εισαγωγή στο σύστημα COFDM | 23 |
| 1.2.7 Η εφαρμογή της COFDM στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση | 24 |
| 1.3 Ψηφιοποίηση και συμπίεση σημάτων | 25 |
| 1.3.1 Εισαγωγή | 25 |
| 1.3.2 Βασικά στοιχεία ψηφιοποίησης | 25 |
| 1.3.3 Συμπίεση τηλεοπτικού σήματος | 26 |
| 1.3.4 Το πρότυπο MPEG-2 | 27 |
| 1.3.5 Το πρότυπο MPEG-4 | 30 |
| 1.4 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης | 31 |
| 1.4.1 Εισαγωγή | 31 |
| 1.4.2 FDMA | 32 |
| 1.4.3 TDMA | 32 |
| 1.4.4 CDMA | 33 |
| 1.4.5 SDMA | 34 |
| 1.5 Το πρότυπο DVB-T | 34 |
| 1.5.1 Μοντέλο ευρύ-εκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης | 34 |
| 1.5.2 Γενικά χαρακτηριστικά του Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) | 35 |
| 1.5.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα του DVB-T | 36 |
| 1.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά (ETSI προδιαγραφές) | 37 |
| 1.6.1 Σύστημα μετάδοσης | 37 |
| 1.6.2 Αναδιάταξη των bit του ψηφιακού ρεύματος και τυχαιοποίηση για διασπορά ενέργειας | 39 |
| 1.6.3 Εξωτερική κωδικοποίηση (Αλγόριθμους Reed-Solomon) | 39 |
| 1.6.4 Συνελικτική και εσωτερική κωδικοποίηση | 40 |
| 1.7 Εκπομπή και λήψη ψηφιακού σήματος | 42 |
| 1.7.1 Εισαγωγή | 42 |
| 1.7.2 Single Frequency Networks (SFNs) | 42 |
| 1.7.3 Η αρχή λειτουργίας της μετάδοσης COFDM | 43 |

| | |
|--|----|
| 1.7.4 Μειονεκτήματα του OFDM..... | 45 |
| 1.7.5 Η ανάγκη κωδικοποίησης καναλιού..... | 47 |
| 1.7.6 Εύρος ζώνης..... | 47 |
| 1.7.7 Απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για ψηφιακό video | 47 |
| 1.7.8 Ορατά λάθη | 48 |
| 1.7.9 Καθυστέρηση..... | 48 |
| 1.7.10 Επίδραση, εκτίμηση και διόρθωση λαθών κατά τη μετάδοση | 49 |
| 1.7.11 Επίδραση λαθών σε κανονικοποιημένο σήμα video | 49 |
| 1.7.12 Η ψηφιακή επίγεια λήψη σήματος | 49 |
| 1.8 Το πρότυπο DVB-T2 | 51 |
| 1.9 Χάρτης συχνοτήτων UHF band | 51 |
| Κεφάλαιο 2 LTE..... | 57 |
| 2.1 Εισαγωγή | 57 |
| 2.1.1 Στόχοι της τεχνολογίας LTE..... | 58 |
| 2.1.2 Υπηρεσίες τεχνολογίας LTE | 59 |
| 2.1.3 Σύγκριση της νέας τεχνολογίας (4G) με την προηγούμενη (3G)..... | 59 |
| 2.2 Αρχιτεκτονική συστήματος..... | 60 |
| 2.2.1 Δίκτυο Κορμού..... | 60 |
| 2.2.2 Δίκτυο Πρόσβασης | 62 |
| 2.2.3 Εξοπλισμός χρήστη | 63 |
| 2.3 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων..... | 63 |
| 2.3.1 User Plane | 64 |
| 2.3.2 Control Plane | 65 |
| 2.4 Κανάλια..... | 66 |
| 2.4.1 Λογικά Κανάλια | 66 |
| 2.4.2 Κανάλια Μεταφοράς | 66 |
| 2.4.3 Φυσικά Κανάλια | 67 |
| 2.5 Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας σε Συστήματα LTE | 67 |
| 2.5.1 Multicarrier τεχνολογία | 67 |
| 2.5.2 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (MIMO systems)..... | 69 |
| 2.6 Απόδοση δικτύου LTE..... | 69 |
| 2.7 Λειτουργία, συντήρηση και ασφάλεια..... | 70 |
| 2.8 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας..... | 70 |
| 2.8.1 Hard Frequency Reuse..... | 71 |
| 2.8.2 Soft Frequency Reuse | 72 |
| 2.8.3 Fractional Frequency Reuse..... | 72 |
| Κεφάλαιο 3 Παρεμβολή ψηφιακής τηλεόρασης από σήμα κινητής τηλεφωνίας (LTE) | 74 |

| | |
|--|-----|
| 3.1 Εισαγωγή | 74 |
| 3.2 Όργανα μέτρησης | 74 |
| 3.3 Μεγέθη που μετρήθηκαν - Διαδικασία λήψεως μετρήσεων - Κατώφλια μεγεθών | 81 |
| 3.4 Πειραματική Διάταξη | 81 |
| 3.5 Θεωρητικό υπόβαθρο για την αντιπαραβολή των μετρήσεων | 85 |
| 3.6 Παρουσίαση μετρήσεων | 86 |
| 3.7 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα | 109 |
| Βιβλιογραφία..... | 112 |

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 1 Ψηφιακή τηλεόραση

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1.1 Ωφέλιμο bitrate συναρτήσει του σχήματος διαμόρφωσης 16 QAM | 22 |
| Πίνακας 1.2 Χρησιμοποιούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών παγκοσμίως | 31 |
| Πίνακας 1.3 Συνελκτικοί κώδικες και μεταδιδόμενη πληροφορία..... | 40 |
| Πίνακας 1.4 Εξέλιξη συστήματος DVB-T..... | 51 |
| Πίνακας 1.5 Κέντρα εκπομπής στην Ελλάδα (μπλε-Δημόσιοι τηλεοπτικοί σταθμοί εθνικής εμβέλειας, πράσινο-Ιδιωτικοί τηλεοπτικοί σταθμοί εθνικής εμβέλειας, κόκκινο-Ιδιωτικοί τηλεοπτικοί σταθμοί περιφερειακής εμβέλειας) | 55 |
| Πίνακας 1.6 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των 34 SFN δικτύων της ελληνικής επικράτειας..... | 55 |

Κεφάλαιο 2 LTE

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.1 Σύγκριση παραμέτρων και χαρακτηριστικών 3G και 4G | 60 |
| Πίνακας 2.2 Control Channels | 66 |
| Πίνακας 2.3 Traffic Channels | 66 |
| Πίνακας 2.4 Downlink Transport Channels | 67 |
| Πίνακας 2.5 Uplink Transport Channels | 67 |
| Πίνακας 2.6 Downlink Physical Channels | 67 |
| Πίνακας 2.7 Uplink Physical Channels | 67 |
| Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικά απόδοσης LTE | 70 |

Κεφάλαιο 3 Παρεμβολή ψηφιακής τηλεόρασης από σήμα κινητής τηλεφωνίας (LTE)

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά δέκτη Promax TV Explorer II | 75 |
| Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά κεραίας λήψης BicoLOG 20300 | 78 |
| Πίνακας 3.3 Προδιαγραφές σήματος παρεμβολής LTE | 79 |
| Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά κεραίας λήψης Schaffner CBL6141A | 80 |
| Πίνακας 3.5 Ενδεικνυόμενες τιμές κατωφλίων..... | 81 |
| Πίνακας 3.6 Μετρήσεις δίχως παρεμβολή..... | 86 |
| Πίνακας 3.7 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 86 |
| Πίνακας 3.8 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 87 |
| Πίνακας 3.9 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή).. | 91 |
| Πίνακας 3.10 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 91 |
| Πίνακας 3.11 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής LTE σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 97 |
| Πίνακας 3.12 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής σήματος LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 98 |
| Πίνακας 3.13 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής LTE σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 102 |
| Πίνακας 3.14 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής LTE σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 102 |

Παράρτημα Α Συμπληρωματικοί πίνακες

| | |
|--|-----|
| Πίνακας Α.1 Αντίστοιχηση διαύλων – συχνοτήτων..... | 110 |
| Πίνακας Α.2 Οι αναμεταδότες στην Αττική | 111 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας Α.3 Ψηφιακά κανάλια στην Αττική..... | 111 |
|--|-----|

Ευρετήριο Σχημάτων

Κεφάλαιο 1 Ψηφιακή τηλεόραση

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1.1 Διαμόρφωση BPSK..... | 20 |
| Σχήμα 1.2 Πολικό διάγραμμα BPSK..... | 20 |
| Σχήμα 1.3 Διάγραμμα βαθμίδων διαμορφωτή QPSK | 20 |
| Σχήμα 1.4 Πολικό διάγραμμα διαμορφωτή QPSK..... | 20 |
| Σχήμα 1.5 Πολικό Διάγραμμα διαμόρφωσης 16 QAM..... | 22 |
| Σχήμα 1.6 Ψηφιοποίηση τηλεοπτικού σήματος..... | 26 |
| Σχήμα 1.7 Κυριότερα βήματα συμπίεσης δεδομένων | 27 |
| Σχήμα 1.8 Το πρότυπο MPEG-2 | 29 |
| Σχήμα 1.9 FDMA | 32 |
| Σχήμα 1.10 TDMA | 32 |
| Σχήμα 1.11 Δομή πλαισίου TDMA..... | 33 |
| Σχήμα 1.12 CDMA..... | 33 |
| Σχήμα 1.13 SDMA | 34 |
| Σχήμα 1.14 Επίγειο ψηφιακό μοντέλο ασύρματης ευρύ-εκπομπής..... | 35 |
| Σχήμα 1.15 Trade-off μεταξύ ανθεκτικότητας και ταχύτητα | 36 |
| Σχήμα 1.16 Μπλοκ διάγραμμα ενός διαμορφωτή DVB-T | 38 |
| Σχήμα 1.17 Διάγραμμα γεννήτριας ψευδοτυχαίας ακολουθίας | 39 |
| Σχήμα 1.18 Διάγραμμα διαδικασίας αναδιάταξης bytes | 40 |
| Σχήμα 1.19 Συνελκτικοί κωδικοποίηση για ρυθμό κώδικα $\frac{1}{2}$ | 41 |
| Σχήμα 1.20 Διαδικασία της συνελκτικής κωδικοποίησης | 41 |
| Σχήμα 1.21 Τοπολογία SFN δικτύων..... | 43 |
| Σχήμα 1.22 Μετάδοση COFDM..... | 44 |
| Σχήμα 1.23 Σύστημα 2k | 44 |
| Σχήμα 1.24 | 44 |
| Σχήμα 1.25 Σφάλματα συχνοτήτων προκαλούν παρεμβολές (α) | 46 |
| Σχήμα 1.26 Σφάλματα συχνοτήτων προκαλούν παρεμβολές (β) | 46 |

Κεφάλαιο 2 LTE

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2.1 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των κινητών προτύπων | 58 |
| Σχήμα 2.2 Στοιχεία του EPS δικτύου..... | 60 |
| Σχήμα 2.3 Συνδέσεις του eNodeB με άλλους λογικούς κόμβους και κύριες λειτουργίες | 63 |
| Σχήμα 2.4 Δομή πρωτοκόλλων | 64 |
| Σχήμα 2.5 User Plane στοίβα πρωτοκόλλων | 65 |
| Σχήμα 2.6 Control Plane στοίβα πρωτοκόλλων..... | 65 |
| Σχήμα 2.7 α) Απλός διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού β) OFDM διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού | 68 |
| Σχήμα 2.8 Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης LTE..... | 68 |
| Σχήμα 2.9 Δέσμευση πόρων στο πεδίο του χώρο-χρόνου | 68 |
| Σχήμα 2.10 Πλεονεκτήματα Πολλαπλών Κεραιών | 69 |
| Σχήμα 2.11 Διαχωρισμός εύρους ζώνης..... | 71 |
| Σχήμα 2.12 Ανάθεση συχνοτήτων στα κελιά..... | 71 |
| Σχήμα 2.13 Διαχωρισμός εύρους ζώνης και ανάθεση συχνοτήτων στην SFR | 72 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 2.14 Διαχωρισμός - Ανάθεση συχνοτήτων για FFR | 73 |
| Σχήμα 2.15 Διαφορετική υλοποίηση FFR | 73 |
| | |
| Κεφάλαιο 3 Παρεμβολή ψηφιακής τηλεόρασης από σήμα κινητής τηλεφωνίας (LTE) | |
| | |
| Σχήμα 3.1 Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας BicoLOG 20300 | 77 |
| Σχήμα 3.2 Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας BicoLOG 20300 | 77 |
| Σχήμα 3.3 Κέρδος κεραίας λήψης BicoLOG 20300 | 78 |
| Σχήμα 3.4 Παράγοντας κεραίας (antenna factor) κεραίας λήψης BicoLOG 20300 | 78 |
| Σχήμα 3.5 Σκαρίφημα κεραίας εκπομπής Schaffner CBL6141A | 80 |
| Σχήμα 3.6 Παράγοντας κεραίας (antenna factor) κεραίας λήψης Schaffner CBL6141A | 80 |
| Σχήμα 3.7 Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας Schaffner CBL6141A | 80 |
| Σχήμα 3.8 Πειραματική διάταξη (β) | 82 |
| Σχήμα 3.9 SNIR υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)... | 87 |
| Σχήμα 3.10 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 88 |
| Σχήμα 3.11 MER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 88 |
| Σχήμα 3.12 CBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 89 |
| Σχήμα 3.13 VBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 89 |
| Σχήμα 3.14 Channel Power υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 90 |
| Σχήμα 3.15 Channel Power density υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 90 |
| Σχήμα 3.16 SNIR υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 92 |
| Σχήμα 3.17 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 92 |
| Σχήμα 3.18 MER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 93 |
| Σχήμα 3.19 CBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 93 |
| Σχήμα 3.20 VBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 94 |
| Σχήμα 3.21 Channel Power υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 94 |
| Σχήμα 3.22 Channel Power Density υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 95 |
| Σχήμα 3.23 MER συναρτήσσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 95 |
| Σχήμα 3.24 CBER συναρτήσσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 96 |
| Σχήμα 3.25 VBER συναρτήσσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 96 |
| Σχήμα 3.26 Παρεμβολή συναρτήσσει της ισχύος εκπομπής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 97 |
| Σχήμα 3.27 SNIR υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 98 |
| Σχήμα 3.28 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 99 |
| Σχήμα 3.29 MER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 99 |
| Σχήμα 3.30 CBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 100 |
| Σχήμα 3.31 VBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 100 |
| Σχήμα 3.32 Channel Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 3.33 Channel Power density υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή) | 101 |
| Σχήμα 3.34 SNIR υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 103 |
| Σχήμα 3.35 Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 103 |
| Σχήμα 3.36 MER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 104 |
| Σχήμα 3.37 CBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 104 |
| Σχήμα 3.38 VBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 105 |
| Σχήμα 3.39 Channel Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 105 |
| Σχήμα 3.40 Channel Power Density υπό την παρουσία παρεμβάλλοντας σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 106 |
| Σχήμα 3.41 MER συναρτήσει της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 106 |
| Σχήμα 3.42 CBER συναρτήσει της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 107 |
| Σχήμα 3.43 VBER συναρτήσει της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)..... | 107 |
| Σχήμα 3.44 Παρεμβολή συναρτήσει της ισχύος εκπομπής για σήμα παρεμβολής LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή) | 108 |

Ευρετήριο εικόνων

Κεφάλαιο 1 Ψηφιακή τηλεόραση

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1 Κεραία λήψης τηλεοπτικού σήματος | 50 |
| Εικόνα 1.2 Ψηφιακός αποκωδικοποιητής | 50 |
| Εικόνα 1.3 Περιοχές απονομής στην Ελλάδα | 52 |
| Εικόνα 1.4 Περιοχή απονομής 20 Αττική [SFN-1]..... | 56 |
| Εικόνα 1.5 Περιοχή απονομής 21 Αττική [SFN-2]..... | 56 |

Κεφάλαιο 2 LTE

-

Κεφάλαιο 3 Παρεμβολή ψηφιακής τηλεόρασης από σήμα κινητής τηλεφωνίας (LTE)

| | |
|---|----|
| Εικόνα 3.1 Φορητός Αναλυτής Σήματος DVB-T Promax TV explorer II | 75 |
| Εικόνα 3.2 Κεραία Profitec DVB-1700N DVB-T..... | 76 |
| Εικόνα 3.3 Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A | 77 |
| Εικόνα 3.4 Κεραία λήψης BicoLOG 20300 | 77 |
| Εικόνα 3.5 Γεννήτρια ηλεκτρικού σήματος Rohde&Schwarz SMBV100A | 78 |
| Εικόνα 3.6 Σκαρίφημα κεραίας εκπομπής Schaffner CBL6141A | 80 |
| Εικόνα 3.7 Πειραματική διάταξη (α) | 82 |
| Εικόνα 3.8 Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A | 82 |
| Εικόνα 3.9 Laptop που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος | 83 |
| Εικόνα 3.10 Τηλεοπτικός δέκτης Promax TV explorer II..... | 83 |
| Εικόνα 3.11 Κεραία λήψης Profitec DVB-1700N DVB-T | 84 |
| Εικόνα 3.12 Κεραία λήψης BicoLOG 20300..... | 84 |

Εισαγωγή

Ένα εκ των σημαντικότερων αγαθών 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 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 έχει 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. Με τη μετάβαση στην ψηφιακή εποχή πετύχαμε καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε τα περιθώρια περαιτέρω αξιοποίησης της UHF ζώνης συχνοτήτων και για το σκοπό αυτό θα πειραματιστούμε παρεμβάλλοντας το σήμα το τηλεοπτικό σήμα με σήμα 4G/LTE.

Η διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας σε κεφάλαια είναι:

Κεφάλαιο 1: Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Συγκεκριμένα, αναφέρουμε τα ψηφιακά είδη διαμόρφωσης, τις μεθόδους ψηφιοποίησης και συμπίεσης σημάτων, τις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, το πρότυπο DVB-T, τις απαραίτητες ενέργειες που απαιτούνται για την εκπομπή και τη λήψη τηλεοπτικού σήματος, τα τεχνικά χαρακτηριστικά (ETSI προδιαγραφές) της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, καθώς και βασικές προδιαγραφές του πρότυπου DVB-T2.

Κεφάλαιο 2: Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία 4^{ης} γενιάς (4G/LTE). Συγκεκριμένα αναφέρουμε την αρχιτεκτονική του συστήματος, την αρχιτεκτονική των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων, τις βασικές τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας σε συστήματα LTE καθώς και βασικά χαρακτηριστικά της απόδοσης του δικτύου LTE. Αναφέρουμε περιληπτικά βασικά συστατικά της λειτουργίας, της συντήρησης και της ασφάλειας του δικτύου LTE καθώς και βασικές τεχνικές επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας.

Κεφάλαιο 3: Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Γίνεται περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήσαμε, των πειραματικών διατάξεων καθώς και της διαδικασίας που ακολουθήσαμε για τη διεξαγωγή του πειράματος. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων και με την παρουσίαση διαφόρων συμπερασμάτων.

Παράρτημα Α: Στο Παράρτημα Α παρουσιάζουμε διάφορους συμπληρωματικούς πίνακες που αφορούν το ελληνικό τηλεοπτικό δίκτυο.

Κεφάλαιο 1 Ψηφιακή τηλεόραση¹

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο ψηφιακή τηλεόραση εννοούμε τη μετάδοση ψηφιακού σήματος με σκοπό την βέλτιστη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος. Μια νέα τεχνολογία η οποία τα τελευταία χρόνια έχει εισέλθει δυναμικά στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Η διαρκής ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών (σπηλαιογραφία, γλώσσα, σηματοφόρος καπνός, ασύρματος, τηλέφωνο, τηλεόραση, κινητό τηλέφωνο, διαδίκτυο, δορυφορικές επικοινωνίες, κ.α.) κατέστησαν επιτακτική την ανάγκη καλύτερης χρήσης του φάσματος συχνοτήτων, ενός φυσικού πόρου η αξιοποίηση του οποίου πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους παράγοντες α) **βιολογικός παράγοντας** (επίδραση ραδιοπομπών στην ανθρώπινη υγεία) β) **τεχνολογικός παράγοντας** (η συχνότητα εκπομπής επηρεάζει τις διαστάσεις των κεραιών) γ) **οικονομικός παράγοντας** (οι ραδιοσυχνότητες εκμισθώνονται από την ανεξάρτητη αρχή Ε.Ε.Τ.Τ.).

Στην Ελλάδα έπειτα από οδηγία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής την 1^η Αυγούστου του 2014 σταμάτησε η αναλογική εκπομπή τηλεοπτικού σήματος από 13 κέντρα εκπομπής στην Αττική και σταδιακά μέχρι σήμερα σταμάτησε η αναλογική εκπομπή από όλα τα κέντρα εκπομπής στην Ελλάδα. Το πρότυπο το οποίο χρησιμοποιείται είναι το Digital Video Broadcasting (**DVB-T**) το οποίο απαιτεί εύρος ζώνης 8 MHz ανά κανάλι και χρησιμοποιεί **COFDM** διαμόρφωση με 1705 φέροντα (σύστημα 2k) ή 6817 φέροντα (σύστημα 8k). Οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται από 4,98 έως 31,67 Mbps. Το πρότυπο DVB-T υιοθετεί τα πρότυπα **MPEG-2** και **MPEG-4** για κωδικοποίηση εικόνας και ήχου.

1.2 Ψηφιακά είδη διαμόρφωσης

1.2.1 Εισαγωγή στην διαμόρφωση φάσης

Μια από τις διαμορφώσεις που χρησιμοποιείται για την εκπομπή του ψηφιακού σήματος με αναλογικό φορέα είναι η ψηφιακή **διαμόρφωση φάσης PSK** (Phase Shift Keying). Η απλούστερη μορφή της PSK είναι η BPSK (Binary PSK). Σε αυτή τη διαμόρφωση δύο μόνο μεταβολές φάσεις χρησιμοποιούνται για να κωδικοποιηθούν το 0 και το 1. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι φάσεις 180° και 0° αντίστοιχα. Ο φορέας μπορεί επίσης να μεταβάλλει τη φάση του 4 φορές, οπότε έχουμε διαμόρφωση QPSK (Quad PSK) ή 8 φορές, οπότε έχουμε τη διαμόρφωση BPSK.

1.2.2 Διαμόρφωση BPSK

Σε αυτό τον τύπο διαμόρφωσης ο φορέας μεταβάλλει τη φάση του μεταξύ δύο τιμών που έχουν διαφορά φάσης 180° αν το σήμα εισόδου μεταβάλλει την τιμή του από 0 σε 1. Το πλάτος του φορέα παραμένει σταθερό. Ένας

¹ Πηγές κεφαλαίου

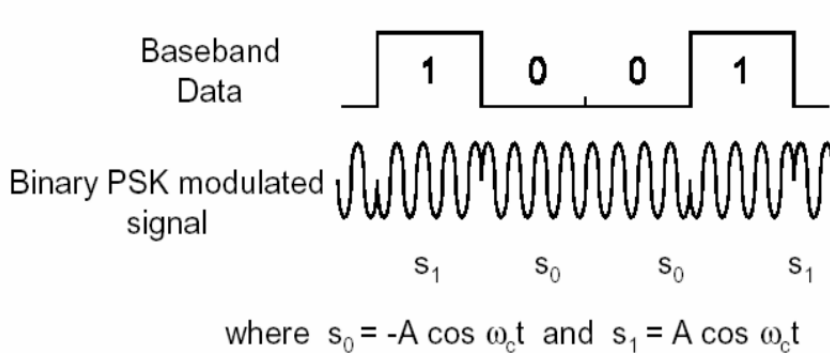
Μελέτη παρεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες τέταρτης γενιάς (4G) LTE FDD, Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2011

Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολής στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες (LTE FDD, LTE TDD, CDMA 2000), Γεώργιος Δ. Μαμαρέλης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2010

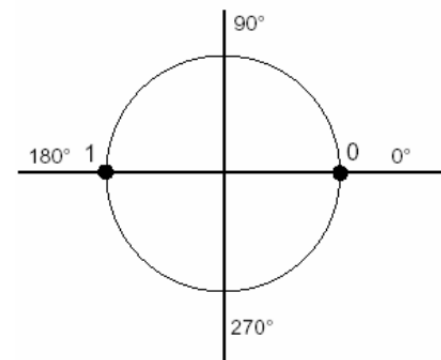
Η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση: Τεχνικό Πλαίσιο Μετάβασης Ψηφιακό Μέρισμα, Παπασπάνος Νικόλαος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Οκτώβριος 2011

Η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση, Μουσίτσας Χρήστος, Πτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη 2008
2nd Generation Terrestrial, DVB Project Office, dvb.org

άλλος τρόπος παράστασης της διαμορφώσεως BPSK είναι με τη χρησιμοποίηση του πολικού διαγράμματος. Στο πολικό διάγραμμα απεικονίζεται η θέση του κάθε εκπεμπόμενου baud με ένα σημείο. Η γωνία που σχηματίζει το κάθε σημείο με την αρχή των συντεταγμένων είναι η φάση του σήματος, ενώ η απόσταση του κάθε σημείου από την αρχή των αξόνων μας δίνει το πλάτος του αναλογικού σήματος. Ο διαμορφωτής BPSK αποτελείται από ένα ισοσταθμισμένο διαμορφωτή, στον οποίο οδηγούνται τα σήματα του ημιτόνιου φορέα και του ψηφιακού σήματος. Η λειτουργία του κωδικοποιητή γίνεται εύκολα αντιληπτή αν θεωρήσουμε ότι τα δυαδικά ψηφία παριστάνονται με τάση 1V (το λογικό 1) και -1V (το λογικό 0). Όταν έρθει λογικό 0 στην είσοδο, τότε το σήμα του φορέα στην έξοδο αντιστρέφεται (φάση 180°), ενώ όταν έρθει το λογικό 1 η φάση του φορέα αφήνεται ανεπηρέαστη (φάση 0°).



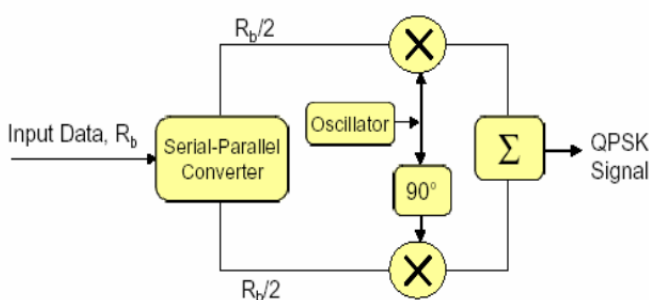
Σχήμα 1.1 Διαμόρφωση BPSK



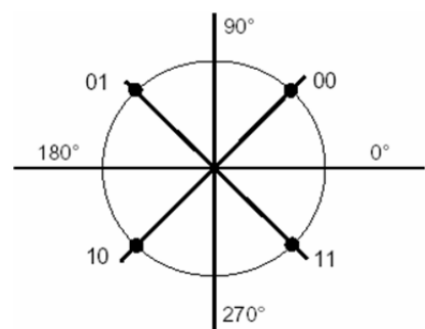
Σχήμα 1.2 Πολικό διάγραμμα BPSK

1.2.3 Διαμόρφωση QPSK

Στις δορυφορικές τηλεοπτικές μεταδόσεις ως τύπος διαμόρφωσης έχει επιλεγεί η **τετραγωνική διαμόρφωση φάσης QPSK**. Ένα ζεύγος bits (από τα δεδομένα) αποθηκεύεται προσωρινά σε ένα καταχωρητή. Καθώς τα δύο bit έχουν τέσσερις συνδυασμούς (00, 01, 10 και 11) η φάση του φορέα στην έξοδο του διαμορφωτή έχει 4 διαφορετικές τιμές που αντιστοιχούν σε αυτούς τους συνδυασμούς. Ο φορέας του ενός διαμορφωτή είναι μετατοπισμένος κατά 90° σε σχέση με το φορέα του άλλου διαμορφωτή. Το πρώτο από τα δύο bit, αυτό που οδηγούμε στο διαμορφωτή με φορέα που έχει φάση 0° $\sin \omega_c t$ ονομάζουμε I bit, ενώ το δεύτερο που διαμορφώνει το μετατοπισμένο κατά 90° $\cos \omega_c t$ ονομάζουμε Q (quadrature) bit. Έτσι η έξοδος του διαμορφωτή I έχει φάση 0° και 180° και η έξοδος του διαμορφωτή Q έχει φάση 90° και 270°. Μετά την πρόσθεση των δύο σημάτων στον αθροιστή, το τελικό σήμα έχει φάση τη συνισταμένη των δύο φάσεων των σημάτων I και Q. Έτσι προκύπτουν οι τέσσερις φάσεις (45°, 135°, 225°, 315°) του σήματος εξόδου.



Σχήμα 1.3 Διάγραμμα βαθμίδων διαμορφωτή QPSK



Σχήμα 1.4 Πολικό διάγραμμα διαμορφωτή QPSK

1.2.4 Διαμόρφωση QAM

Η **διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού QAM** (Quadrature Amplitude Modulation) είναι ένα περίπλοκο όνομα για μια απλή τεχνική. Η διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού είναι ο συνδυασμός διαμόρφωσης εύρους και διαμόρφωσης μετατόπισης φάσης. Πιο τεχνικά, η διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού είναι ένα σύστημα της διαμόρφωσης στο οποίο το στοιχείο μεταφέρεται με τη διαμόρφωση του εύρους δύο χωριστών κυμάτων μεταφορέων, συνήθως ημιτονοειδούς, τα οποία έχουν φάση 90° . Λόγω της διαφοράς φάσης τους, καλούνται μεταφορείς τετραγωνισμού.

Τα μη διαμορφωμένα σήματα εκθέτουν μόνο δύο θέσεις επιτρέποντας μια μεταφορά ανά θέση το λογικό 0 ή το λογικό 1. Στη διαμόρφωση εύρους τετραγωνισμού, είναι δυνατόν να μεταφερθούν περισσότερα κομμάτια ανά θέση δεδομένου ότι υπάρχουν πολλαπλάσια σημεία στη μεταφορά. Ένα σήμα που λαμβάνεται με το άθροισμα της διαμόρφωσης εύρους και φάσης ενός σήματος μεταφορέων χρησιμοποιείται για τη μεταφορά στοιχείων. Όπως ο αριθμός σημείων μεταφοράς παραμένει υψηλός, έτσι είναι δυνατόν να μεταβιβαστούν περισσότερα κομμάτια ανά κάθε αλλαγή θέσης.

Οι πιθανές καταστάσεις μιας ιδιαίτερης διαμόρφωσης μπορούν να δειχτούν καλύτερα χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα αστερισμού. Σε ένα διάγραμμα αστερισμού, τα σημεία αστερισμού τακτοποιούνται σε ένα τετραγωνικό πλέγμα με ίσο οριζόντιο και κάθετο διάστημα (άλλες διαμορφώσεις είναι δυνατές επίσης). Στην ψηφιακή επικοινωνία, δεδομένου ότι το στοιχείο είναι δυαδικό, ο αριθμός σημείων στο πλέγμα συνήθως είναι δύναμη του 2 ($2^2, 2^4, 2^8$ κλπ...). Τα συνηθέστερα είδη ψηφιακής διαμόρφωσης είναι 16 QAM, 64 QAM, 128 QAM και 256 QAM.

Οι ορθογώνιες διαμορφώσεις προτιμώνται από τις μη-ορθογώνιες διαμορφώσεις επειδή είναι ευκολότερη η διαμόρφωση και η από-διαμόρφωση τέτοιου είδους σημάτων. Οι 64 QAM και 256 QAM χρησιμοποιούνται συχνά στο δια-από-διαμορφωτή καλωδίων και στις ψηφιακές εφαρμογές καλωδιακών τηλεοράσεων. Οι 64 QAM και 256 QAM είναι οι εξουσιοδοτημένες οδηγίες διαμόρφωσης για την ψηφιακή καλωδιακή τηλεόραση. Στην Αγγλία χρησιμοποιείται 16 QAM και 64 QAM προς το παρόν στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση.

Η διαμόρφωση φάσης και η διαμόρφωση μετατόπισης φάσης μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις της διαμόρφωσης εύρους τετραγωνισμού όπου το εύρος του διαμορφωμένου σήματος είναι σταθερό ενώ η φάση μεταβάλλεται. Η ίδια θεωρία μπορεί περαιτέρω να επεκταθεί στη διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας και τη διαμόρφωση συχνότητας. Και οι δύο είναι ειδικές περιπτώσεις της διαμόρφωσης φάσης.

Ο συνδυασμός της ASK (ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους) και της PSK είναι ουσιαστικά η διαμόρφωση QAM. Αυτό σημαίνει ότι τα εκπεμπόμενα baud μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους και ως προς τη φάση και ως προς το πλάτος τους.

Η πιο απλή μορφή διαμόρφωσης QAM είναι το σύνολο των συμβόλων της QPSK, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ορθογώνιοι φορείς I και Q (με διαφορά φάσης 90°), διαμορφωμένοι κατά πλάτος με στάθμες πλάτους +A, -A. Αν αυξήσουμε το πλήθος των στάθμεων πλάτους κάθε φορέα σε τέσσερεις, με τιμές +A, -A, +3A και -3A, προκύπτουν τότε 6 δυνατοί συνδυασμοί συμβόλων στην έξοδο του πομπού, οι οποίοι απέχουν εξίσου στο πολικό διάγραμμα και αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένο πλάτος και φάση ο καθένας. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε στάθμη πλάτους μπορεί να κωδικοποιηθούν 2 bit (διότι $2^2=4$ όσες και οι στάθμες πλάτους του φορέα). Επειδή χρησιμοποιούμε δύο φορείς με διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους, (τον $I(t) = \sin \omega t$ και τον $Q(t) = \cos \omega t$) και ο καθένας κωδικοποιεί 2 bit, θα έχουμε συνολικά $2^2 \cdot 2^2 = 16$ στάθμες ή αλλιώς 16 συνδυασμούς πλάτους και φάσης. Άρα σε κάθε συνδυασμό μπορούμε να κωδικοποιήσουμε πληροφορία 4 bits. Η κωδικοποίηση αυτής της μορφής, περιλαμβάνει 16 συνδυασμούς και ονομάζεται 16 QAM.

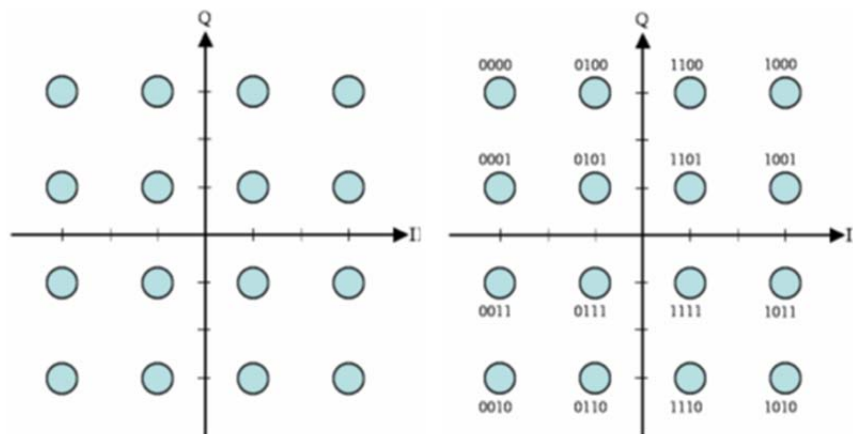
Ο κάθε φορέας όμως μπορεί να λάβει 8 διαφορετικές τιμές πλάτους. Σ' αυτή την περίπτωση στο πολικό διάγραμμα έχουμε $8 * 8 = 64$ σημεία και η διαμόρφωση ονομάζεται πλέον **64 QAM** όπως επίσης και ο συνδυασμός

των 6 bits ($2^6=64$) που κωδικοποιούνται σε κάθε συνδυασμό (σε κάθε baud). Η τιμή που ενδιαφέρει περισσότερο τον πάροχο DVB-T είναι το ωφέλιμο bit rate που μπορεί να μεταφερθεί από το ψηφιακό σήμα, δηλαδή ο ρυθμός του ρεύματος μεταφοράς MPEG-2 που μεταδίδεται.

Η τιμή αυτή εξαρτάται από τη διάρκεια του διαστήματος φρούρησης, τον ρυθμό κωδικοποίησης και τον τύπο της διαμόρφωσης, όπως φαίνεται και στον πίνακα 1.1 (τιμές σε Mbit/s).

| Διαμόρφωση | Ρυθμός κώδικα | Περίοδος φύλαξης | | | |
|------------|---------------|------------------|-------|-------|-------|
| | | 1/4 | 1/8 | 1/16 | 1/32 |
| QPSK | 1/2 | 4,98 | 5,53 | 5,85 | 6,03 |
| | 2/3 | 6,64 | 7,37 | 7,81 | 8,04 |
| | 3/4 | 7,46 | 8,29 | 8,78 | 9,05 |
| | 5/6 | 8,29 | 9,22 | 9,76 | 10,05 |
| | 7/8 | 8,71 | 9,68 | 10,25 | 10,56 |
| 16-QAM | 1/2 | 9,95 | 11,06 | 11,71 | 12,06 |
| | 2/3 | 13,27 | 14,75 | 15,61 | 16,09 |
| | 3/4 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| | 5/6 | 16,59 | 18,43 | 19,52 | 20,11 |
| | 7/8 | 17,42 | 19,35 | 20,49 | 21,11 |
| 64-QAM | 1/2 | 14,93 | 16,59 | 17,56 | 18,10 |
| | 2/3 | 19,91 | 22,12 | 23,42 | 24,13 |
| | 3/4 | 22,39 | 24,88 | 26,35 | 27,14 |
| | 5/6 | 24,88 | 27,65 | 29,27 | 30,16 |
| | 7/8 | 26,13 | 29,03 | 30,74 | 31,67 |

Πίνακας 1.1 Ωφέλιμο bitrate συναρτήσει του σχήματος διαμόρφωσης



Σχήμα 1.5 Πολικό Διάγραμμα διαμόρφωσης 16 QAM

Ο συνδυασμός των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν βρίσκεται στην επιλογή του χρήστη. Γενικά πάντως ισχύει ότι όσο αυξάνει ο ωφέλιμος ρυθμός, τόσο πιο ευάλωτο γίνεται το σήμα σε φαινόμενα διαλείψεων και πολυδιαδρομικής μετάδοσης (multipath). Απαιτείται δηλαδή να γίνει ένας συμβιβασμός (trade - off) από την πλευρά του παρόχου μεταξύ χωρητικότητας και ανθεκτικότητας του σήματος.

1.2.5 Εισαγωγή στο σύστημα διαμόρφωσης OFDM

Η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης που κωδικοποιεί ψηφιακά δεδομένα σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες. Η OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα δημοφιλές σύστημα ευρείας ζώνης ψηφιακής επικοινωνίας, που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεόραση, DSL Internet, ασύρματα δίκτυα, powerline δίκτυα, καθώς και δίκτυα κινητών επικοινωνιών 4G. Εντούτοις, η OFDM έχει ένα έμφυτο πρόβλημα: τα ασύρματα σήματα μπορούν να ταξιδέψουν πολλαπλάσιες πορείες από τη συσκευή αποστολής σημάτων στο δέκτη (με την αναπήδηση από τα κτήρια, τα βουνά και ακόμη και τη διάβαση των αεροπλάνων) οι

δέκτες μπορούν να έχουν το πρόβλημα ταξινόμησης των σημάτων. Η OFDM εξετάζει αυτό το πρόβλημα με το διαχωρισμό των μεταφορέων σε μικρότερους μεταφορείς, και έπειτα τη ραδιοφωνική αναμετάδοση ταυτόχρονα. Αυτό μειώνει την πολλαπλών διαδρομών διαστρέβλωση και μειώνει την παρέμβαση RF (ένας μαθηματικός τύπος χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι οι συγκεκριμένες συχνότητες των μεταφορέων είναι «ορθογώνιες»), επιτρέποντας μεγαλύτερο ρυθμό απόδοσης. Το OFDM είναι η καρδιά της τεχνολογίας 802.11a ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN), η οποία μπορεί να προσφέρει ένα ρυθμό απόδοσης μέχρι 54 Mbit/s τόσο στην DVB-T όσο και στις γραμμές ADSL.

Η τεχνική OFDM είναι καταλυτικής σημασίας για την ανάπτυξη δικτύων δεδομένων υψηλών ταχυτήτων. Βασίζεται στην παράλληλη αποστολή των πακέτων δεδομένων δίνοντας ώθηση στην υλοποίηση δικτύων υψηλών ταχυτήτων. Μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων. Πριν γίνει η μεταφορά του ράδιο-σήματος, αυτό χωρίζεται σε πολλά μικρότερα σήματα τα οποία μεταφέρονται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές συχνότητες.

Παραδοσιακά, στα δίκτυα δεδομένων τα πακέτα πληροφοριών στέλνονται το ένα μετά το άλλο, σειριακά. Για να αυξηθεί η ταχύτητα μετάδοσης, αρκεί να αυξηθεί και η χρονική πυκνότητα αποστολής των πακέτων, δηλαδή να μειωθεί η διάρκεια κάθε πακέτου ώστε σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα να μπορεί να σταλεί μεγαλύτερος αριθμός πακέτων.

Σε "δύστροπα" μέσα μετάδοσης, όπως στην περίπτωση της κινητής τηλεφωνίας ή γενικότερα των ασυρμάτων δικτύων, η διάρκεια των πακέτων δεδομένων δεν μπορεί να ελαττωθεί πέρα από κάποιο όριο, το οποίο έχει να κάνει με το βαθμό "δυστροπίας" του μέσου μετάδοσης, περιορίζοντας έτσι την επιτεύξιμη ταχύτητα.

Η τεχνική OFDM επιτρέπει την αποστολή πακέτων δεδομένων όχι σειριακά στον χρόνο, αλλά παράλληλα. Αυτό σημαίνει ότι σε δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούν το OFDM μπορούν να αποσταλούν πολλά πακέτα ταυτόχρονα σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα. Παράλληλα, αν επιθυμούμε την αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης, αρκεί να αυξήσουμε τον αριθμό των πακέτων που μεταδίδονται ταυτόχρονα.

1.2.6 Εισαγωγή στο σύστημα COFDM

Το **σύστημα COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** είναι ένα σύστημα διαμόρφωσης που διαιρεί ένα ενιαίο ψηφιακό σήμα σε 1.000 ή περισσότερους μεταφορείς σημάτων (φέρον) ταυτόχρονα. Τα σήματα στέλνονται κάθετα το ένα στο άλλο (ως εκ τούτου, ορθογώνιο) και άρα δεν παρεμβάλλουν το ένα στο άλλο. Χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη και υποστηρίζεται από το ψηφιακό τηλεοπτικό σύνολο ραδιοφωνικής αναμετάδοσης (**DVB**). Στις ΗΠΑ, η προηγμένη Επιτροπή τηλεοπτικών προτύπων (**ATSC**) έχει επιλέξει το **8-VSB** ως ισοδύναμο πρότυπο διαμόρφωσης. Ο κύριος λόγος για την απόφαση της Ευρώπης να χρησιμοποιήσει COFDM είναι η δυνατότητά του να υπερνικήσει εντελώς τα πολλαπλών διαδρομών αποτελέσματα. Όταν ένα σήμα μεταδίδεται, συναντιέται με τις παρεμποδίσεις όπως τα φαράγγια, κτήρια, και ακόμη και άνθρωποι, οι οποίοι διασκορπίζουν το σήμα αναγκάζοντας το να πάρουν δύο ή περισσότερες πορείες για να φθάσουν στον τελικό προορισμό του, τη τηλεόραση. Είναι ανθεκτικό στα πολλαπλών διαδρομών αποτελέσματα επειδή χρησιμοποιεί τους πολλαπλάσιους μεταφορείς για να διαβιβάσει το ίδιο σήμα. Αντί του σήματος που διασκορπίζει όταν συναντιέται με ένα εμπόδιο, ρέει γύρω από το εμπόδιο όπως ένας ποταμός ρέει γύρω από έναν βράχο.

Όπως με το δορυφορικό πρότυπο DVB-S έτσι και το DVB-T για την επίγεια ψηφιακή μετάδοση, εγκρίθηκε από την **ETSI (European Telecommunications Standards Institute)** το Φεβρουάριο του 1997 και περιέχει βεβαίως, την κωδικοποίηση εικόνας και ήχου σε **MPEG-2**, καθώς και άλλα σημαντικά στοιχεία, το οποίο επιτρέπει τη χρήση **1705 φερουσών (2k) ή 6817 φερουσών (8k)**. Το σύστημα 2k, είναι κατάλληλο για λειτουργία ενός πομπού σε μικρά τοπικά δίκτυα με περιορισμένη ισχύ εκπομπής, ενώ το σύστημα 8k, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μικρά τοπικά δίκτυα, όσο και σε μεγάλης έκτασης δίκτυα μιας συχνότητας, διατηρώντας συμβατότητα με το 2k.

Το όλο σύστημα διαμόρφωσης, συνδυάζει το OFDM, με τις ψηφιακές διαμορφώσεις QPSK/QAM. Το OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό φερουσών, στις οποίες «σκορπίζεται» η πληροφορία, ενώ χρησιμοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία στην **ψηφιακή εκπομπή ραδιοφώνου**, το λεγόμενο **DAB (Digital Audio Broadcasting)**. Το **πλεονέκτημα του OFDM**, είναι η **αντοχή του σε έντονο περιβάλλον ανακλάσεων**, όπως είναι αυτό της μετάδοσης πολλαπλών διαδρομών ή διεθνώς **Multipath Effect**, που συμβαίνει κατά κόρον στις επίγειες εκπομπές.

Λόγω της παραπάνω αντοχής του OFDM, είναι δυνατό να λειτουργήσει ένα δίκτυο αλληλεπικαλυπτόμενων πομπών, σε μία και μόνη συχνότητα. Στις περιοχές αλληλοεπικάλυψης, το λιγότερο ισχυρό σήμα αντιμετωπίζεται σαν «ηχώ».

Στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, υπάρχουν **3 είδη λειτουργίας**: α) **εκπομπή σε ένα αχρησιμοποίητο κανάλι** β) **εκπομπή σε δίκτυο μικρής έκτασης σε μία συχνότητα** γ) **εκπομπή σε δίκτυο μεγάλης έκτασης σε μία συχνότητα**. Και τα τρία είδη έχουν λειτουργήσει επιτυχώς, χάριν στο πρότυπο DVB-T.

1.2.7 Η εφαρμογή της COFDM στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση

Όπως αναφέραμε η COFDM χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη επιλογή των στοιχείων του κάθε συστήματος ώστε να ικανοποιούνται οι ειδικές απαιτήσεις. Ειδικότερα για τη χρήση της COFDM στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση **θα πρέπει να επιλεγεί**: α) **το πλήθος των φερόντων σημάτων ανά σύμβολο** β) **η περίοδος φύλαξης T_g** γ) **η μορφή της διαμορφώσεως** και δ) **η μέθοδος συγχρονισμού με το δέκτη**. Κατά τη διαδικασία σχεδιάσεως του συστήματος DVB-T, η εκλογή των φερόντων σημάτων αποδείχθηκε η πιο δύσκολη. Διότι πολλές Ευρωπαϊκές χώρες πιστεύουν ότι το κλειδί της επιτυχίας του συστήματος DVB-T είναι να υπάρχει ένα δίκτυο έτσι ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις από μία συχνότητα (single frequency network - SFN) για ολόκληρη την επικράτεια. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται περίοδος φύλαξης T_g περίπου 200 μ s και σύμφωνα με την ανάλυση παραπάνω απαιτείται αριθμός φερόντων σημάτων της τάξεως των 6000. Λόγω του γεγονότος ότι η COFDM εφαρμόζεται πολύ αποτελεσματικά με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier στον πομπό και με τη χρήση ολοκληρωμένου κυκλώματος στο δέκτη που έχει τη δυνατότητα να εκτελεί τον αντίστοιχο διακριτό μετασχηματισμό Fourier σε πραγματικό χρόνο. Η εκλογή του πλυνθίου αυτού αποδείχθηκε η περισσότερο κρίσιμη. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier εκτελείται με πλυνθία τα οποία υπολογίζουν μέχρι και κάποια δύναμη του δύο. Το $2^{13} = 8192 \approx "8k"$ είναι το πλύνθιο που είναι πλησιέστερο προς το 6000. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν η εκλογή $T_g = 200 \mu$ s σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί στο δέκτη αποδιαμορφωτής των "8k".

Δυστυχώς κατά την αξιολόγηση του συστήματος "8k" διαπιστώθηκε ότι το κόστος της πρώτης γενιάς δεκτών θα ήταν απαγορευτικό. Σαν ενδιάμεση λύση επελέγη $T_g = 50 \mu$ s, που αντιστοιχεί σε περίπου 1500 φέροντα σήματα για το κανάλι των 8 MHz. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πλυνθίο αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier των "2k". Τελικώς αποφασίστηκε η χρήση κοινής προδιαγραφής "2k/8k", η οποία υποστηρίζει και τις δύο λύσεις. Η χρήση του συστήματος "2k" συνιστάται για σύστημα ενός πομπού, ή μικρού δικτύου, ενώ το "8k" συνιστάται για μικρό και μεγάλο μόνο-συχνотικό δίκτυο (SFN).

Το εκπεμπόμενο σήμα στο σύστημα DVB-T είναι οργανωμένο σε πλαίσια. Το κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια T_f και αποτελείται από 68 COFDM σύμβολα. Τέσσερα πλαίσια αποτελούν ένα υπέρ-πλαίσιο. Το κάθε σύμβολο αποτελείται από $n = 6817$ φέροντα σήματα για τη μορφή "8k" και από $n = 1705$ φέροντα σήματα για τη μορφή "2k", εκπέμπεται δε στην περίοδο T_s . Η περίοδος φύλαξης T_g είναι κυκλική συνέχεια της περιόδου T_u και τοποθετείται πριν από αυτήν.

1.3 Ψηφιοποίηση και συμπίεση σημάτων

1.3.1 Εισαγωγή

Τα **αναλογικά συστήματα έγχρωμης τηλεόρασης PAL, SECAM και NTSC** με συχνότητα πεδίου 50 και 60 Hz αναπτύχθηκαν πριν από 40 χρόνια περίπου και βέβαια η ανάπτυξη τους βασίστηκε στην τεχνολογία της εποχής εκείνης. Η ψηφιακή τεχνολογία αν και έχει κατακλύσει όλους τους τομείς της βιομηχανίας των ηλεκτρονικών, δεν μπόρεσε να εισέλθει όλα αυτά τα χρόνια δυναμικά στο χώρο της τηλεοπτικής τεχνικής. Η καθυστέρηση εισόδου της ψηφιακής τεχνικής στην τηλεόραση οφείλεται στους εξής κυρίως λόγους:

- Η τεχνολογία των ημιαγωγών πρόσφατα κατάφερε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της επεξεργασίας σήματος στην τηλεόραση.
- Τα αναλογικά συστήματα επαρκούσαν για την εξυπηρέτηση των περισσότερων εφαρμογών.
- Στην τηλεόραση κάθε καινοτομική αλλαγή έχει απαιτήσεις συμβατότητας με το υπάρχον τηλεοπτικό σύστημα.

Στο τέλος της δεκαετίας του 1980 η σύγκλιση των τεχνολογιών της πληροφορικής, των τηλεπικοινωνιών και της ψηφιοποίησης του σήματος video, καθώς επίσης η ανάπτυξη των δικτύων Η/Υ σε απομακρυσμένες περιοχές, έχουν ωθήσει τις επικοινωνιακές εταιρίες να βρουν τρόπους για τη μετάδοση ψηφιακού σήματος video από τα υπάρχοντα δίκτυα δεδομένων.

Η ψηφιοποίηση του σήματος video (εικόνας) έχει πολλά πλεονεκτήματα τα κυριότερα των οποίων είναι:

- Η μικρή ευαισθησία των ψηφιακών σημάτων στο θόρυβο. Τα αναλογικά σήματα σε αντίθεση με τα ψηφιακά επηρεάζονται από κάθε θόρυβο που μεταβάλλει το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση τους.
- Με τα ψηφιακά σήματα παρέχονται περισσότερες δυνατότητες για την επεξεργασία τους σε αντίθεση με τα αναλογικά, όπως για παράδειγμα η αποθήκευσή τους.
- Υψηλή ποιότητα εικόνας και ήχου.
- Δυνατότητα λήψης πολλών καναλιών με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος διανομής ανά πρόγραμμα.
- Αυξημένη δυνατότητα επιλογής προγραμμάτων και υπηρεσιών.

Η ψηφιοποίηση όμως του σήματος video έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Απαιτήση για μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων από το κανάλι μετάδοσης. Το ψηφιοποιημένο οπτικό σήμα απαιτεί, χωρίς συμπίεση, ρυθμό μετάδοσης 250 Mbits/s για τη συμβατική τηλεόραση και 1200 Mbit/s για την υψηλής ευκρίνειας.
- Με τη ψηφιακή μετάδοση δεν υπάρχει συμβατότητα με τις ήδη λειτουργούσες αναλογικές εγκαταστάσεις.

Στις μέρες μας, η ύπαρξη αποτελεσματικών λόγων συμπίεσης του ψηφιακού σήματος σε λόγους που είναι δυνατόν να ξεπεράσουν το 100:1, ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα της εικόνας, παρέχεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά και οικονομικά η ψηφιακή τεχνολογία στην επεξεργασία της εικόνας. Η εισαγωγή καλύτερων αλγορίθμων συμπίεσης επιτρέπει την πιο αποτελεσματική και οικονομική χρήση του φάσματος συχνοτήτων.

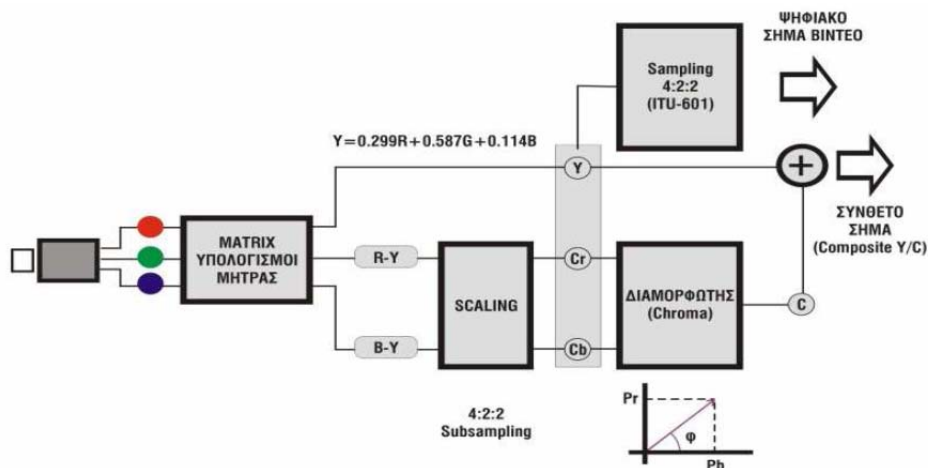
1.3.2 Βασικά στοιχεία ψηφιοποίησης

Από τη δεκαετία του 1980 καθιερώθηκε ως **διεθνές πρότυπο ψηφιοποίησης των σημάτων των συμβατικών συστημάτων τηλεόρασης η αναφορά 601-4 της ITU**. Στο πρότυπο αυτό, που είναι γνωστό ως πρότυπο 4:2:2, καθιερώνεται η χρήση παλμοκωδικής διαμόρφωσης (**pulse code modulation** - με ακρώνυμο **PCM**) με συχνότητα δειγματοληψίας 13,5 MHz και τεμαχισμό του σήματος σε 256 επίπεδα. Για την κωδικοποίηση του εύρους του

σήματος απαιτούνται 8 δυαδικά ψηφία. Η συχνότητα δειγματοληψίας των 2 σημάτων χρωμοδιαφοράς είναι 6,75 MHz και η ονομασία του προτύπου αυτού ακριβώς οφείλεται στη σχέση της συχνότητας δειγματοληψίας των σημάτων χρωμοδιαφοράς με τη συχνότητα δειγματοληψίας του οπτικού σήματος. Το πρότυπο 4:2:2 κρίνεται ότι είναι σταθμός στην ιστορία της τηλεόρασης και αποτελεί τη βάση στην οποία στηρίζεται η ψηφιακή τηλεόραση, ωστόσο με απλό υπολογισμό βρίσκουμε ότι η απαιτούμενη ταχύτητα bit stream είναι θεωρητικά 216 Mbit/s και στην πράξη 250 Mbit/s. Σήμερα τα στούντιο της τηλεόρασης έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ψηφιακά στις απαιτούμενες ταχύτητες bit stream και αυτός είναι ο λόγος που η ψηφιακή τεχνολογία εφαρμόστηκε αρχικά για να βελτιώσει τη λειτουργία των στούντιο, τη βελτίωση αυτή την παρατηρούμε καθημερινά στην παρουσίαση των τηλεοπτικών προγραμμάτων, στην παραγωγή διαφόρων κινηματογραφικών εφέ ή ακόμα και στην παραγωγή ειδικών εικόνων και προγραμμάτων με υπολογιστή.

Η μετάδοση όμως των ψηφιοποιημένων οπτικών σημάτων με ταχύτητες της τάξεως των 250 Mbit/s από τα τηλεπικοινωνιακά μέσα (επίγεια εκπομπή, ασύρματα δίκτυα ή καλωδιακοί άξονες) με τις συνηθισμένες μεθόδους διαμορφώσεως απαιτεί εύρος συχνοτήτων της τάξεως των 125 MHz και βέβαια η απαίτηση αυτή είναι απαγορευτική, αν ληφθεί υπόψη ότι το αναλογικό τηλεοπτικό κανάλι δεν ξεπερνά τα 7 MHz. Θα πρέπει ακόμα να τονίσουμε ότι στο πρότυπο 4:2:2 η κωδικοποίηση των πληροφοριών χρώματος γίνεται με τη μέθοδο της κωδικοποίησης με συνιστώσες (component coding) στην οποία το σήμα φωτεινότητας (Y) και τα σήματα χρωμοδιαφοράς (CR και CB) κωδικοποιούνται και εκπέμπονται σε ξεχωριστές ροές. Με τον τρόπο αυτό εξουδετερώνονται τα προβλήματα που υπάρχουν στην αναλογική τηλεόραση από την ενδοδιαμόρφωση των σημάτων χρωμοδιαφοράς στο σήμα φωτεινότητας.

Η διεθνής καθιέρωση του προτύπου ψηφιοποίησης του οπτικού σήματος 4:2:2 έχει μεγάλη σημασία, γιατί μειώνει τις διαφορές των τριών αναλογικών συστημάτων σε μια μόνο, τη συχνότητα πεδίου και τον αριθμό γραμμών ανά εικόνα (625 γραμμές ανά εικόνα με συχνότητα πεδίου 50 Hz για το ευρωπαϊκό και 525 γραμμές ανά εικόνα με συχνότητα πεδίου 60 Hz για το αμερικανικό). Με τον τρόπο αυτόν απλοποιείται η ανταλλαγή τηλεοπτικών και λοιπών προγραμμάτων σε παγκόσμια κλίμακα.



Σχήμα 1.6 Ψηφιοποίηση τηλεοπτικού σήματος

1.3.3 Συμπύεση τηλεοπτικού σήματος

Το ψηφιοποιημένο οπτικό σήμα του προτύπου 4:2:2 απαιτεί ένα ρυθμό μετάδοσης περίπου 250 Mbit/s. Η άμεση εκπομπή αυτού του σήματος θα απαιτούσε ένα εύρος συχνοτήτων μεγαλύτερο από 100 MHz. Το τεράστιο αυτό εύρος συχνοτήτων δεν είναι δυνατό αλλά και οικονομικά εφικτό να διατεθεί. Χρειάζεται λοιπόν να γίνει μείωση της ποσότητας των δεδομένων που θα εκπεμφθούν. Η μείωση αυτή ονομάζεται συμπύεση δεδομένων (data compression). Λόγος συμπύεσης (compression ratio) ονομάζεται ο λόγος που προκύπτει αν διαιρέσουμε την ποσότητα των δεδομένων πριν τη συμπύεση με αυτήν που έχουμε μετά τη συμπύεση.

Οι τεχνικές συμπίεσης ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) τις αντιστρεπτές (χωρίς απώλεια δεδομένων) β) τις μη αντιστρεπτές (με απώλεια δεδομένων). Οι αντιστρεπτές περιορίζουν τον όγκο των δεδομένων προσωρινά, για παράδειγμα κατά την εκπομπή του σήματος. Στο δέκτη το αρχικό σήμα μπορεί να ανακτηθεί με απόλυτη ακρίβεια, όπως ήταν τα αρχικά δεδομένα πριν τη συμπίεση. Οι μη αντιστρεπτές τεχνικές συμπίεσης περιορίζουν μόνιμα τον όγκο δεδομένων. Στο δέκτη για παράδειγμα δεν υπάρχει η δυνατότητα το σήμα να ανακτηθεί με πλήρη ακρίβεια. Το πλεονέκτημα όμως αυτών των τεχνικών είναι ότι μπορούμε να πετύχουμε μεγάλους λόγους συμπίεσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση του ψηφιακού σήματος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κωδικοποίηση που γίνεται. Έχουμε λοιπόν την **κωδικοποίηση εντροπίας** και την **κωδικοποίηση πηγής**. Κάθε μια από αυτές περιλαμβάνει κάποιες επιμέρους τεχνικές.

Για την κατανόηση των τεχνικών κωδικοποίησης ορίζονται τα παρακάτω βήματα δείχνοντας μια τυπική ακολουθία από λειτουργίες που διεξάγεται κατά την συμπίεση εικόνων, βίντεο και ήχου.



Σχήμα 1.7 Κυριότερα βήματα συμπίεσης δεδομένων

Το στάδιο της προετοιμασίας περιλαμβάνει μετατροπή από αναλογική σε ψηφιακή και παράγει μια κατάλληλη ψηφιακή αναπαράσταση της πληροφορίας. Μια εικόνα διαιρείται σε blocks των 8x8 pixels και αναπαριστάται από ένα σταθερό αριθμό bits/pixel.

Το στάδιο της επεξεργασίας είναι πραγματικά το πρώτο βήμα της διαδικασίας συμπίεσης το οποίο χρησιμοποιεί εξειδικευμένους αλγόριθμους. Ένας μετασχηματισμός από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας DCT. Στην περίπτωση συμπίεσης κινούμενου βίντεο η κωδικοποίηση χρησιμοποιεί ένα διάλυσμα κίνησης για κάθε block 8x8 pixel.

Η **κωδικοποίηση εντροπίας** είναι συνήθως το τελευταίο βήμα. Αυτό **συμπιέζει** μια ακολουθιακή ψηφιακή ροή δεδομένων **χωρίς απώλειες**. Η κωδικοποίηση και η κβαντοποίηση μπορούν να επαναληφθούν πολλές φορές σε αναδρομικές ανακυκλώσεις όπως στην περίπτωση της προσαρμοστικής, διαφορικής, παλμοκωδικής διαμόρφωσης (**Adaptive Differential Pulse Code Modulation**) ή **ADPCM**). Το σχήμα 1.7, μας δείχνει τη διαδικασία συμπίεσης που ακολουθείται για την συμπίεση εικόνας. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για την συμπίεση video και ήχου. Η απόσυμπίεση είναι η αντίστροφη διαδικασία της συμπίεσης.

Οι κωδικοποιητές και οι αποκωδικοποιητές μπορούν να εφαρμοστούν με ποικίλους τρόπους. Στις συμμετρικές εφαρμογές όπως είναι για παράδειγμα οι εφαρμογές διαλόγου έχουμε περίπου το ίδιο κόστος στην κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση. Στην περίπτωση ασύμμετρων τεχνικών η διαδικασία αποκωδικοποίησης είναι λιγότερο δαπανηρή από την διαδικασία κωδικοποίησης.

1.3.4 Το πρότυπο MPEG-2

Τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης τυποποίησης των δεδομένων στη συμπίεση των ψηφιοποιημένων οπτικών, ηχητικών και άλλων πληροφοριών είναι πάρα πολλά. Για τη δημιουργία αυτής της τυποποίησης το 1988 συστάθηκε μια επιτροπή MPEG (Motion Picture Expert Group). Αρχικός σκοπός αυτής της επιτροπής ήταν να ορίσει τους αλγόριθμους για την κωδικοποίηση του οπτικού σήματος για την ψηφιακή αποθήκευση του σε CD-ROM με ένα ρυθμό περίπου 1,5 Mbit/s. Το πρότυπο που προέκυψε από τις εργασίες της επιτροπής ονομάστηκε MPEG-1. Οι εφαρμογές του MPEG-1 περιορίζονται σε μορφές οπτικού σήματος χωρίς αλληλοδιαδοχή πεδίων και υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 1,5 Mbit/s. Το 1990 η ίδια επιτροπή άρχισε να εργάζεται για ένα άλλο πρότυπο το οποίο θα

υποστήριζε ρυθμούς από 2 ως 10 Mbit/s και θα είχε τη δυνατότητα κωδικοποίησης οπτικού σήματος με αλληλοδιαδοχή πεδίων. Το 1994 δημοσιεύτηκε το νέο πρότυπο το οποίο ονομάστηκε MPEG-2 και έγινε διεθνές πρότυπο το 1995. Το πρότυπο MPEG-2, το οποίο σήμερα υποστηρίζει ρυθμούς μέχρι 30 Mbit/s, έτυχε γενικής αποδοχής και αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται όλες οι προσπάθειες για τη δημιουργία συστημάτων ψηφιακής τηλεόρασης. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία του MPEG-2 είναι η ικανότητα του να κωδικοποιεί την πληροφορία με μεταβλητό ρυθμό δεδομένων (VBR - Variable Bit Rate).

Το πρότυπο MPEG αποτελείται από τρία μέρη:

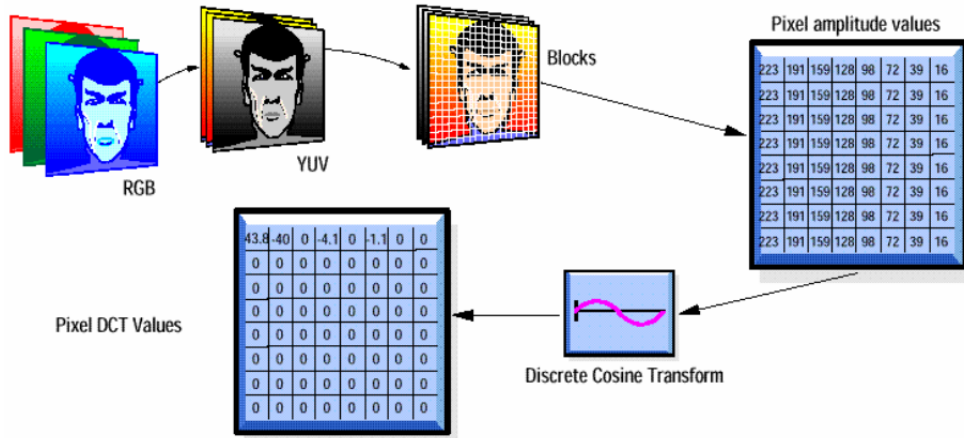
- **Το σύστημα:** περιγράφει το συγχρονισμό ήχου και εικόνας, την πολυπλεξία και άλλες λειτουργίες σχετικά με το σύστημα.
- **Την εικόνα:** περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων video και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.
- **Τον ήχο:** περιλαμβάνει την κωδικοποιημένη παρουσίαση των δεδομένων ήχου και τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης.

Βασικό χαρακτηριστικό της κωδικοποίησης είναι ο εντοπισμός της επαναλαμβανόμενης πληροφορίας, ώστε αυτή να μην κωδικοποιείται περισσότερο από μια φορά αλλά να περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή η πληροφορία επαναλαμβάνεται. Αυτή η πληροφορία, που ουσιαστικά πλεονάζει, μπορεί το σύστημα να τη συμπίεσει χρησιμοποιώντας τις παρακάτω τεχνικές:

- **Τον πλεονασμό στο χώρο,** στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι πολλά γειτονικά εικονο-στοιχεία είναι όμοια μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται ευρύτατα και αποτελεσματικά ένας μαθηματικός μετασχηματισμός που είναι γνωστός ως διακριτός μετασχηματισμός του συνημίτονου DCT (Discrete Cosine Transform) και η συμπίεση αυτή καλείται ενδοπλαισιακή συμπίεση.
- **Τον πλεονασμό στο χρόνο,** στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι διαδοχικές εικόνες δεν διαφέρουν σε όλα τους τα σημεία, συνεπώς αντί να εκπέμπουμε την ίδια την εικόνα 25 φορές το δευτερόλεπτο εκπέμπουμε μόνον τις διαφορές των εικόνων, εάν υπάρχουν. Η συμπίεση αυτή αναφέρεται ως διαπλαισιακή συμπίεση.
- **Τον στατικό πλεονασμό,** στον οποίο εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι μερικοί κώδικες συμβαίνουν πιο συχνά απ' άλλους. Στην περίπτωση αυτή για τους κώδικες που συμβαίνουν συχνά χρησιμοποιούνται λιγότερα ψηφία.
- **Τον ψυχρό-οπτικό πλεονασμό** στον οποίο εκμεταλλευόμαστε την περιορισμένη ικανότητα της οράσεως να ξεχωρίζει τις λεπτομέρειες της εικόνας και τα κινούμενα είδωλα.

Η διαδικασία της συμπίεσης πραγματοποιείται με τα εξής στάδια:

- **Το στάδιο της διαίρεσης της εικόνας σε macroblock.**
- **Το στάδιο του διακριτού μετασχηματισμού συνημίτονου (DCT).**
- **Το στάδιο κβαντοποίησης και κωδικοποίησης.**



Σχήμα 1.8 Το πρότυπο MPEG-2

Μια ακόμα λειτουργία του προτύπου MPEG είναι ότι καθορίζει τον συνδυασμό πολλών ροών δεδομένων σε μία. Η ίδια ιδέα επιδιώχτηκε να χρησιμοποιηθεί και στο πρότυπο DVI για να καθορισθεί το μορφότυπο ήχου/εικόνας AVSS (Audio/Video Support System). Το πιο σημαντικό στοιχείο αυτής της διεργασίας είναι η πολυπλεξία, η οποία περιλαμβάνει συντονισμό ροών δεδομένων εισόδου και εξόδου, συντονισμό ρολογιών συγχρονισμού και διαχείριση ενταμιευτών. Γι' αυτό τον λόγο η ροή δεδομένων διαιρείται σε πακέτα (packets). Ο αποκωδικοποιητής παίρνει την πληροφορία που χρειάζεται για δέσμευση πόρων από αυτήν την πολυπλεγμένη ροή δεδομένων. Ο μέγιστος ρυθμός ροής δεδομένων περιγράφεται στην αρχή του πρώτου πακέτου ροής δεδομένων.

Ο ορισμός αυτός της ροής δεδομένων υπονοεί ότι για τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε δευτερεύοντα/βοηθητικά μέσα είναι πιθανό να διαβαστεί πρώτα μια τέτοια επικεφαλίδα (εάν κριθεί απαραίτητο, με τυχαία προσπέλαση). Σε περιπτώσεις αμφίδρομης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται δίκτυα επικοινωνιών, όπως το τηλέφωνο ή οι τηλεδιάσκεψες, ο χρήστης λαμβάνει πάντα πρώτα την πληροφορία που του παρέχει η επικεφαλίδα. Σε μια τηλεδιάσκεψη, η χρησιμοποίηση ροής δεδομένων τύπου MPEG μπορεί να μην είναι η κατάλληλη γιατί ένας νέος χρήστης μπορεί να θέλει να συμμετάσχει σε μια υπάρχουσα τηλεδιάσκεψη μετά το πέρας της αρχικοποίησης των ροών δεδομένων. Έτσι, δεν θα μπορέσει να πάρει τις πληροφορίες της επικεφαλίδας γιατί δεν θα του είναι διαθέσιμες.

Μια ροή δεδομένων δημιουργημένη σύμφωνα με το πρότυπο MPEG, παρέχει χρονοσφραγίδες που είναι απαραίτητες για συγχρονισμό. Οι χρονοσφραγίδες αυτές αναφέρονται στη συσχέτιση των πολυπλεγμένων ροών δεδομένων μόνο και όχι σε άλλες υπάρχουσες ροές δεδομένων του προτύπου. Δεν ορίζει κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Το MPEG καθορίζει την διαδικασία αποκωδικοποίησης αλλά όχι τον ίδιο τον αποκωδικοποιητή.

Το MPEG-2 έχει σαν στόχο μια υψηλότερη ανάλυση εικόνας ανάλογη του προτύπου CCIR 601 (περίπου 216 Mbit/s) και οδεύει προς μια ακόμα καλύτερη ποιότητα απαραίτητη για τη HDTV.

Σαν ένα γενικό και διεθνές πρότυπο, το MPEG-2 καθορίστηκε έτσι ώστε να παρέχει επεκτάσιμα προφίλ κάθε ένα από τα οποία θα υποστηρίζει χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για ομάδες εφαρμογών. Το πρότυπο MPEG-2 κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να υποστηρίζει ψηφιακή μετάδοση video έως 80 Mbit/s μέσω καλωδίου, δορυφόρου και άλλων καναλιών μετάδοσης, καθώς και να υποστηρίζει ψηφιακή αποθήκευση και άλλες εφαρμογές επικοινωνίας. Παράμετροι όπως το κυρίως προφίλ και το υψηλό προφίλ είναι κατάλληλες για υποστήριξη HDTV μορφότυπων.

Οι ειδικοί φρόντισαν να επεκταθούν τα χαρακτηριστικά του κυρίως προφίλ με το να καθορίσουν ένα ιεραρχικό/κλιμακωτό προφίλ. Στόχος αυτού του προφίλ είναι να υποστηρίζει εφαρμογές όπως επίγεια τηλεόραση (τόσο κοινή όσο και HDTV), συστήματα video για δίκτυα μεταγωγής πακέτου, συμβατότητα με παλαιότερες εφαρμογές και πρότυπα όπως το MPEG-1 και H.261 και άλλες εφαρμογές που απαιτούν κωδικοποίηση πολλών επιπέδων. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να δώσει στον καταναλωτή την επιλογή να χρησιμοποιήσει

ένα φορητό δέκτη για ν' αποκωδικοποιήσει το τηλεοπτικό σήμα συνηθισμένης ευκρίνειας ή έναν μεγαλύτερο, σταθερό δέκτη για ν' αποκωδικοποιήσει το σήμα της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV) από το ίδιο κανάλι μετάδοσης.

Το πρότυπο MPEG-2 χρησιμοποιεί μια δομή παρεμφερή μ' αυτή του ιεραρχικού μοντέλου JPEG. Η ιεραρχία αποτελείται από την κλιμάκωση (scaling) των συμπιεσμένων, κινούμενων εικόνων. Δηλαδή, το video κωδικοποιείται με διαβαθμίσεις ποιότητας. Η αλλαγή των διαστάσεων των εικόνων μπορεί να επιδρά σε διαφορετικές παραμέτρους.

Αρχικά, υπήρχαν σχέδια για να καθοριστεί ένα πρότυπο MPEG-3 που να πλησιάζει την ψηφιακή τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας HDTV. Παρ' όλα αυτά, κατά την διάρκεια ανάπτυξης του προτύπου MPEG-2, διαπιστώθηκε ότι η μεγέθυνση κλίμακας μπορούσε να καλύψει σε επαρκή βαθμό τις απαιτήσεις της HDTV. Κατά συνέπεια, μεταγενέστερες προσπάθειες για την καθιέρωση του προτύπου MPEG-3 απορρίφθηκαν.

Τέλος, το πρόβλημα της συμπίεσης του απαιτούμενου φάσματος συχνοτήτων, επιλύεται με την καθιέρωση του συστήματος MPEG-2, το οποίο σήμερα είναι διεθνές πρότυπο. Όλες οι προσπάθειες καθιέρωσης συστημάτων ψηφιακής τηλεόρασης σε παγκόσμια κλίμακα στηρίζονται στο σύστημα MPEG-2. Το σύστημα είναι πολύπλοκο και περίτεχνο, στο οποίο αξιοποιήθηκαν αποτελέσματα ερευνών τα οποία υπήρχαν, διαφέρει δε σημαντικά από τα συστήματα της αναλογικής τηλεόρασης.

1.3.5 Το πρότυπο MPEG-4

Όπως αναφέρθηκε, τα πρότυπα MPEG-1 και MPEG-2 έχουν ευρέως υιοθετηθεί σε εμπορικές εφαρμογές ψηφιακών επικοινωνιών όπως στην ψηφιακή μετάδοση ήχου, στην ψηφιακή τηλεόραση, στο CD-interactive και στις προσπάθειες για video on-demand. Μετά τα πρότυπα αυτά, ο διεθνής οργανισμός προτυποποίησης ISO προχωράει στον ορισμό του προτύπου MPEG-4. Αρχικά το MPEG-4 αναφερόταν μόνο σε κωδικοποίηση χαμηλού ρυθμού μετάδοσης. Αν και στους μελλοντικούς στόχους του συμπεριλαμβάνονται τόσο οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης όσο και η μεγάλη συμπίεση, το MPEG-4 έρχεται να καλύψει τις νέες απαιτήσεις σε περιβάλλοντα πολυμέσων όπου οπτικοακουστική πληροφορία ανταλλάσσεται σε ψηφιακή μορφή. Το πρότυπο MPEG-4 αφορά τους τρόπους που το οπτικοακουστικό υλικό παράγεται, διανέμεται και καταναλώνεται. Και στα τρία αυτά στάδια υπεισέρχονται συνεχείς βελτιώσεις όσον αφορά στο χρησιμοποιούμενο υλικό (hardware) και λογισμικό (software). Στην παραγωγή οπτικοακουστικής πληροφορίας έχουμε σημαντικές εξελίξεις: ενώ στο παρελθόν ο μόνος τρόπος να παραχθεί τέτοια πληροφορία ήταν με τη χρήση κάμερας και μικροφώνου, σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της παράγεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Ενώ παλιότερα η παραγόμενη οπτική πληροφορία χρησιμοποιούταν σε περιορισμένα πεδία εφαρμογών (π.χ. ταινίες ή επιστημονικά θέματα), σήμερα χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές.

Το MPEG-4 αποτελεί το νέο πρότυπο περιγραφής και κωδικοποίησης εφαρμογών πολυμέσων προσφέροντας πολλές νέες δυνατότητες. Αναμένεται να είναι το μελλοντικό πρότυπο εφαρμογών πολυμέσων. Για να είναι δυνατή όμως η χρησιμοποίηση και η εκμετάλλευση αυτών των δυνατοτήτων απαιτούνται εξωτερικοί αλγόριθμοι, που δεν περιλαμβάνονται στο πρότυπο. Για παράδειγμα, ενώ το πρότυπο υποστηρίζει την κωδικοποίηση διαφορετικών αντικειμένων, η εξαγωγή των αντικειμένων αυτών δεν αποτελεί μέρος του προτύπου. Ο στόχος του είναι η επίτευξη ρυθμών δεδομένων της τάξης των 5 με 64 Kbit/s για κινητές εφαρμογές και μέχρι 4 Mbit/s για τηλεοπτικές εφαρμογές. Η φιλοσοφία του βασίζεται στην ιδέα του τεμαχισμού της οπτικοακουστικής πληροφορίας σε οπτικοακουστικά αντικείμενα (AVOs – Audio Visual Objects) τα οποία μπορούν να πολυπλεχθούν και να μεταδοθούν πάνω από ετερογενή δίκτυα. Παρέχει ένα σύνολο δυνατοτήτων που το κάνει πολύ ελκυστικό για χρήση σε εφαρμογές πολυμέσων.

Μία ακόμη σχετική απαίτηση σήμερα είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της οπτικοακουστικής πληροφορίας. Ο ψηφιακός τρόπος αποθήκευσης και μεταφοράς της πληροφορίας δίνει τη δυνατότητα αντιγραφής ή μετάδοσης χωρίς να υπάρχουν απώλειες των αντιγράφων σε σχέση με το πρωτότυπο. Ουσιαστικά, όπως είναι

φανερό, η ανάγκη για ένα πρότυπο όπως το MPEG-4 σχετίζεται με αυτό που αναφέρθηκε ως σύγκλιση των μοντέλων υπηρεσιών: των επικοινωνιών, των υπολογιστών και της μαζικής μετάδοσης και τηλεόρασης. Ο καθένας όμως από αυτούς τους τομείς προτείνει εμπορικές-τεχνολογικές λύσεις με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται ταυτόχρονα πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις στα ίδια προβλήματα, γεγονός που περιπλέκει τη συνύπαρξη και συνεργασία των παρεχόμενων υπηρεσιών. Με σκοπό να ελεγχθεί και να βοηθηθεί αυτή η αναπτυξιακή τάση, το MPEG-4 καλείται να υποστηρίξει όλα αυτά τα διαφορετικά μοντέλα καθώς και να επιτρέψει την πραγματοποίηση μελλοντικών υβριδικών μοντέλων.

Στα πρότυπα MPEG-1 και MPEG-2 επικρατεί μία frame-based λογική που υπαγορεύει ότι η κωδικοποίηση γίνεται με βάση τα οπτικά καρέ (frames) συνοδευόμενα από τον αντίστοιχο ήχο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε frame αντιμετωπίζεται ως ολότητα χωρίς να ενδιαφέρει το επιμέρους περιεχόμενό του, δηλαδή τα οπτικά και ακουστικά αντικείμενα, οι οπτικές και ακουστικές οντότητες.

1.4 Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης

1.4.1 Εισαγωγή

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 την 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 κάνει 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 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 συνδυασμού αυτών.**

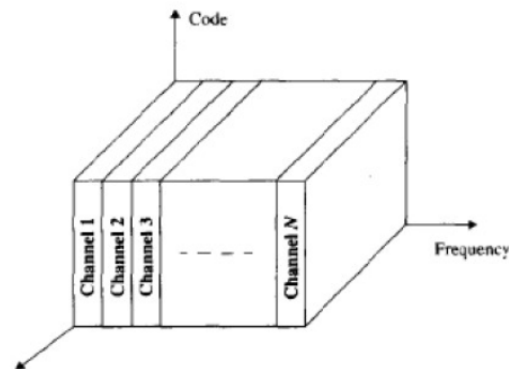
Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιούνται από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών ανά τον κόσμο.

| 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 1.2 Χρησιμοποιούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, από διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών παγκοσμίως

1.4.2 FDMA

Στην **πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA)**, εκχωρείται μία μοναδική συχνότητα ή ραδιοδίαυλος σε κάθε χρήστη που θέλει να εξυπηρετηθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9.



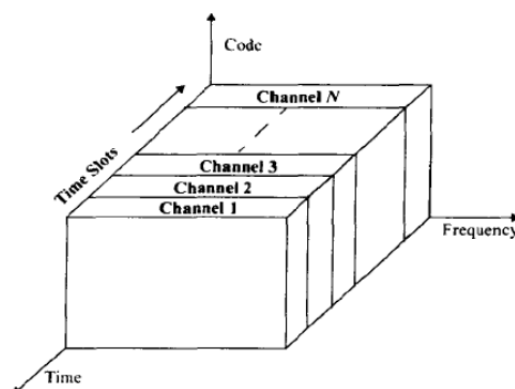
Σχήμα 1.9 FDMA

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, μία 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 επαναχρησιμοποίηση 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 CDMA με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος, εφαρμόζοντας επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

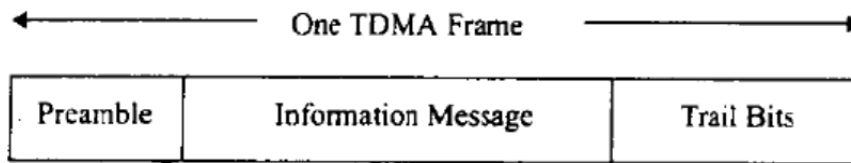
1.4.3 TDMA

Στα συστήματα που χρησιμοποιούν **πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA)**, το διατιθέμενο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές, και σε κάθε χρονοσχισμή επιτρέπεται μόνον σε ένα χρήστη να εκπέμψει ή να λάβει. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10, κάθε χρήστης καταλαμβάνει μία κυκλικά επαναλαμβανόμενη χρονοσχισμή, οπότε, μια χρονοσχισμή που επαναλαμβάνεται σε κάθε πλαίσιο, μπορεί να θεωρηθεί ως δίαυλος.



Σχήμα 1.10 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 1.11. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από το **προοίμιο** (preamble), το **μήνυμα πληροφορίας** (information message) και τον **επίλογο** (trail bits).

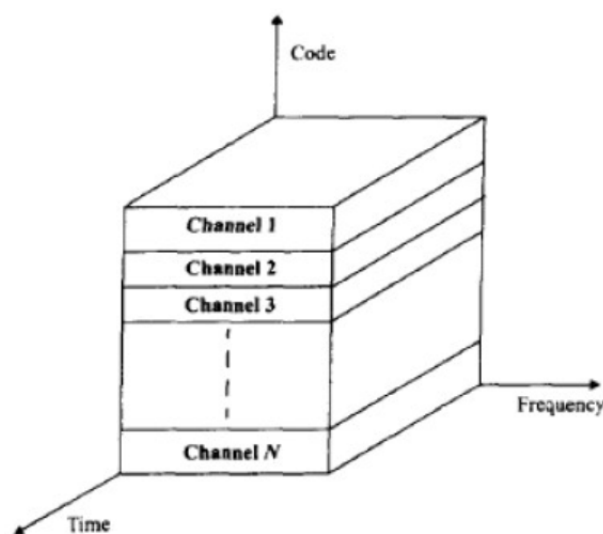


Σχήμα 1.11 Δομή πλαισίου TDMA

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 περίοδοι 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 κυμαινόμενο σύμφωνα με την αίτησή τους.

1.4.4 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 1.12. 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 ακολουθία ψευδοθορύβου, η οποία έχει ρυθμό chip (chip rate) μεγαλύτερο από τον ρυθμό bit (bit rate) 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 επανασυμπίεση του εύρους ζώνης και τη λήψη των αρχικών δεδομένων.



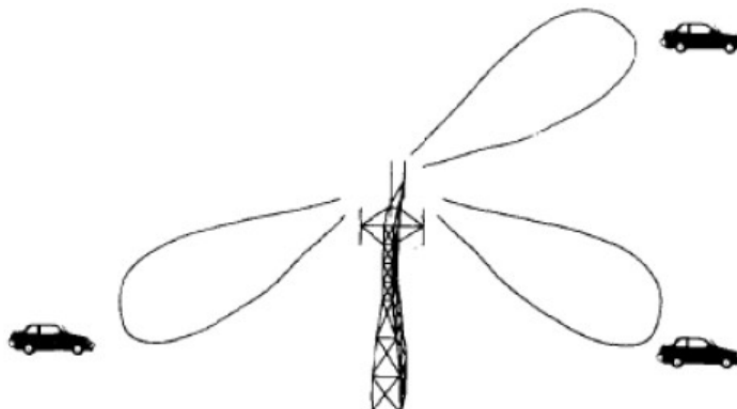
Σχήμα 1.12 CDMA

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 κωδικές είναι ορθογώνιες. Εάν υπάρχουν αρκετοί δέκτες στον σταθμό βάσης, είναι δυνατό να έχουμε πολλαπλές επιτυχίες

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**.

1.4.5 SDMA

Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (**SDMA**) ελέγχει την ακτινοβολούμενη ενέργεια από κάθε χρήστη στο χώρο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.13, 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 ραδιοδιάυλο**.

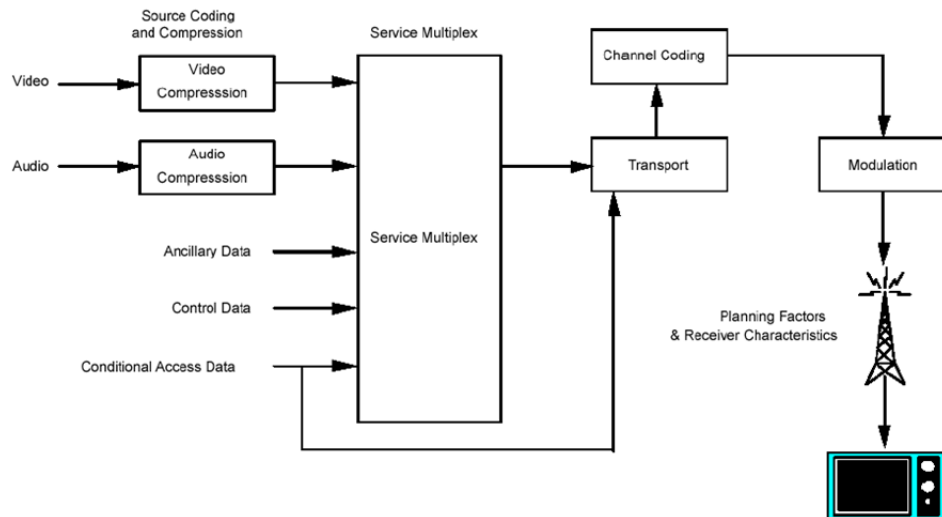


Σχήμα 1.13 SDMA

1.5 Το πρότυπο DVB-T

1.5.1 Μοντέλο ευρύ-εκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης

Το μοντέλο που ακολουθεί αντιπροσωπεύει το επίγειο ψηφιακό μοντέλο ασύρματης ευρύ-εκπομπής, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ITU-R.



Σχήμα 1.14 Επίγειο ψηφιακό μοντέλο ασύρματης ευρύ-εκπομπής

Το μοντέλο αυτό έχει τρία υποσυστήματα. Το πρώτο είναι η **κωδικοποίηση και συμπίεση πηγής**, το δεύτερο η **πολυπλεξία δεδομένων** και το τρίτο και τελευταίο η **RF μετάδοση του σήματος**.

Η κωδικοποίηση και συμπίεση πηγής αρχικά ψηφιοποιεί τα αναλογικά σήματα video και ήχου και στη συνέχεια μειώνει στο ελάχιστο δυνατό τον αριθμό των δυαδικών ψηφίων (bits) που απαιτούνται για την ανάκτηση των τηλεοπτικών και ηχητικών δεδομένων, διατηρώντας όμως το επίπεδο της ποιότητας υψηλό. Το ψηφιακό τηλεοπτικό μοντέλο της ITU-R χρησιμοποιεί το παγκόσμιο αποδεκτό πρότυπο MPEG-2 για την εκτέλεση των διαδικασιών κωδικοποίησης και συμπίεσης.

Στη συνέχεια η διαδικασία της πολυπλεξίας παράγει ένα συρμό μεταφοράς (transport stream), ο οποίος φέρει τα ηχητικά, τηλεοπτικά και συμπληρωματικά δεδομένα. Και γι' αυτή την διαδικασία της πολυπλεξίας χρησιμοποιείται το πρότυπο MPEG-2.

Λίγο πριν την ασύρματη μετάδοση των ψηφιακών δεδομένων, περνάμε από το στάδιο της κωδικοποίησης καναλιού στο στάδιο της διαμόρφωσης των σημάτων. Στο στάδιο της κωδικοποίησης καναλιού και της διαμόρφωσης εφαρμόζονται τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων, μέσω των οποίων προσθέτουμε στο συρμό μεταφοράς επιπρόσθετες πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον δέκτη για να αναδημιουργήσουν τα στοιχεία του λαμβανόμενου σήματος, το οποίο έχει πιθανόν υποστεί αλλοιώσεις, εξαιτίας της εξασθένισης από τη μετάδοση και του θορύβου που παρεμβάλλεται. Τέλος το ψηφιακό σήμα είναι έτοιμο προς ασύρματη μετάδοση.

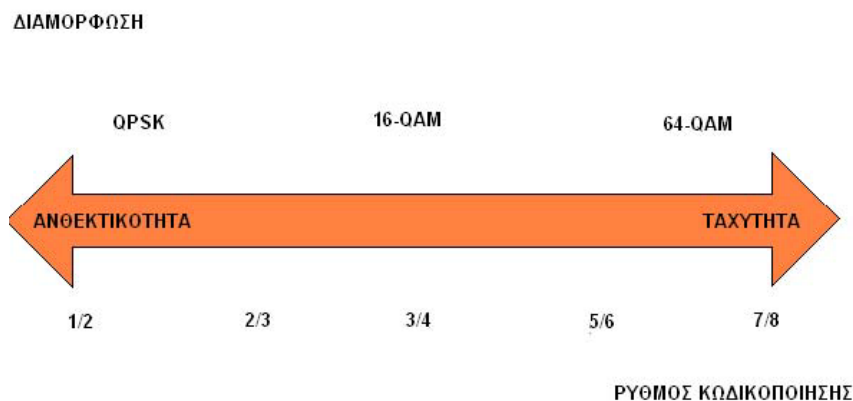
1.5.2 Γενικά χαρακτηριστικά του Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T)

Το **DVB-Terrestrial** είναι το επίγειο σύστημα ασύρματης ευρυεκπομπής για τη UHF και VHF περιοχή συχνοτήτων, το οποίο εκδόθηκε από τον ETSI και δημοσιεύτηκε στην αναφορά ETSI/EBU 300 744. Αποτελεί το πιο πολύπλοκο αλλά και το πιο ευέλικτο πρότυπο επίγειας ασύρματης ευρύ-εκπομπής ψηφιακών προγραμμάτων που είναι διαθέσιμο σε παγκόσμιο επίπεδο σήμερα. Επιπλέον προσφέρει την ταχύτερη μετάδοση δεδομένων για κινητή λήψη σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο ασύρματο δίκτυο. Το DVB-T σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέψει τη βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων και έχει τέτοια δομή που είναι σε θέση να μεταδίδει πλήθος ψηφιακών τηλεοπτικών προγραμμάτων σε εύρος ζώνης που μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιείτο μόνο από μια αναλογική υπηρεσία. Ήδη χρησιμοποιείται από τις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, ενώ τα πλεονεκτήματά του δεν άργησαν να γίνουν αντιληπτά από άλλους οργανισμούς εκτός Ευρώπης που προχώρησαν στην υιοθέτηση του εν λόγω προτύπου.

Το DVB-T σχεδιάστηκε ώστε οι ψηφιακές υπηρεσίες του να λειτουργήσουν σε **UHF (470-862 MHz)** και **VHF (174-230 MHz)**. Πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχει ισχυρή προστασία έναντι των αναλογικών υπηρεσιών που συνυπάρχουν σε αυτές τις συχνότητες. Γι' αυτό τα δεδομένα προς μετάδοση υπόκεινται σε ισχυρή διόρθωση σφαλμάτων που πραγματοποιείται σε στάδια για υψηλότερη αποδοτικότητα. Αυτό γίνεται στο στάδιο της κωδικοποίησης καναλιού.

Ακόμα το DVB-T χρησιμοποιεί το πρότυπο MPEG-2 για κωδικοποίηση και συμπίεση πηγής. Η διαμόρφωση που γίνεται στο συγκεκριμένο πρότυπο είναι πολλαπλών φερόντων στο σχήμα της πολυπλεξίας με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας **COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)**. Το σχήμα αυτό χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό φερόντων (6817 φέροντα στον 8k τρόπο) καθένα από τα οποία διαμορφώνεται σύμφωνα με τις τεχνικές **QPSK, 16-QAM** ή **64-QAM**. Το σχήμα COFDM επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση μιας συχνότητας από γειτονικούς μεταδότες. Επίσης η μεταδιδόμενη πληροφορία κατανέμεται ομοιόμορφα στο διαθέσιμο φάσμα, οπότε το σήμα έχει μεγάλη ανοχή στον θόρυβο καθώς και σε φαινόμενα πολυδιαδρομικών μεταδόσεων.

Οι ρυθμοί μετάδοσης που ικανοποιούνται με αυτό το πρότυπο **μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο της διαμόρφωσης (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), τις τιμές του συστήματος φρούρησης (guard interval) και του ρυθμού κωδικοποίησης (code rate)**. Ο σχεδιασμός των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τις ανάγκες και τις δυνατότητες κάθε παρόχου. Το σχήμα 1.15 δείχνει το trade-off μεταξύ ταχύτητας και ανθεκτικότητας του σήματος.



Σχήμα 1.15 Trade-off μεταξύ ανθεκτικότητας και ταχύτητα

1.5.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα του DVB-T

Τα πλεονεκτήματα της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης είναι πολλά και ποικίλουν ανάμεσα σε τεχνικά πλεονεκτήματα και σε πλεονεκτήματα που γίνονται φανερά στον δέκτη/καταναλωτή με την αναβάθμιση των υπηρεσιών που του προσφέρονται.

Το **βασικό πλεονέκτημα** της ψηφιακής τηλεόρασης είναι η **εξοικονόμηση φάσματος η οποία επιτυγχάνεται καθώς τέσσερα συμβατικά κανάλια (αναλογικής μέχρι τώρα τηλεόρασης) χωρούν σε ένα κανάλι των 8 MHz**. Το φάσμα είναι ένα πολύτιμο αγαθό για τις σύγχρονες κοινωνίες και η ψηφιακή τηλεόραση το εκμεταλλεύεται με τον καλύτερο τρόπο καθώς λόγω της μικρής εκπεμπόμενης ισχύος που χρειάζεται μπορούμε να έχουμε επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σε μικρότερες αποστάσεις σε σχέση με την προηγούμενη τεχνολογία της αναλογικής τηλεόρασης.

Ακόμα η μετάβαση στην ψηφιακή εποχή μπορεί να γίνει ομαλά καθώς το πρότυπο DVB-T αξιοποιεί τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις τόσο στην εκπομπή, όπου χρησιμοποιεί τους ίδιους επίγειους σταθμούς με την αναλογική τηλεόραση όσο και στην λήψη, όπου η ίδια κεραία λαμβάνει και τα ψηφιακά τηλεοπτικά προγράμματα. Αυτό σημαίνει ελάχιστο κόστος εφαρμογής της νέας τεχνολογίας. Επιπρόσθετα, τα ψηφιακά τηλεοπτικά προγράμματα μπορούν να ληφθούν και από φορητές και κινητές συσκευές.

Εκτός όμως από τα παραπάνω πολύ σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση εισάγει **περισσότερες υπηρεσίες στον δέκτη με την εμπλουτισμένη ευρυεκπομπή, την διαδραστική ευρυεκπομπή και την πρόσβαση στο διαδίκτυο.**

Με τον όρο εμπλουτισμένη ευρυεκπομπή εννοούμε την ψηφιακή ευρυεκπομπή τηλεοπτικών και ηχητικών σημάτων μαζί με εφαρμογές που έχουν εγκατασταθεί στο τερματικό του χρήστη και εξασφαλίζουν τοπική διαδραστικότητα. Υλοποίηση της τεχνικής αυτής παρατηρεί κανείς στην τηλεοπτική βιντεογραφία (teletext) και στους ηλεκτρονικούς οδηγούς προγράμματος (electronic program guide). Η τηλεοπτική βιντεογραφία είναι ουσιαστικά ένα σύστημα μετάδοσης πληροφοριών (μετεωρολογικές προβλέψεις, δρομολόγια μέσω συνκοινωνίας, προγράμματα τηλεοπτικών σταθμών, σύντομες ειδήσεις κ.α) μέσω των τηλεοπτικών σημάτων στους δέκτες. Η υπηρεσία αυτή υπήρχε και στην αναλογική τηλεόραση αρκεί να υπήρχε ένας αποκωδικοποιητής στην τηλεόραση του δέκτη ο οποίος θα αποκωδικοποιούσε τις πληροφορίες αυτές από το σήμα που λάμβανε ο δέκτης. Όμως η ψηφιακή μορφή αυτής της υπηρεσίας υπερτερεί καθώς υποστηρίζει πλήθος γραφικών, συνδέσμους προς άλλες σελίδες, δυνατότητα υποστήριξης μεγαλύτερης ποσότητας πληροφορίας, 256 χρώματα αντί για 8, ποικιλία γραμματοσειρών και γραμμάτων, φωτογραφίες και πιο γρήγορη προσπέλαση σελίδων.

Ο ηλεκτρονικός οδηγός προγράμματος προσφέρει στους χρήστες πληροφορίες σχετικά με τα προγράμματα που μεταδίδονται από το εκάστοτε κανάλι. Συγκεκριμένα παρουσιάζει τα τηλεοπτικά προγράμματα που πρόκειται να προβληθούν και λεπτομέρειες που τα αφορούν, όπως ημερομηνία και ώρα προβολής και θέμα που διαπραγματεύονται. Επίσης ενημερώνει τον χρήστη για την έναρξη προγραμμάτων που έχει επιλέξει ή ακόμα ενεργοποιεί έναν εγγραφέα για την εγγραφή των προγραμμάτων, παρέχει πληροφορίες σχετικά με ταινίες που πρόκειται να προβληθούν.

Οι υπηρεσίες όμως της επίγεια ψηφιακής τηλεόρασης δεν περιορίζονται εδώ καθώς προσφέρουν στον χρήστη δυνατότητα διαφορετικού υποτιτλισμού και μεταγλώττισης των προγραμμάτων που παρακολουθεί. Ακόμα προσφέρει ειδικές υπηρεσίες διευκόλυνσης για άτομα με ειδικές ανάγκες (AMEA). Επίσης εισάγεται για πρώτη φορά η έννοια της **διαδραστικής τηλεόρασης όπου ο χρήστης μετατρέπεται σε ενεργητικό δέκτη μέσω ενός καναλιού επιστροφής όπου έχουμε μεταφορά δεδομένων από τον χρήστη στο φορέα ευρυεκπομπής.** Τέλος προσφέρεται η δυνατότητα παροχής **τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV)** με την μέγιστη δυνατή ποιότητα παρακολούθησης τηλεοπτικών προγραμμάτων.

Από ανθρωπιστικής απόψεως, αναφέρουμε ότι όπως η χρήση κάθε αγαθού (είτε αυτών που μας προσφέρονται καθημερινά από τον Θεό, είτε αυτόν που έπειτα από δικές μας ενέργειες κατασκευάσαμε <πάλι με την συνέργεια του Θεού>), θα πρέπει να γίνεται με μέτρο. Ο εθισμός στην παρακολούθηση μπορεί να γίνει εύκολα έπειτα από μία κουραστική μέρα στην δουλειά, ενώ αν επιλέγαμε να διαβάζαμε ένα βιβλίο μάλλον θα επιλέγαμε μία ορθότερη επιλογή. **Για τον λόγο αυτό, καλό θα ήταν να προγραμματίζουμε τον χρόνο που θα χρησιμοποιούμε την τηλεόραση ως μέσο ψυχαγωγίας. Τέλος, έχει παρατηρηθεί το γεγονός ότι τρώμε περισσότερο όταν είμαστε μπροστά στην τηλεόραση και για τον λόγο αυτό καλό θα ήταν να αποφεύγεται.**

1.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά (ETSI προδιαγραφές)

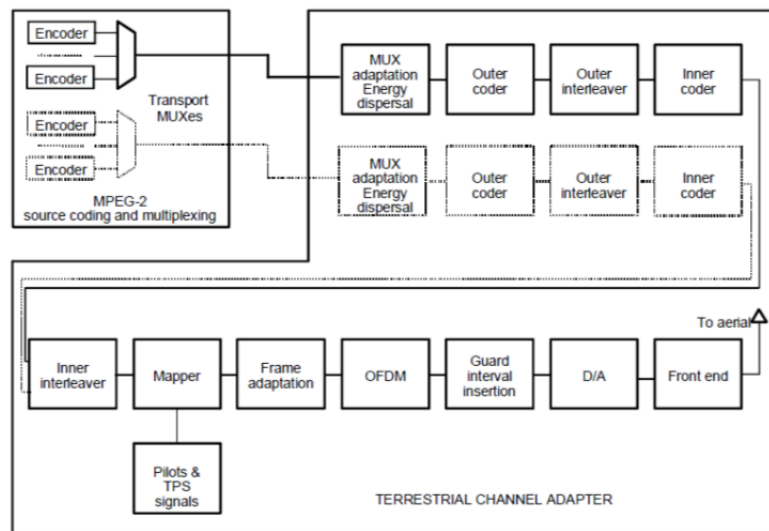
1.6.1 Σύστημα μετάδοσης

Το σύστημα μετάδοσης ορίζεται ως η διαδικασία που προσαρμόζει το σήμα βασικής ζώνης, που προέρχεται από την έξοδο του MPEG-2 πολυπλέκτη, στα χαρακτηριστικά του επίγειου καναλιού. Στο ρεύμα δεδομένων εφαρμόζονται οι παρακάτω διαδικασίες:

- **Αναδιάταξη των bit του ψηφιακού ρεύματος και τυχαιοποίηση για διασπορά ενέργειας** (Transport multiplex adaption and randomization for energy dispersal)
- **Εξωτερική κωδικοποίηση** (Αλγόριθμος Reed-Solomon, outer coding)

- Εξωτερική αναδιάταξη των bytes για προστασία από ριπές λανθασμένων bytes (convolutional interleaving)
- Εσωτερική κωδικοποίηση (συνελικτική) (inner coding)
- Εσωτερική αναδιάταξη των bytes
- Διαμόρφωση βασικής ζώνης (baseband shaping for modulation)
- Διαμόρφωση OFDM και μετάδοση (OFDM modulation)

Στο σχήμα 1.16, οι μονάδες που σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές αφορούν την επιλογή της ιεραρχικής διαμόρφωσης (hierarchical modulation). Στην περίπτωση της ιεραρχικής διαμόρφωσης, το σήμα βασικής ζώνης προϋπάρχει διαιρεμένο σε δύο συρμούς μεταφοράς: α) **ένα συρμό υψηλής προτεραιότητας** (high priority TS) και β) **ένα χαμηλής** (low priority TS). Το διάγραμμα του συστήματος φαίνεται κάτωθι:



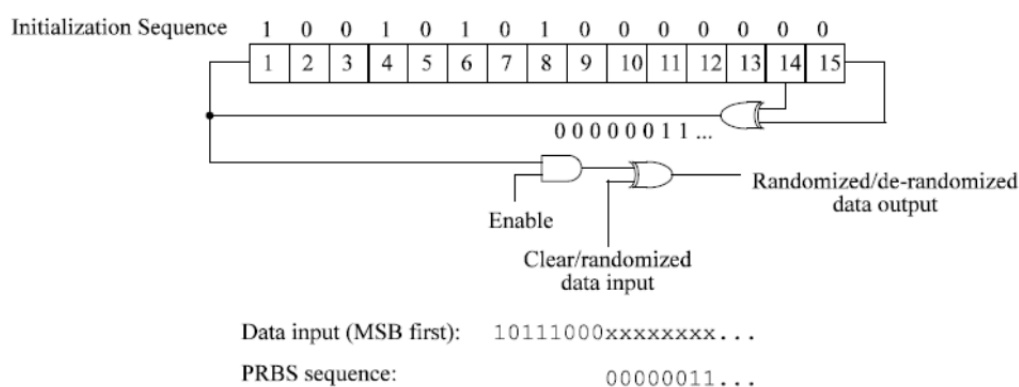
Σχήμα 1.16 Μπλοκ διάγραμμα ενός διαμορφωτή DVB-T

Το σύστημα αυτό είναι σχεδιασμένο για υπηρεσίες επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης στις ζώνες συχνοτήτων VHF/UHF, όπου λειτουργούν παράλληλα τα αναλογικά τηλεοπτικά κανάλια. Για το λόγο αυτό, η μορφή του σήματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να προσφέρει επαρκή προστασία απέναντι σε υψηλά επίπεδα ομοδιαυλικής παρεμβολής και παρεμβολής γειτονικού διαύλου καθώς και στην εξασθένιση και τις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών. Πρέπει, επίσης να χειρίζεται αποδοτικά το φάσμα συχνοτήτων στις ζώνες συχνοτήτων VHF/UHF. **Η μορφή του σήματος που εκπληρώνει αυτά τα κριτήρια είναι η ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM).** Το σύστημα OFDM χρησιμοποιεί πολλαπλά φέροντα για τη μετάδοση, έτσι ώστε να αποκτήσει αντοχή απέναντι στις απώλειες πολλαπλών διαδρομών. Οι απώλειες αυτές συμβαίνουν όταν το σήμα από τον πομπό φτάνει στο δέκτη από πολλαπλά μονοπάτια. Τα μονοπάτια αυτά οφείλονται σε ανακλάσεις του σήματος σε βουνά, κτήρια κ.α. με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στο δέκτη σε διαφορετικούς χρόνους. **Χρησιμοποιώντας πολλαπλά φέροντα, ο ρυθμός συμβόλων ανά φέρον είναι μικρός ή ισοδύναμα η διάρκεια κάθε συμβόλου είναι μεγάλη.** Αυξάνοντας τον αριθμό των φερόντων, η καθυστέρηση λόγω πολλαπλών διαδρομών είναι μικρή σε σύγκριση με τη διάρκεια κάθε συμβόλου. Η μείωση της απόδοσης λόγω διασυμβολικής παρεμβολής μπορεί με τον τρόπο αυτό, να περιοριστεί πάρα πολύ. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιεί 1705 ή 6817 φέροντα και αντίστοιχα ονομάζονται 2k OFDM και 8k OFDM.

Η απόδοση σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών μπορεί να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο εισάγοντας τα διαστήματα προστασίας που είναι διαστήματα σιωπής μετά την εκπομπή κάθε συμβόλου για χρόνο ίσο με το $1/4$, $1/8$, $1/16$ ή $1/32$ του χρόνου ενός συμβόλου. Στο 8k OFDM το διάστημα προστασίας έχει τιμή από 28 ms έως 224 ms, ενώ στο 2K OFDM από 7 ms έως 56 ms.

1.6.2 Αναδιάταξη των bit του ψηφιακού ρεύματος και τυχαιοποίηση για διασπορά ενέργειας

Το βήμα αυτό, παρόλο που δεν αποτελεί μέρος της διαδικασίας διόρθωσης σφαλμάτων, απαιτείται να πραγματοποιηθεί από το πρότυπο DVB-T πριν τη διαδικασία διόρθωσης, για να επιτευχθεί μια ομοιόμορφα κατανομημένη ενέργεια μέσα στο κανάλι. Το ρεύμα εξόδου του MPEG-2 πολυπλέκτη οργανώνεται σε πακέτα σταθερού μήκους των 188 bytes. Το πρώτο byte είναι το byte συγχρονισμού και έχει τιμή 47_{HEX}. Για να διασφαλιστεί ότι θα υπάρχουν αρκετές μεταβάσεις από το 0 στο 1 και αντίστροφα, το ρεύμα δεδομένων περνά από μια γεννήτρια δυαδικής ψευδοτυχαίας ακολουθίας, της οποίας το πολυώνυμο είναι το: $1+X^{14}+X^{15}$. Κάθε 8 πακέτα των 188 bytes, φορτώνεται στον καταχωρητή της γεννήτριας η τιμή 100101010000000 και για να μπορέσει η αντίστοιχη γεννήτρια στο δέκτη να συγχρονιστεί, το πρώτο byte συγχρονισμού σε μια ομάδα 8 πακέτων αντιστρέφεται από 47_{HEX} σε B8_{HEX} και περνά όπως είναι από τη γεννήτρια. Έτσι, η περίοδος της ακολουθίας είναι 1503 bytes. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.17.

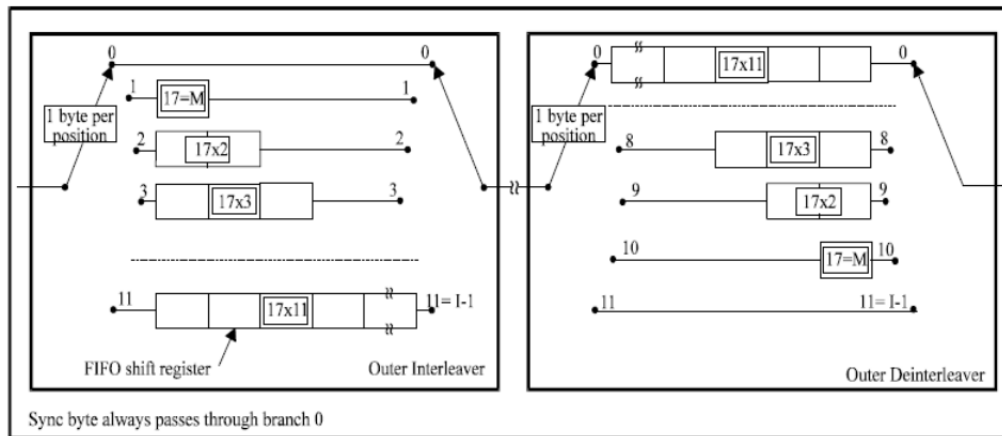


Σχήμα 1.17 Διάγραμμα γεννήτριας ψευδοτυχαίας ακολουθίας

Η διαδικασία αυτή είναι ενεργή ακόμα και όταν δεν υπάρχει ρεύμα εισόδου, έτσι ώστε να αποφεύγεται η εκπομπή αδιαμόρφωτου σήματος.

1.6.3 Εξωτερική κωδικοποίηση (Αλγόριθμους Reed-Solomon)

Σε κάθε πακέτο των 188 bytes εφαρμόζεται ο κώδικας διόρθωσης λαθών **Reed-Solomon** (204,188,t=8) και παράγεται ένα πακέτο των 204 bytes προστατευμένο από λάθη. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια αναδιάταξη των bytes για προστασία από ριπές λαθών. Αν έχουμε μια ριπή λανθασμένων bytes, είναι πιθανό τα bytes αυτά να είναι περισσότερα από όσα μπορεί να διορθώσει ο κώδικας διόρθωσης λαθών Reed-Solomon (204,188,t=8). Αν, όμως πραγματοποιηθεί μια αναδιάταξη των bytes (interleaving), έτσι ώστε γειτονικά bytes κατά τη μετάδοση να ανήκουν σε διαφορετικά πακέτα, τότε τα λανθασμένα bytes θα κατανομηθούν και θα είναι πιο εύκολη η διόρθωση τους. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τον παρακάτω τρόπο: **12 κλάδοι συνδέονται κυκλικά στο ρεύμα εισόδου με ένα μεταγωγέα**. Κάθε κλάδος είναι ένας καταχωρητής ολίσθησης FIFO (First In, First Out) με βάθος $17*j$ κύτταρα όπου j ο αριθμός του κλάδου. Κάθε κύτταρο περιέχει ένα byte και οι μεταγωγείς εισόδου και εξόδου είναι συγχρονισμένοι. Για λόγους συγχρονισμού, τα bytes συγχρονισμού οδηγούνται πάντα στον κλάδο 0. Η διαδικασία αυτή, καθώς και η αντίστροφη της στο δέκτη φαίνεται στο σχήμα 1.18.



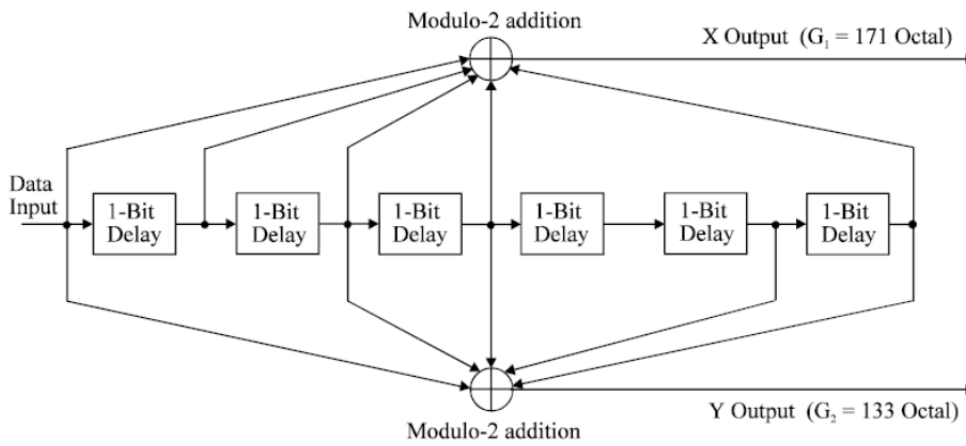
Σχήμα 1.18 Διάγραμμα διαδικασίας αναδιάταξης bytes

1.6.4 Συνελικτική και εσωτερική κωδικοποίηση

Τη διαδικασία της εξωτερικής κωδικοποίησης ακολουθεί η τεχνική της συνελικτικής κωδικοποίησης, σκοπός της οποίας είναι η αύξηση της απόδοσης της κωδικοποίησης **Reed-Solomon**. Η αιτία η οποία απαιτείται αποδοτικότερη προστασία έναντι των σφαλμάτων είναι ότι στα κανάλια μετάδοσης η ποιότητα των σημάτων μεταβάλλεται και είναι δυνατόν ένας μεγάλος αριθμός από δυαδικά ψηφία, ο οποίος υπερβαίνει τη δυνατότητα διόρθωσης της κωδικοποίησης RS, να υποστεί αλλοίωση (από πιθανό χτύπημα κεραυνού ή από παρεμβολές ηλεκτρικών συσκευών). Η προστασία κάθε πακέτου μετάδοσης από τέτοιου είδους αλλοιώσεις δεν είναι ιδιαίτερα οικονομική, εφόσον αυτή δε συμβαίνει αρκετά συχνά. Σε αυτήν την περίπτωση, εφαρμόζεται συνελικτική κωδικοποίηση, σύμφωνα με την οποία τα δεδομένα, αφού κωδικοποιηθούν με την Εμπρόσθια Διόρθωση Σφαλμάτων, τροφοδοτούνται σε μια μνήμη RAM και μεταδίδονται αναδιατεταγμένα. Με τη χρήση μιας δεύτερης RAM κατά τη λήψη, τα δεδομένα τοποθετούνται στην αρχική τους δομή. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας της κωδικοποίησης είναι ότι το συσσωμάτωμα των δυαδικών ψηφίων που έχουν υποστεί σφάλμα μετατρέπεται σε ένα μεγάλο αριθμό ενιαίων εσφαλμένων συμβόλων, τα οποία είναι εύκολα διορθώσιμα. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του. Στο ρεύμα δεδομένων εφαρμόζεται ένας συνελικτικός κώδικας που βασίζεται σε ρυθμό $1/2$ και μήκος 7. Ο συνελικτικός κώδικας παράγει, ανάλογα με το ρυθμό του, περισσότερα bit από τα αρχικά, αλλά δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης τόσων bit όση η παράμετρος d . Το σύστημα επιτρέπει και συνελικτικούς κώδικες με ρυθμούς $1/2, 2/3, 3/4, 5/6, \text{ και } 7/8$. Οι παρακάτω συνελικτικοί κώδικες και η ακολουθία που εκπέμπεται κάθε φορά παρουσιάζετε στον πίνακα 1.3.

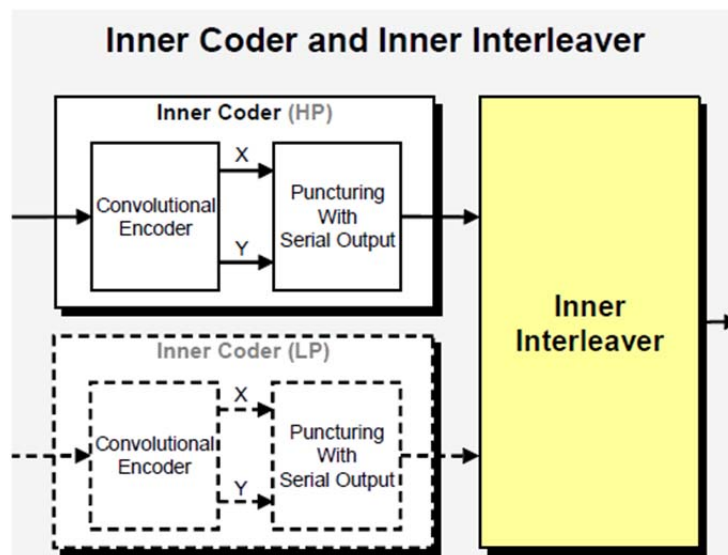
| Ρυθμός κώδικα r | Puncturing pattern | Μεταδιδόμενη ακολουθία |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1/2 | X: 1 Y: 1 | X_1Y_1 |
| 2/3 | X: 1 0 Y: 1 1 | $X_1Y_1Y_2$ |
| 3/4 | X: 1 0 1 Y: 1 1 0 | $X_1Y_1Y_2X_3$ |
| 5/6 | X: 1 0 1 0 1 Y: 1 1 0 1 0 | $X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5$ |
| 7/8 | X: 1 0 0 0 1 0 1 Y: 1 1 1 1 0 1 0 | $X_1Y_1Y_2X_3Y_4X_5Y_6X_7$ |

Πίνακας 1.3 Συνελικτικοί κώδικες και μεταδιδόμενη πληροφορία



Σχήμα 1.19 Συνελικτικοί κωδικοποίηση για ρυθμό κώδικα 1/2

Η εσωτερική κωδικοποίηση ακολουθεί τη συνελικτική διεμπλοκή και την συμπληρώνει αποδοτικά, καθώς διορθώνει άλλου είδους σφάλματα. Ο ισχυρός πλεονασμός που εισάγεται από αυτή (100%, καθώς ο συνελικτικός κωδικοποιητής παράγει δύο ροές εξόδου, κάθε μία με τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης, όπως η ροή εισόδου) επιτρέπει μια πολύ ισχυρή διόρθωση λαθών. Αυτό μπορεί να είναι αναγκαίο για σήματα με πολύ χαμηλό σηματοθορυβικό λόγο (SNR, Signal-to-Noise Ratio) στην είσοδο του δέκτη, αλλά έχει ως αποτέλεσμα τον υποδιπλασιασμό της φασματικής απόδοσης του καναλιού. Ωστόσο, αυτού του τύπου η συνελικτική κωδικοποίηση επιτρέπει ο πλεονασμός που εισάγεται να μειωθεί διαμέσου της διάτρησης (puncturing) της εξόδου του συνελικτικού κωδικοποιητή. Αυτός καθιστά δυνατή τη μη λήψη όλων των διαδοχικών bits των ακολουθιών εξόδου, αλλά μόνο ένα από τα δύο ταυτόχρονα bits με ένα συγκεκριμένο λόγο διάτρησης (puncturing ratio). Η εσωτερική κωδικοποίηση των bytes χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά, έχουμε αναδιάταξη bit και στη συνέχεια αναδιάταξη συμβόλου. Η διαδικασία της συνελικτικής κωδικοποίησης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.20.



Σχήμα 1.20 Διαδικασία της συνελικτικής κωδικοποίησης

Στην αναδιάταξη bit, η είσοδος αποπολυπλέκεται σε v υπορεύματα, όπου $v=2$ για QPSK, $v=4$ για 16-QAM και $v=6$ για 64-QAM. Μετά από μια διαδικασία, κάθε σύμβολο στην έξοδο του bit interleaving αποτελείται από v bits, ένα bit από κάθε υπορεύμα. Στην αναδιάταξη συμβόλου, σκοπός είναι να αντιστοιχήσουμε τις λέξεις των v bits στα 1512 (2k OFDM) ή 6048 (8k OFDM) ενεργά φέροντα κάθε συμβόλου OFDM.

1.7 Εκπομπή και λήψη ψηφιακού σήματος

1.7.1 Εισαγωγή

Η αναλογική μετάδοση σήματος video, αποτελεί μια ώριμη πλέον τεχνολογία, μετά από εξήντα και πλέον χρόνια από την πρώτη εκπομπή ασπρόμαυρης τηλεόρασης. Πολλά εμπορικά συστήματα στηρίζονται ακόμη και σήμερα στις ίδιες βασικές αρχές για την επίτευξη ασύρματης μετάδοσης σήματος video, μεταξύ κάποιου πομπού και κάποιου δέκτη. Η κυριότερη όμως τάση που επικρατεί σήμερα αλλά θα επικρατήσει και στο μέλλον είναι η μετάδοση ψηφιακού σήματος video. Το σήμα αυτό πρέπει να υποστεί κάποιας μορφής συμπίεση πριν τη μετάδοση του, αλλιώς ο ρυθμός δεδομένων του είναι υπερβολικά μεγάλος για μετάδοσή του μέσα από τους τηλεπικοινωνιακούς διαύλους που υπάρχουν στην πράξη. Η εξάλειψη των λαθών που συμβαίνουν στο σήμα αυτό όταν μεταδίδεται μέσα από ασύρματα κανάλια είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής και έχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον.

1.7.2 Single Frequency Networks (SFNs)

Η παραδοσιακή αναλογική τηλεοπτική εκπομπή χαρακτηρίζεται από ευαισθησία, εξαιτίας της πολυκατευθυντικής διάδοσης (multi - propagation) των κυμάτων. Για το λόγο αυτό, οι μεταδότες που καλύπτουν γειτονικές περιοχές, λειτουργούν σε διαφορετικά RF κανάλια και η ίδια συχνότητα χρησιμοποιείται κατά τακτά διαστήματα. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται Multi - Frequency Networks (MFNs). Τα MFNs έχουν κάποιες αδυναμίες όσο αφορά την ποιότητα ήχου και εικόνας αλλά και τη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Η όλη λογική σχεδιασμού του COFDM, βασίστηκε στην αποφυγή παρεμβολών από ανακλάσεις. Στην πραγματικότητα το COFDM, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί υπέρ του όσες ανακλάσεις αυξάνουν την ένταση του σήματος (τις θετικές δηλαδή) και να απορρίπτει τις αρνητικές. Αν και ο βασικός σχεδιασμός έγινε για αποφυγή των παρεμβολών, η τεχνολογία αυτή άνοιξε ένα νέο δρόμο στο Broadcast. Ακριβώς λόγω του COFDM τρόπου διαμόρφωσης, ο παροχέας (broadcaster) έχει την δυνατότητα να εκπέμπει από διαφορετικούς πομπούς ταυτόχρονα, στο ίδιο κανάλι. Το COFDM απλά θα απορρίψει οτιδήποτε αρνητικό και θα κρατήσει μόνο τις θετικές συνιστώσες. Παρόλα αυτά οι περιορισμοί των αναλογικών συστημάτων και οι πρόσφατες εξελίξεις των ψηφιακών επικοινωνιών οδήγησαν στη δημιουργία μιας σειράς ψηφιακών προτύπων εκπομπής. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των προτύπων αυτών (DVB-H, T-DMB, ISDB-T και MediaFLO) είναι η ιδέα των Single Frequency Networks (SFNs). Στα δίκτυα αυτά οι συγχρονισμένοι μεταδότες εκπέμπουν πληροφορίες ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας την ίδια συχνότητα. Στα SFNs τα κανάλια πρέπει να είναι απολύτως συγχρονισμένα ως προς τη μετάδοση. Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές, κάθε σταθμός χρησιμοποιεί ένα Global Positioning System (GPS) ή ένα σήμα από το δίκτυο που αποτελεί το ρολόι αναφοράς. Η υλοποίηση των SFNs μπορεί να βελτιώσει τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, που αποτελεί παράγοντα επιτυχίας για τους network operators και τις κυβερνήσεις. Αντίθετα με τα MFNs, το δίκτυο μεταδοτών εκπέμπει ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας κοινή συχνότητα. **Στα SFNs, ο δέκτης δέχεται το επιθυμητό σήμα από το σύνολο των σημάτων που λαμβάνονται από τους μεταδότες.** Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη κάλυψη και εξοικονόμηση συχνοτήτων, σε αντίθεση με τα αναλογικά δίκτυα εκπομπής. Η υλοποίηση των SFN δικτύων συνδέεται με την Ορθογώνια Πολύπλεξη Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) μέθοδο πολύπλεξης που χρησιμοποιείται. Στα OFDM συστήματα η καθυστέρηση διάδοσης ελέγχεται, χρησιμοποιώντας μακρύτερα μεταδιδόμενα σύμβολα καθώς και εισάγοντας guard intervals ανάμεσα σε συνεχόμενα σύμβολα. Επομένως, ο δέκτης μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλαπλά αντίγραφα του σήματος. Αν η καθυστέρηση διάδοσης είναι μικρότερη από το guard interval, δεν παρατηρούνται παρεμβολές. Το OFDM σχήμα διαμόρφωσης αντιμετωπίζει τα φαινόμενα αυτά. Η επιλογή της περιόδου φύλαξης έχει και μία άλλη βασική επίδραση γιατί καθορίζει και τον αριθμό των φερόντων σημάτων που πρέπει να έχει το σύστημα. Τούτο γιατί σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των φερόντων σημάτων, που δίδεται από τη παρακάτω σχέση. Αν δεχθούμε ότι διαθέτουμε κανάλι για την τηλεόραση των 8 MHz, τότε ο αριθμός των φερόντων σημάτων θα είναι 6000.

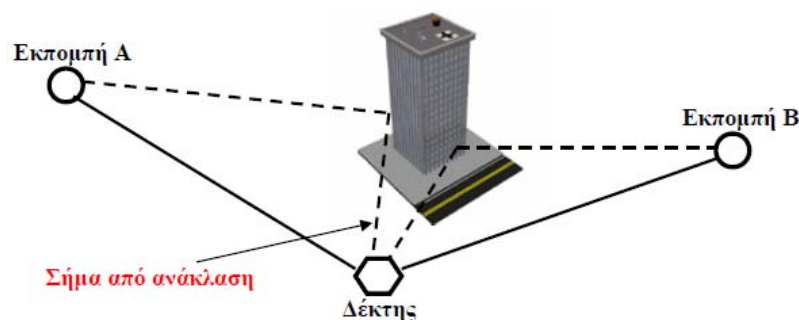
Εκτός από το συγκεκριμένο πλεονέκτημα, δημιουργείται κι ένα κέρδος (gain), που κυριαρχεί σαν χαρακτηριστικό σε όλο το δίκτυο. Αποτέλεσμα αυτού του κέρδους, είναι ότι το κόστος εγκατάστασης του δικτύου, είναι χαμηλότερο, εφόσον απαιτείται λιγότερη ισχύ εκπομπής. Από την άλλη μεριά, υπάρχει κι ένα μειονέκτημα: αν είναι δυνατός, ο διαχωρισμός του δικτύου, που σημαίνει ότι στη περίπτωση τοπικής μετάδοσης, θα απαιτηθεί η κατασκευή δικτύου broadcast.

Τα κύρια πλεονεκτήματα από την υλοποίηση των SFNs (σε σχέση με τα MFNs) είναι:

- **Εξοικονόμηση φάσματος σε αντίθεση με την προσέγγιση των MFNs.** Η διαχείριση του φάσματος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα όπου ένα μεγάλο πλήθος προσφερόμενων προγραμμάτων θα καθιστούν ελκυστικές τις υπηρεσίες εκπομπής.
- **Στα SFNs το λαμβανόμενο σήμα αποτελεί σύνθεση των εισερχομένων σημάτων που μεταδίδονται από αρκετούς μεταδότες.** Κάποιοι μεταδότες μπορεί να προσφέρουν ασθενές σήμα, ενώ κάποιοι άλλοι ισχυρό. Ως αποτέλεσμα οι πιθανότητες επαρκούς λήψης αυξάνονται. Επομένως υπάρχει δικτυακό κέρδος, το οποίο μεταφράζεται σε χαμηλότερη ισχύ και μεγαλύτερη ομοιογένεια της περιοχής που καλύπτεται από το SFN δίκτυο.
- **Τα SFNs επιτρέπουν την εύκολη εγκατάσταση gap - filling μεταδοτών, όπου υπάρχει προβληματική λήψη, χωρίς τη δέσμευση επιπλέον συχνοτήτων.**

Ως μειονεκτήματα των SFNs, αναφέρονται τα εξής:

- **Μειωμένο bit rate λόγω μεγάλων guard intervals**
- **Αυξημένη πολυπλοκότητα στη σχεδίαση των μεταδοτών**
- **Πολυπλοκότητα στο δικτυακό σχεδιασμό.**

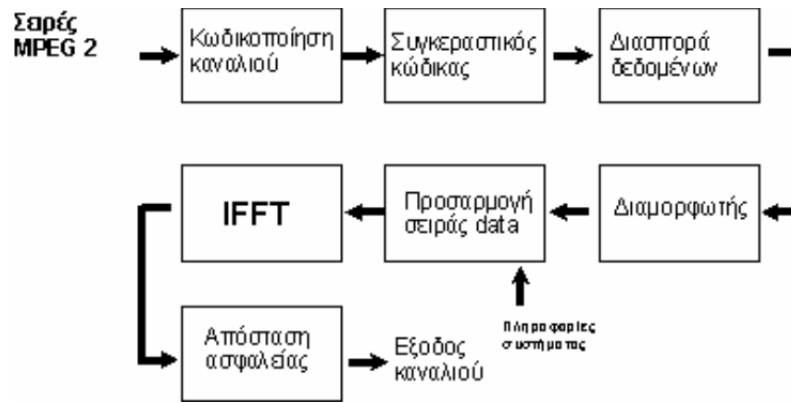


Σχήμα 1.21 Τοπολογία SFN δικτύων

Οι χρυσοί κανόνες του SFN είναι ότι κάθε πομπός πρέπει να εκπέμπει: α) στην ίδια συχνότητα β) την ίδια χρονική στιγμή και γ) τα ίδια data bits.

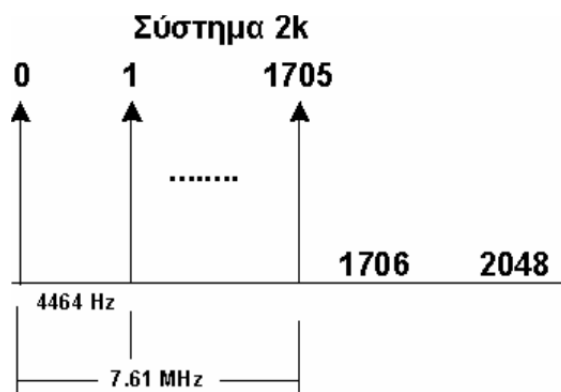
1.7.3 Η αρχή λειτουργίας της μετάδοσης COFDM

Ο βασικός σκοπός του συστήματος, 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 την ίδια χρονική στιγμή με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρούνται ορθογώνιες μεταξύ τους, κάτι που επιτυγχάνεται, όσο δεν συμβαίνει παρεμβολή μεταξύ τους (Intersymbol Interference). Δυστυχώς, αυτό δεν είναι συνήθως εφικτό σε μια επίγεια εκπομπή, γι' αυτό εφαρμόζεται και μια πρόσθετη λειτουργία, αυτή της «απόστασης ασφαλείας» μεταξύ των φερουσών.



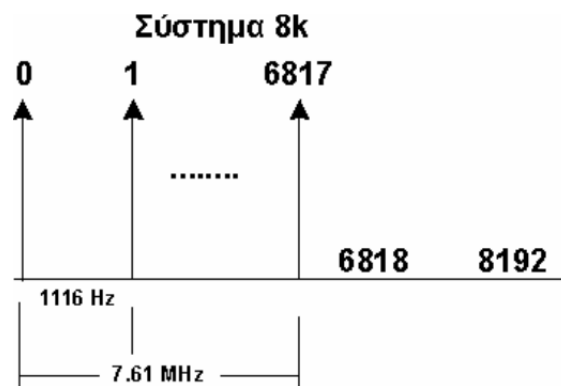
Σχήμα 1.22 Μετάδοση COFDM

Μπορούμε πλέον να αναφέρουμε την **χρήση του αντίστροφου γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) κατά την εκπομπή**, η οποία είναι και η αιτία της επιτυχημένης υλοποίησης του συστήματος στη πράξη. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια σειρά από σύμβολα που θέλουμε να μεταδώσουμε. Αυτά τα σύμβολα, αντιμετωπίζονται σαν «σημεία» στο πεδίο της συχνότητας ενός σήματος και ομαδοποιούνται σε N ομάδες N συμβόλων, όπου η κάθε ομάδα, αποκαλείται «υπερσύμβολο», οπότε πλέον μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος IFFT. Ο αριθμός των φερουσών που πρόκειται να μεταδοθούν, αντιστοιχούν 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.



Σχήμα 1.23 Σύστημα 2k

Στο πρότυπο του συστήματος, υπάρχουν δύο τρόποι μετάδοσης 2k και 8k. Στη πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιείται FFT 2048 σημείων, ενώ στην δεύτερη, χρησιμοποιείται FFT 8192 σημείων.



Σχήμα 1.24

Έτσι κι αλλιώς, η χρήσιμη πληροφορία που εκπέμπεται το δευτερόλεπτο, είναι η ίδια και στα δύο συστήματα, απλώς στο 2k, επιβάλλεται περισσότερος διαχωρισμός μεταξύ των φερουσών, που ελαττώνει τις παρεμβολές μεταξύ

τους, ενώ στα 8k, εμπλέκεται μεγαλύτερος αριθμός φερουσών, με αποτέλεσμα, η υλοποίηση εξισορρόπησης να είναι πιο εύκολη.

Οι φέρουσες συχνότητες που χρησιμοποιούνται στη διαμόρφωση COFDM μπορούν να μεταφέρουν:

- **Δεδομένα (Data) με ένα μεταβλητό αριθμό από bits ανά φέρουσα** (πχ 2,4,6)
- **Σήματα TPS (Transmission Parameter Signalling) για τη μεταφορά των παραμέτρων μετάδοσης.**
- **Πιλοτικά σήματα (Pilot) για το συγχρονισμό.** Αυτά μπορεί να είναι συνεχή ή σκορπισμένα. Τα συνεχή εκπέμπονται πάντα με τις ίδιες φέρουσες συχνότητες, 177 (στη μορφή 8k) ή 45 (στη μορφή 2k), ενώ τα σκορπισμένα με διαφορετικές, 524 (στη μορφή 8k) ή 131 (στη μορφή 2k)

1.7.4 Μειονεκτήματα του OFDM

Όπως είδαμε, το OFDM έχει μερικά αξιόλογα χαρακτηριστικά. Ωστόσο, όπως και όλα τα συστήματα διαμόρφωσης, έτσι και αυτό πάσχει από ορισμένα μειονεκτήματα. Το OFDM έχει δύο βασικές αδυναμίες σχετιζόμενη με τα συστήματα μίας φέρουσας: α) **ευαισθησία σε σφάλματα φέρουσας συχνότητας (που οφείλεται είτε στον τοπικό ταλαντωτή είτε στην ολίσθηση Doppler)** β) **ένα ευρύ σήμα όπου η κορυφή διαιρείται με την μέση τετραγωνική ρίζα (RMS) της κυματομορφής (PAPR).** Τα συστήματα OFDM πετυχαίνουν μηδενική παρεμβολή μεταξύ του φέροντος (zero ICI) όταν κάθε υποφέρων δειγματοληπτείται ακριβώς στην κεντρική του συχνότητα. Το δειγματοληπτημένο OFDM σήμα μετατρέπεται σε μία περιοχή συχνοτήτων μέσω του FFT, που αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέσο για την υλοποίηση ενός διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT). Ο DFT αποδίδει μία διακριτή πεπερασμένη ακολουθία μιγαδικών συντελεστών που δίδονται από την σχέση:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi nk/N}, k = 0, 1, \dots, N - 1$$

Το φάσμα Fourier του σήματος X_k έχει διακριτές συχνότητες:

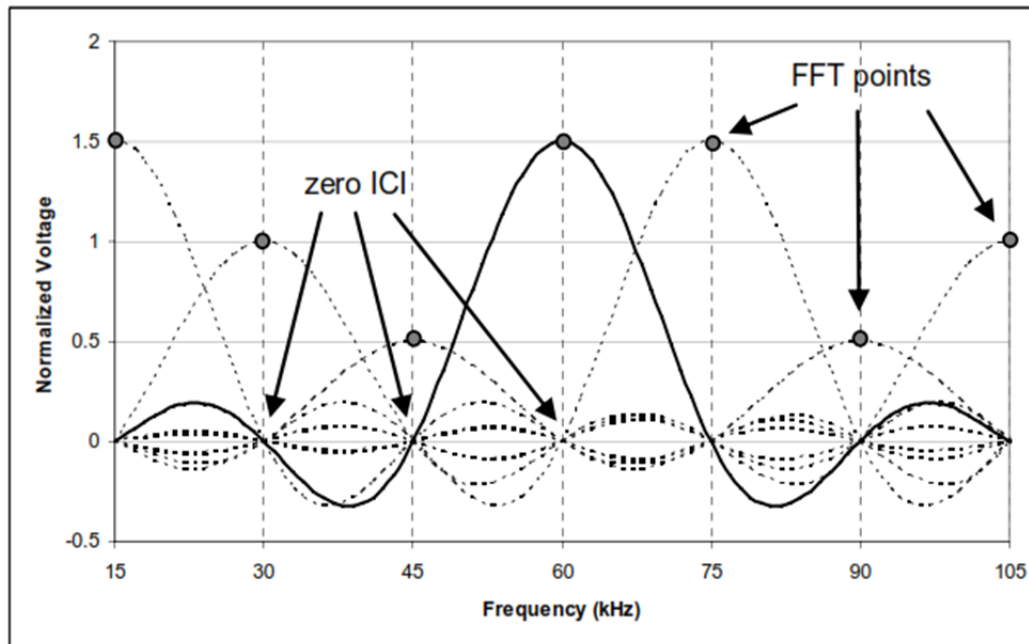
$$\frac{k}{NT_s}, k = 0, 1, \dots, N - 1$$

όπου T_s είναι η περίοδος δειγματοληψίας και N είναι το πλήθος των δειγμάτων. Έτσι οι συχνότητες καθορίζονται εξ ολοκλήρου από την συχνότητα δειγματοληψίας και από το πλήθος των δειγμάτων που λαμβάνονται σε μία FFT περίοδο. Ας εξετάσουμε ένα συγκεκριμένο παράδειγμα LTE. Το εύρος ζώνης μετάδοσης στο LTE είναι από 1,25 MHz έως 20 MHz. Για εύρος ζώνης ίσο με 1,25 MHz, 128 δείγματα λαμβάνονται σε FFT περίοδο ίση με 66,67 μsec. Ως εκ τούτου, $T_s = 0,52086$ μsec, και το λαμβανόμενο σήμα παρουσιάζετε από συχνότητες στα 15, 30, 45 KHz. Αυτές οι συχνότητες είναι ακριβώς οι κεντρικές συχνότητες του σήματος που περιέχει τις υποφέρουσες εκτός αν τα λάθη συχνοτήτων ανέκυψαν κατά την διαδικασία υποβιβασμού.

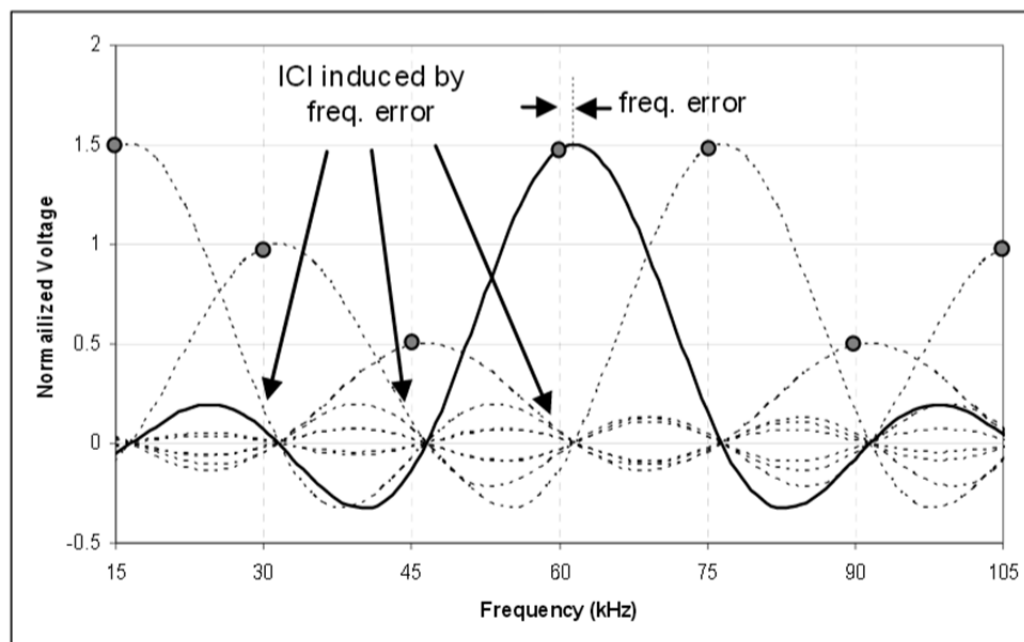
Ο FFT γίνεται σε συχνότητα βασικής ζώνης, αφού το λαμβανόμενο σήμα έχει μειωτικά μετατραπεί από την RF συχνότητα. Ο υποβιβασμός τυπικά εκτελείται μέσω άμεσης μετατροπής. Το λαμβανόμενο σήμα αναμιγνύεται με ένα που παράγεται από τοπικό ταλαντωτή του δέκτη (LO). Ιδανικά, το φέρον σήμα και ο LO δέκτης είναι στην ταυτόσημη συχνότητα. Δυστυχώς, αυτό δεν είναι πάντα η περίπτωση.

Οι τοπικοί ταλαντωτές του πομπού και του δέκτη κατά κανόνα παρασύρουν, έτσι θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα έτσι ώστε ο πομπός και ο δέκτης να παραμείνουν συγχρονισμένοι. Κάθε σταθμός βάσης στέλνει περιοδικά σήματα συγχρονισμού τα οποία χρησιμοποιούνται από την UE προς το σκοπό αυτό, μεταξύ άλλων (σήματα συγχρονισμού χρησιμοποιούνται επίσης για την αρχική απόκτηση και μεταπομπής). Ακόμα κι έτσι, άλλες πηγές όπως Doppler μετατοπίσεις και ο θόρυβος φάσης του ταλαντωτή μπορεί ακόμη να οδηγήσει σε σφάλματα συχνότητας. Μη διορθωμένα σφάλματα συχνότητας έχουν ως αποτέλεσμα την ICI, όπως φαίνεται στα σχήματα 1.25 και 1.26. Για τους λόγους, αυτούς η συχνότητα του σήματος πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς. Τυχόν αποκλίσεις πρέπει να

διορθωθούν στο επεξεργαστή βασικής ζώνης για να αποφευχθεί η υπερβολική ICI που θα μπορούσε να οδηγήσει σε χαμένα πακέτα.



Σχήμα 1.25 Σφάλματα συχνοτήτων προκαλούν παρεμβολές (α)



Σχήμα 1.26 Σφάλματα συχνοτήτων προκαλούν παρεμβολές (β)

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για την OFDM είναι μια υψηλής PAPR. Η στιγμιαία RF ισχύς που μεταδίδεται μπορεί να διαφέρει σημαντικά μέσα σε ένα ενιαίο σύμβολο OFDM. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, το σύμβολο OFDM είναι συνδυασμός όλων των υποφορέων. Οι τάσεις των υπομεταφορέων μπορεί να μεταβάλλουν την φάση σε κάποια σημεία εντός του συμβόλου, με αποτέλεσμα στιγμιαία ισχύ, υψηλότερη της μέσης.

Υψηλό PAPR οδηγεί σε δυναμικού εύρους απαιτήσεις για A/D και D/A μετατροπείς. Ακόμη πιο σημαντικό, μειώνει επίσης την αποδοτικότητα του ενισχυτή ισχύος πομπού RF (RFPA). Ενιαία συστήματα μεταφοράς μερικές φορές χρησιμοποιούν σταθερές μεθόδους διαμόρφωσης, όπως η **Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)** ή **μετατόπισης φάσης (PSK)**. Οι πληροφορίες στο σήμα ενός δικτύου με μία συχνότητα μεταφέρονται μεταβάλλοντας την στιγμιαία συχνότητα ή φάση, ενώ το πλάτος του σήματος παραμένει σταθερό. Η RFPA δεν απαιτεί υψηλό βαθμό γραμμικότητας. Στην πραγματικότητα, η PA μπορεί να οδηγηθεί τόσο δυνατά που το σήμα

ψαλιδίζεται, όπως οι διακυμάνσεις του σήματος μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τάσης. Αρμονική παραμόρφωση λόγω του ψαλιδίσματος μπορεί να εξαλειφθεί με φιλτράρισμα εξόδου. Όταν RFPAs λειτουργούν με τον τρόπο αυτό, μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 70 τοίς εκατό.

Αντιθέτως, η OFDM δεν είναι ένα σταθερό σχήμα διαμόρφωσης. Μέσα σε κάθε σύμβολο, το πλάτος και η φάση του κάθε υπομεταφορέα είναι σταθερή. Κατά τη διάρκεια ενός OFDM συμβόλου, μπορεί να υπάρχουν πολλές μεγάλες κορυφές. Ο RFPA πρέπει να είναι ικανή να χειρίζεται διακυμάνσεις τάσεως αιχμής χωρίς ψαλιδισμό, απαιτώντας έτσι ένα μεγαλύτερο ενισχυτή για να χειριστεί μία δεδομένη μέση ισχύ. Ως εκ τούτου η απόδοση είναι χαμηλότερη. Οι RFPAs αποδόσεις για τα σήματα OFDM μπορεί να είναι μικρότερη από 20%. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τη μείωση των αιχμών τάσης, τα αποτελέσματα PAPR για OFDM στις αποδόσεις RFPAs είναι γενικά χαμηλότερες σε σχέση με τα συστήματα που λειτουργούν σε μία συχνότητα.

1.7.5 Η ανάγκη κωδικοποίησης καναλιού

Παραπάνω, αναφέραμε ότι στην επίγεια μετάδοση, είναι πολύ συχνό το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών του σήματος. Συνεπώς, υπάρχει η περίπτωση τα σήματα από δύο διαφορετικές διαδρομές, να «συμπέσουν», οπότε θα έχουμε ενίσχυση, ή να φτάσουν σε τέτοιες χρονικές στιγμές που να έχουμε ακυρώσεις. Το γεγονός αυτό, μπορεί να συμβαίνει σε διάφορες συχνότητες μέσα στο εύρος ζώνης του σήματος εκπομπής και τα πράγματα γίνονται χειρότερα, όταν παρατηρείται ισχυρός θόρυβος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται καταγισμοί λαθών κατά τη αποδιαμόρφωση.

Σ' αυτό το σημείο, έρχεται το COFDM, να συμπληρώσει το OFDM, με μια έξτρα κωδικοποίηση καναλιού, που περιλαμβάνει δύο βασικές διεργασίες: **έναν συγκεραστικό κώδικα και ένα «ανακάτεμα» των δεδομένων**. Ο **συγκεραστικός κώδικας**, προσφέρει στο σύστημα, **έναν πλεονασμό δεδομένων**, που θα χρησιμοποιηθεί για την **διόρθωση σφαλμάτων**. Ωστόσο, **εάν εμφανιστούν συνεχείς σειρές λαθών, δεν θα είναι δυνατή η διόρθωσή τους**, γι' αυτό πραγματοποιείται κι ένα **«ανακάτεμα» των δεδομένων, ώστε οι παρακείμενες φέρουσες, να μη διαμορφώνονται από διαδοχικά δεδομένα**. Σε περίπτωση απώλειας πληροφορίας από διαδοχικές φέρουσες, το λάθος απομονώνεται και κατά την επαναφορά των δεδομένων στη κανονική τους σειρά, έχουμε λιγότερο πρόβλημα. Από αυτά τα χαρακτηριστικά, προστέθηκε η λέξη "Coded", στην ονομασία της διαμόρφωσης OFDM.

1.7.6 Εύρος ζώνης

Η απόσταση των διαδοχικών φερουσών 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.

1.7.7 Απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για ψηφιακό video

Προκειμένου να επεξεργαστούμε και να εκπέμψουμε πληροφορία video χρησιμοποιώντας ψηφιακές τεχνικές, είναι απαραίτητη η μετατροπή του αναλογικού σήματος video σε ψηφιακό. Αναλογικά σήματα τηλεόρασης και video δειγματοληπτούνται και μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή. Η επιλογή του ρυθμού δειγματοληψίας και της ανάλυσης έχει σημαντική επίδραση στη ποιότητα του ψηφιακού σήματος video. Το πρότυπο CCIR 601 παρέχει μια πρότυπη μέθοδο για την κωδικοποίηση της τηλεοπτικής πληροφορίας σε ψηφιακή μορφή. Τα σήματα φωτεινότητας και χρωματικότητας δειγματοληπτούνται με ακρίβεια 8 bits. Ο ρυθμός δειγματοληψίας επιλέγεται έτσι ώστε να δίνει αποδεκτή ποιότητα συγκρινόμενη με αυτή του αρχικού αναλογικού τηλεοπτικού σήματος. Το σήμα φωτεινότητας ενός πλαισίου NTSC δειγματοληπτείται για να παράγει μια εικόνα 525 γραμμών, η κάθε μια από τις οποίες

περιλαμβάνει 858 δείγματα. Η ενεργός περιοχή του ψηφιοποιημένου πλαισίου είναι 720×486 εικονοστοιχεία (pixels). Το σήμα φωτεινότητας ενός πλαισίου PAL ή SECAM δειγματοληπτείται για να δώσει μια εικόνα 625×486 δειγμάτων και η ενεργός περιοχή σ' αυτήν την περίπτωση είναι 720×576 εικονοστοιχεία. Τα σήματα χρωματικότητας δειγματοληπτούνται σε μικρότερο ρυθμό: η κάθετη ανάλυση είναι η ίδια, αλλά η οριζόντια είναι η μισή. Αυτό σημαίνει ότι μόνο τα περιττά αριθμημένα εικονοστοιχεία σε κάθε γραμμή περιέχουν πληροφορία χρωματικότητας. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (bit rate) όπως προκύπτει από τις παραπάνω παραδοχές είναι περίπου 216 Mbps και υπολογίζεται ως εξής: για το πρότυπο NTSC έχουμε 30 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο, 858×525 δείγματα φωτεινότητας (ανά πλαίσιο), 429×525×2 δείγματα χρωματικότητας, 8 bits ανά δείγμα, οπότε προκύπτει:

$$\text{Bit rate} = 30 \times 8 \times ((858 \times 525) + (429 \times 525 \times 2)) = \mathbf{216,216 \text{ Mbps}}$$

Αντίστοιχα, για τα πρότυπα PAL ή SECAM έχουμε 25 πλαίσια ανά δευτερόλεπτο, 864×625 δείγματα φωτεινότητας, 432×625×2 δείγματα χρωματικότητας, 8 bits ανά δείγμα, οπότε:

$$\text{Bit rate} = 25 \times 8 \times ((864 \times 625) + (432 \times 625 \times 2)) = \mathbf{216,0 \text{ Mbps}}$$

Αυτός ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να είναι διαχειρίσιμος μέσα σε ένα τηλεοπτικό στούντιο, είναι όμως υπερβολικά μεγάλος για μετάδοση από ασύρματα ή ενσύρματα, δίκτυα.

1.7.8 Ορατά λάθη

Στην ιδανική περίπτωση, σε μια αποκωδικοποιημένη αλληλουχία video, δεν πρέπει να εμφανίζεται υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας που να οφείλεται σε λάθη στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Στην πράξη, η ψηφιακή μετάδοση video μέσω ραδιοκυμάτων, επηρεάζεται από λάθη που οφείλονται στο θόρυβο και τις παρεμβολές.

Ένα λάθος σε ένα αποκωδικοποιημένο πλαίσιο θα είναι ορατό μόνο για ένα μικρό κλάσμα του δευτερολέπτου και έτσι δε θα έχει σημαντική επίδραση στο θεατή εκτός αν επηρεάζει μια πολύ μεγάλη περιοχή του πλαισίου. Ένα λάθος που επιμένει για αρκετά πλαίσια θα είναι πιο εμφανές στο θεατή και επομένως πιο ανεπιθύμητο.

Στην πράξη, μια κωδικοποιημένη αλληλουχία video είναι επιρρεπής σε τέτοια λάθη καθώς, με την εξάλειψη του χωρικού πλεονασμού, ενός μοναδικού λάθους στην ακολουθία των bits, μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση μιας μεγάλης περιοχής της αποκωδικοποιημένης εικόνας, ενώ και η ύπαρξη πλαισίων που προβλέπονται από άλλα, έχει σαν αποτέλεσμα τη διάδοση στο χρόνο ορισμένων λαθών.

1.7.9 Καθυστέρηση

Η καθυστέρηση είναι ένας σημαντικός παράγοντας σε επικοινωνιακές εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time) όπως το ψηφιακό video. Σε αμφίδρομες εφαρμογές όπως οι εφαρμογές βίντεο-διάσκεψης, ιδανικά δε θα έπρεπε να υπάρχει καθυστέρηση σε κανένα από τα δύο άκρα της σύνδεσης.

Σε μονόδρομες εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεόραση, σημαντικότερη επίδραση έχει, όχι τόσο η συνολική καθυστέρηση, όσο η μεταβλητότητά της. Τα πλαίσια μιας αλληλουχίας video, όπως και ο ήχος που τη συνοδεύει πρέπει να παρουσιάζονται στο θεατή με ένα σταθερό ρυθμό. **Είναι απαραίτητο οι μεταβολές στην καθυστέρηση να εξαλείφονται πριν την παρουσίαση των αποκωδικοποιημένων πλαισίων.**

1.7.10 Επίδραση, εκτίμηση και διόρθωση λαθών κατά τη μετάδοση

Η απώλεια δεδομένων είναι ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα για τη μετάδοση ψηφιακού σήματος video, μέσα από ασύρματα κανάλια. Θόρυβος και παρεμβολές μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα τη λανθασμένη στο δέκτη εκτίμηση της τιμής κάποιων bits, γεγονός που και πάλι αναφέρεται σαν απώλεια δεδομένων.

Σε γενικές γραμμές, ρυθμοί απώλειας bits (bit error rates – BERs) της τάξης του 10^{-5} (δηλαδή ένα λανθασμένο bit σε κάθε 10^5 bits) είναι αποδεκτοί για τηλεπικοινωνιακά συστήματα μετάδοσης δεδομένων (data). Ωστόσο, το κωδικοποιημένο σήμα video είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στις απώλειες bits, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολύ μικρότεροι ρυθμοί απώλειας δεδομένων για ικανοποιητική ποιότητα του αποκωδικοποιημένου σήματος στο δέκτη. Σαν ένα παραδεκτό όριο αναφέρεται η τιμή ρυθμού απώλειας bits 10^{-6} , αυτό όμως είναι αρκετά υποκειμενικό.

Στην πράξη, σε ασύρματα, και ιδίως σε κινητά, περιβάλλοντα ρυθμοί απώλειας bits της τάξης των $10^{-3} - 10^{-2}$, μπορούν να εμφανιστούν για αρκετά μεγάλες χρονικές περιόδους (σχεδόν εκατοντάδες milliseconds). Η απώλεια bits μπορεί ως έναν βαθμό να αντιμετωπιστεί με χρήση κωδικών διόρθωσης λάθους (Forward Error Correction – FEC), ωστόσο με αυξημένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα καναλιού. Τα λάθη συνήθως εμφανίζονται σε εκρήξεις (bursts), γεγονός που κάνει τα πράγματα ακόμα χειρότερα σε ότι αφορά την ποιότητα του αποκωδικοποιημένου σήματος video.

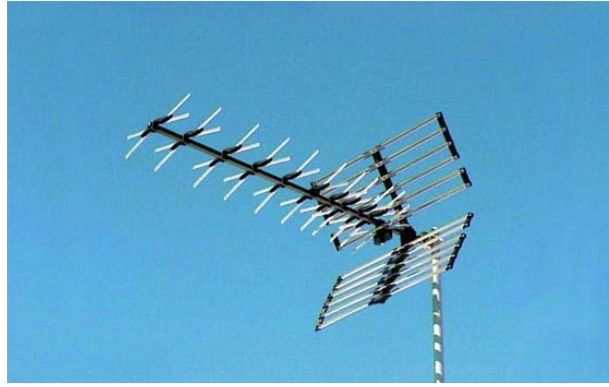
1.7.11 Επίδραση λαθών σε κανονικοποιημένο σήμα video

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ένα και μόνο λάθος σε μια κωδικοποιημένη αλληλουχία video, λόγω της εξάλειψης του πλεονασμού που λαμβάνει χώρα κατά την κωδικοποίηση, μπορεί να έχει πολύ ενοχλητική επίδραση, καθώς μπορεί να διαδίδεται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του αποκωδικοποιημένου video.

Προφανώς, η αρνητική επίδραση ενός λάθους εξαρτάται από τη θέση μέσα στο κωδικοποιημένο ρεύμα bits (bit stream) στην οποία συμβαίνει το λάθος. Για παράδειγμα, σε ένα σήμα κωδικοποιημένο κατά MPEG-2, τα λάθη που συμβαίνουν σε ένα πλαίσιο τύπου I έχουν καταστρεπτικότερη επίδραση, από λάθη σε πλαίσια τύπου P καθώς διαδίδονται περισσότερο στο χρόνο. Αντίστοιχα, λάθη σε πλαίσια τύπου P έχουν καταστρεπτικότερη επίδραση από λάθη σε πλαίσια τύπου B. Παρόμοια, ένα λάθος που επηρεάζει ένα DCT συντελεστή χαμηλών συχνοτήτων, έχει καταστρεπτικότερη επίδραση από ένα λάθος σε DCT συντελεστή υψηλών συχνοτήτων, καθώς επηρεάζει μια μεγαλύτερη περιοχή της εικόνας. Ανάλογα συμπεράσματα ισχύουν για όλες τις μορφές κωδικοποίησης που έχουν αναφερθεί.

1.7.12 Η ψηφιακή επίγεια λήψη σήματος

Η λήψη ψηφιακού σήματος DVB-T είναι δυνατή να πραγματοποιηθεί μέσου κεραίας UHF ακόμα και μικρού μεγέθους, εσωτερικού χώρου, σε ορισμένες περιπτώσεις που το εκπεμπόμενο σήμα θα είναι επαρκές. Την αποκωδικοποίηση του RF σήματος θα αναλάβει το ψηφιακό επίγειο tuner της τηλεόρασης ή ο DVB-T αποκωδικοποιητής και στην συνέχεια θα το οδηγήσει στην τηλεόραση μας για προβολή. Οπότε η μόνη αλλαγή (μάλιστα δεν είναι αλλαγή, αλλά ουσιαστικά προσθήκη) είναι ένας ψηφιακός δέκτης DVB-T, ο οποίος να περιλαμβάνει ή όχι σύστημα κωδικοποίησης. Όσον αφορά την εγκατάσταση λήψης, δεν απαιτείται καμία αλλαγή, αφού το σήμα της ψηφιακής τηλεόρασης είναι στην περιοχή συχνοτήτων που μέχρι τώρα κάνουν χρήση οι αναλογικές εκπομπές. Αν κάποιος δοκιμάσει να συντονίσει τον αναλογικό του δέκτη σε συχνότητα επίγειας ψηφιακής, απλά δεν θα δει τίποτα παρά μόνο σκέτο θόρυβο (χιόνια).



Εικόνα 1.1 Κεραία λήψης τηλεοπτικού σήματος

Η εγκατάσταση του δέκτη επίγειας ψηφιακής εκπομπής μπορεί να γίνει από τον καθένα απλά και γρήγορα. Ο τηλεθεατής θα αποσυνδέσει το καλώδιο της κεραίας του αναλογικού δέκτη από την πρίζα (στον τοίχο) και θα το συνδέσει στο ANTENNA OUT του ψηφιακού δέκτη. Στη συνέχεια, με το καλώδιο που θα βρει μέσα στη συσκευασία του δέκτη, θα συνδέσει το ANTENNA IN του ψηφιακού δέκτη με την πρίζα. Με τον τρόπο αυτό θα συνεχίζει να έχει λήψη και στον αναλογικό δέκτη.

Ψηφιακοί δέκτες υπάρχουν πλέον σε όλα τα πολυκαταστήματα, καθώς και σε όλους τους πωλητές ειδών δορυφορικής τηλεόρασης. Οι τηλεοπτικοί δέκτες που είναι νέας τεχνολογίας (μιλάμε για τις τηλεοράσεις πλάσματος και LCD) ήδη αρχίζουν και ενσωματώνουν ψηφιακά tuner (επίγειας και δορυφορικής λήψης), καθώς και συστήματα κρυπτοποίησης, ώστε να είναι έτοιμες για κάθε υπηρεσία του μέλλοντος.



Εικόνα 1.2 Ψηφιακός αποκωδικοποιητής

1.8 Το πρότυπο DVB-T2

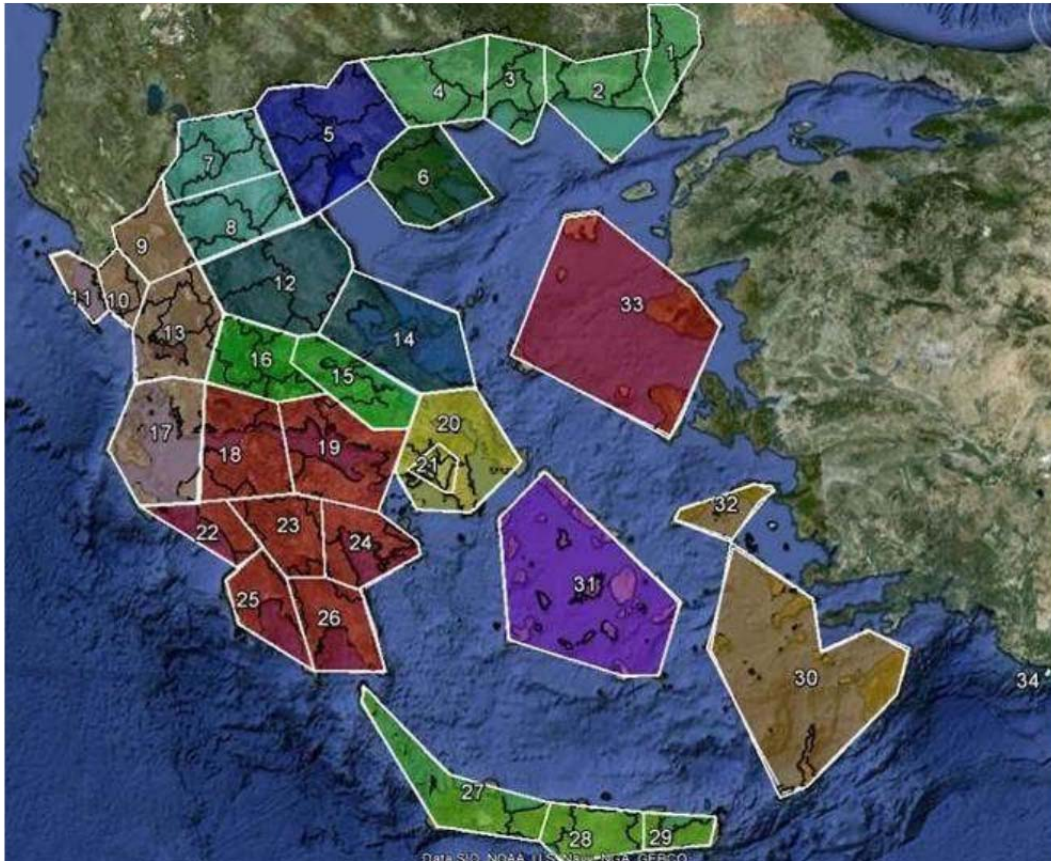
Το DVB-T2 είναι το πιο προηγμένο σύστημα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης προσφέροντας περισσότερη αντοχή, ευελιξία και 50% μεγαλύτερη απόδοση από οποιοδήποτε άλλο σύστημα DTT. Υποστηρίζει SD, HD, UHD, κινητή τηλεόραση, ραδιοφωνο ή οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών. Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζουμε τις βασικές διαφορές των συστημάτων DVB-T και DVB-T2.

| | DVB-T | DVB-T2 (νέες/ανανεωμένες επιλογές με έντονη γραφή) |
|---|---|--|
| Διόρθωση λαθών (FEC) | Συνελικτική κωδικοποίηση (Convolutional Coding) και Αλγόριθμος Reed Solomon 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 | LDPC + BCH 1/2, 3/5 , 2/3, 3/4, 4/5 , 5/6 |
| Διαμορφώσεις (Modes) | QPSK, 16QAM, 64QAM | QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM |
| Διάστημα φύλαξης (Guard Interval) | 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 | 1/4, 19/128 , 1/8, 19/256 , 1/16, 1/32, 1/128 |
| FFT size | 2k, 8k | 1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k |
| Scattered Pilots | 8% επί του συνόλου | 1%, 2%, 4%, 8% επί του συνόλου |
| Continual Pilots | 2.0 % επί του συνόλου | 0.4% - 2.4% (0.4%-0.8% in 8K-32K) |
| Εύρος ζώνης (Bandwidth) | 6, 7, 8 MHz | 1.7, 5, 6, 7, 8, 10 MHz |
| Ενδεικτικές τιμές ρυθμών μετάδοσης (Typical data rate (UK)) | 24 Mbit/s | 40Mbit/s |
| Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (για σηματοθορυβικό λόγο 20 dB) (Max. data rate) | 31.7 Mbit/s (για εύρος ζώνης 8 MHz) | 45.5 Mbit/s (για εύρος ζώνης 8 MHz) |
| Απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος (για ρυθμό μετάδοσης 24Mbit/s) (Required C/N ratio) | 16.7 dB | 10.8 dB |

Πίνακας 1.4 Εξέλιξη συστήματος DVB-T

1.9 Χάρτης συχνοτήτων UHF band

Η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή εκπομπή τηλεοπτικού σήματος είναι ένα πολύπλοκο εγχείρημα γεμάτο προκλήσεις. Αρχικά, το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων κατοχύρωσε τις συχνότητες για την Ελλάδα στην Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (I.T.U.) μέσω του πλάνου GE '06. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν έρευνες και μελέτες για τη δημιουργία ενός χάρτη σύμφωνα με τον οποίο θα χτιστεί το επίγειο ψηφιακό δίκτυο. Ο χάρτης αυτός αναφέρεται στην Κ.Υ.Α. [42800/5-10-2012](#), [Φ.Ε.Κ. 2704/Β'/5-10-2012](#) ως Χάρτης Συχνοτήτων Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Τηλεοπτικού Σήματος. Βάσει μελέτης λοιπόν, ο χάρτης συχνοτήτων χωρίζει τη χώρα σε 34 περιοχές απονομής (allotments).



Εικόνα 1.3 Περιοχές απονομής στην Ελλάδα

Σε καθεμία από τις περιοχές απονομής εγκαθίστανται τα απαραίτητα κέντρα εκπομπής (156 συνολικά στη χώρα) με σκοπό την δημιουργία ενός αποτελεσματικού δίκτυο που αξιοποιεί μία συχνότητα ανά περιοχή (Single Frequency Network – SFN). Σε κάθε SFN, τα κέντρα εκπομπής συγχρονίζονται και εκπέμπουν τηλεοπτικό πρόγραμμα στις ίδιες συχνότητες. Για παράδειγμα, στην περιοχή απονομής 3, της Θάσου, και τα τρία κέντρα εκπομπής («Θάσος», «Βασιλάκι» και «Ξάνθη») θα εκπέμπουν το τηλεοπτικό πρόγραμμα των ιδιωτικών σταθμών εθνικής εμβέλειας στη συχνότητα 32 και 37. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα της επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής, η «οικονομία» φάσματος που δημιουργείται στο δίκτυο μέσω του συγχρονισμού των κέντρων. Στον χάρτη συχνοτήτων ορίζονται, όπως προαναφέρθηκε, οι περιοχές απονομής και τα κέντρα εκπομπής που τους αντιστοιχούν. Αυτά παρουσιάζονται εκτενέστερα στον πίνακα 1.5, στην απόφαση 7480/Φ386 της Ε.Ε.Τ.Τ. αλλά και την Κ.Υ.Α. [15715/09-08-13, Φ.Ε.Κ. Β'/12-08-13](#) που καθορίζουν τις συχνότητες ανά πάροχο δικτύου και ανά δίκτυο.

| Περιοχές απονομής [allotment/SFN] | | Κέντρα εκπομπής | Eirp (dBw) | Δίαυλοι [συχνότητες] | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|-----------------|------------|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|--|
| 1 | Έβρος | Πύθιο | 35 | | | | | | | | | |
| | | Κήποι | 29 | | | | | | | | | |
| | | Πεντάλοφος | 29 | 25 | 32 | 35 | 46 | 47 | 50 | 51 | 54 | |
| | | Διδυμότειχο | 22 | | | | | | | | | |
| | | Σουφλί | 22 | | | | | | | | | |
| 2 | Πλάκα | Πλάκα | 38 | 24 | 27 | 30 | 31 | 33 | 36 | 43 | 48 | |
| 3 | Θάσος | Θάσος | 42 | | | | | | | | | |
| | | Βασιλάκι | 29 | 22 | 23 | 37 | 39 | 41 | 44 | 47 | 51 | |
| | | Ξάνθη | 22 | | | | | | | | | |
| 4 | Παγγαίο | Σέρρες | 29 | | | | | | | | | |
| | | Κορύμβος | 29 | | | | | | | | | |
| | | Λιθότοπος | 29 | 26 | 28 | 32 | 35 | 40 | 45 | 52 | 53 | |
| | | Νευροκόπι | 22 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 5 | Θεσσαλονίκη | Χορτιάτης | 44 | 24 | 27 | 30 | 36 | 43 | 48 | 55 | 56 |
| | | Φιλίππειο | 29 | | | | | | | | |
| | | Αριδαία | 22 | | | | | | | | |
| | | Μουριές | 22 | | | | | | | | |
| 6 | Χαλκιδική | Πολύγυρος | 32 | 25 | 31 | 34 | 38 | 46 | 49 | 50 | 54 |
| 7 | Φλώρινα | Κέλλη | 35 | 23 | 26 | 32 | 35 | 40 | 44 | 47 | 52 |
| | | Κλεισούρα | 32 | | | | | | | | |
| | | Άγιος Αθανάσιος | 22 | | | | | | | | |
| | | Πύλη | 22 | | | | | | | | |
| 8 | Μεταξάς | Μεταξάς | 35 | 25 | 28 | 29 | 33 | 39 | 41 | 50 | 54 |
| | | Υδατόπυργος | 29 | | | | | | | | |
| | | Τσοτύλι | 22 | | | | | | | | |
| | | Βουνάσα | 22 | | | | | | | | |
| 9 | Ιωάννινα | Λιγγιάδες | 38 | 24 | 25 | 30 | 31 | 34 | 49 | 52 | 54 |
| | | Βασιλικό | 29 | | | | | | | | |
| | | Πολύγυρος | 32 | | | | | | | | |
| | | Δελβινάκι | 22 | | | | | | | | |
| | | Κατάρρα | 22 | | | | | | | | |
| | | Ασπράγγελοι | 22 | | | | | | | | |
| | | Γρανιτσοπούλα | 22 | | | | | | | | |
| Φαρμακοβούνι | 22 | | | | | | | | | | |
| 10 | Θεσπρωτία | Ηγουμενίτσα | 22 | 21 | 22 | 26 | 33 | 41 | 45 | 48 | 59 |
| | Ψάκα | 22 | | | | | | | | | |
| 11 | Κέρκυρα | Παντοκράτορας | 38 | 29 | 30 | 34 | 37 | 42 | 53 | 54 | 56 |
| | Παλαιοκαστρίτσα | 22 | | | | | | | | | |
| | Ρόδα | 22 | | | | | | | | | |
| 12 | Λάρισα | Δοβρούτσι | 38 | 22 | 35 | 38 | 40 | 42 | 45 | 52 | |
| | Ελασσόνα | 22 | | | | | | | | | |
| | Καλαμπάκα | 22 | | | | | | | | | |
| 13 | Ακαρνανικά | Ακαρνανικά | 44 | 23 | 27 | 28 | 32 | 39 | 43 | 46 | 51 |
| | | Καναλάκι | 22 | | | | | | | | |
| | | Κορφοβούνι | 29 | | | | | | | | |
| | | Λάκκα Σούλι | 22 | | | | | | | | |
| | | Αμφιλοχία | 22 | | | | | | | | |
| 14 | Βόλος | Πήλιο | 42 | 21 | 26 | 29 | 37 | 41 | 44 | 47 | |
| | | Σωρός | 32 | | | | | | | | |
| | | Σκιάθος | 22 | | | | | | | | |
| | | Σκόπελος | 22 | | | | | | | | |
| | | Σκύρος | 22 | | | | | | | | |
| 15 | Λαμία | Χλώμο | 38 | 25 | 33 | 35 | 39 | 42 | 46 | 53 | |
| | | Λιχάδα | 35 | | | | | | | | |
| | | Δαμάστα | 29 | | | | | | | | |
| | | Αταλάντη | 22 | | | | | | | | |
| 16 | Καρπενήσι | Κρίκελο | 29 | 24 | 26 | 29 | 30 | 36 | 37 | 47 | |
| | | Φραγκίστα | 22 | | | | | | | | |
| | | Δομνίστα | 22 | | | | | | | | |
| | | Ποταμιά | 22 | | | | | | | | |
| 17 | Αίνος | Αίνος | 40 | 21 | 22 | 33 | 36 | 45 | 57 | 59 | 60 |
| | Ιθάκη | 22 | | | | | | | | | |
| | Φυτείες | 22 | | | | | | | | | |
| 18 | Πάτρα | Αρή | 38 | 24 | 25 | 31 | 34 | 35 | 42 | 44 | 53 |
| | | Καλάβρυτα | 22 | | | | | | | | |
| | | Ξυλόκαστρο | 35 | | | | | | | | |
| | | Κάτσικας | 29 | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------|----------------------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 19 | Κόρινθος | Όσιος Πατάπιος Λιδωρίκι | 32 22 | 26 | 29 | 41 | 43 | 47 | 48 | 51 | 56 | |
| 20 | Αττική [SFN-1] | Υμηττός | 45 | | | | | | | | | |
| | | Αίγινα | 38 | | | | | | | | | |
| | | Οχθωνιά | 29 | | | | | | | | | |
| | | Πράσινο Χαλκίδα | 29 22 | 21 | 22 | 27 | 28 | 30 | 40 | 45 | 52 | 54 |
| | | Αυλώνας Βάρη | 35 22 | | | | | | | | | |
| 21 | Αττική [SFN-2] | Πάρνηθα | 42 | | | | | | | | | |
| | | Στύρα | 38 | | | | | | | | | |
| | | Λαύριο | 22 | | | | | | | | | |
| | | Ανάβυσσος Σούνιο | 22 22 | 23 | 24 | 31 | 32 | 34 | 36 | 38 | 49 | 50 |
| | | Νέα Μάκρη | 22 | | | | | | | | | |
| 22 | Πύργος | Φραγκαπήδημα | 29 | | | | | | | | | |
| | | Σμέρνα | 22 | 26 | 30 | 38 | 40 | 47 | 49 | 52 | 56 | |
| 23 | Τρίπολη | Δολιανά | 38 | | | | | | | | | |
| | | Ασέα | 29 | 21 | 23 | 24 | 28 | 42 | 45 | 50 | 60 | |
| | | Λεβίδι | 22 | | | | | | | | | |
| 24 | Ναύπλιο | Δίδυμα | 29 | | | | | | | | | |
| | | Ναύπλιο | 29 | 33 | 35 | 39 | 44 | 53 | 55 | 58 | 59 | |
| | | Δαρδίτσα | 29 | | | | | | | | | |
| 25 | Καλαμάτα | Πετσαλίδι | 38 | | | | | | | | | |
| | | Αετός | 29 | 29 | 31 | 32 | 37 | 43 | 44 | 48 | 51 | |
| 26 | Σπάρτη | Ρειχέα | 32 | | | | | | | | | |
| | | Αναβρύτη | 29 | 22 | 25 | 27 | 30 | 36 | 40 | 52 | 57 | |
| | | Κύθηρα | 29 | | | | | | | | | |
| 27 | Δυτική Κρήτη | Μαλάξα | 38 | | | | | | | | | |
| | | Πλακάλωνα | 22 | | | | | | | | | |
| | | Βίγλα | 22 | 21 | 31 | 34 | 38 | 46 | 49 | 54 | | |
| | | Κοτσυφιανά | 22 | | | | | | | | | |
| 28 | Κεντρική Κρήτη | Αχενδριάς | 35 | | | | | | | | | |
| | | Ρογδιά | 38 | | | | | | | | | |
| | | Πόμπια | 29 | 24 | 25 | 37 | 39 | 41 | 44 | 55 | | |
| | | Αμάρι | 22 | | | | | | | | | |
| | | Λιβαδιά | 22 | | | | | | | | | |
| 29 | Ανατολική Κρήτη | Φανερωμένη | 29 | | | | | | | | | |
| | | Λιθίνες | 22 | | | | | | | | | |
| | | Περιστεράς Σητεία | 22 22 | 27 | 28 | 31 | 35 | 36 | 38 | 40 | | |
| | | Σταυρός - Νεαπόλεως | 29 | | | | | | | | | |
| 30 | Δωδεκάνησα | Άξονας | 32 | | | | | | | | | |
| | | Μόντε Σμιθ | 32 | | | | | | | | | |
| | | Γέρακας | 22 | | | | | | | | | |
| | | Κέφαλος | 22 | | | | | | | | | |
| | | Σύμπετρο | 22 | | | | | | | | | |
| | | Άγιοι Πάντες | 22 | | | | | | | | | |
| | | Αρχάγγελος | 22 | | | | | | | | | |
| | | Αστυπάλαια | 22 | | | | | | | | | |
| | | Βαθύ[Κάλυμνος] | 22 | 21 | 24 | 26 | 32 | 37 | 39 | 41 | | |
| | | Βίγλα[Ρόδος] | 22 | | | | | | | | | |
| Βίγλα[Σύμη] | 22 | | | | | | | | | | | |
| Καλυθιές | 22 | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|--------|----------------------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | Κλειδί | 22 | | | | | | | |
| | | Προφήτης | 22 | | | | | | | |
| | | Ηλίας[Πάτμος] | 22 | | | | | | | |
| | | Φούρκες | 22 | | | | | | | |
| | | Φαληράκι[Ρόδος] | 22 | | | | | | | |
| | | Κάρπαθος | 22 | | | | | | | |
| | | Νίσυρος | 22 | | | | | | | |
| 31 | Κυκλάδες [Βόρειο SFN-1] | Σύρος | 35 | | | | | | | |
| | | Άνδρος | 22 | | | | | | | |
| | | Εξώμβουργο | 22 | 26 | 29 | 37 | 41 | 43 | 46 | 48 |
| | | Άνω Μερά | 22 | | | | | | | |
| | | Φοίνικας | 22 | | | | | | | |
| 32 | Κυκλάδες [Νότιο SFN-2] | Αμοργός | 22 | | | | | | | |
| | | Πάρος | 38 | | | | | | | |
| | | Αρτεμώνας | 22 | | | | | | | |
| | | Φιλότι | 22 | | | | | | | |
| | | Βαθύ[Σίφνος] | 22 | 25 | 33 | 39 | 42 | 47 | 51 | 53 |
| | | Θήρα | 22 | | | | | | | |
| | | Ίος | 22 | | | | | | | |
| | | Καμάρες | 22 | | | | | | | |
| Μήλος | 22 | | | | | | | | | |
| 33 | Λέσβος | Όλυμπος | 35 | | | | | | | |
| | | Μυτιλήνη | 29 | | | | | | | |
| | | Θυμιανά [Χίος] | 29 | | | | | | | |
| | | Θολο Ποτάμι | 22 | | | | | | | |
| | | Λήμνος | 29 | 21 | 25 | 33 | 39 | 42 | 46 | 53 |
| | | Μεστά | 22 | | | | | | | |
| | | Μόλυβος | 22 | | | | | | | |
| Μύρινα | 22 | | | | | | | | | |
| 34 | Καστελόριζο | Καστελόριζο | 22 | 25 | 27 | 33 | 35 | 41 | 49 | 51 |

Πίνακας 1.5 Κέντρα εκπομπής στην Ελλάδα (μπλε-Δημόσιοι τηλεοπτικοί σταθμοί εθνικής εμβέλειας, πράσινο-Ιδιωτικοί τηλεοπτικοί σταθμοί εθνικής εμβέλειας, κόκκινο-Ιδιωτικοί τηλεοπτικοί σταθμοί περιφερειακής εμβέλειας)

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συχνότητες από τις οποίες εξέπεμπαν πριν τα switch-off επίγεια ψηφιακά το πρόγραμμά τους οι τηλεοπτικοί σταθμοί ήταν μεταβατικές. Αυτό συνέβη καθώς δεν ήταν διαθέσιμο όλο το φάσμα, συνεπώς για αποφυγή τοπικών παρεμβολών χρειάστηκε ως χώρα να προχωρήσουμε πρώτα σε εκπομπή μέσω μεταβατικών συχνοτήτων. Κατά το τελευταίο στάδιο της μετάβασης που διανύουμε, αυτές θα αλλάξουν. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όσοι τηλεθεατές λαμβάνετε ήδη επίγειο ψηφιακό σήμα μέσω της Digea θα χρειαστεί να επανασυντονίσετε τους δέκτες σας μόλις πραγματοποιηθεί το switch-off στην περιοχή σας.

Έτσι, έπειτα από αρκετή προσπάθεια διαφόρων φορέων δημιουργήθηκαν 34 ψηφιακά κέντρα εκπομπής τηλεοπτικού σήματος τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 1.6.

| Τεχνικά χαρακτηριστικά | Τιμή |
|--------------------------------|---------------|
| Διαμόρφωση | 64-QAM |
| Forward Error Correction (FEC) | $\frac{3}{4}$ |
| Guard Interval (GI) | 1/8 |
| Ηλεκτρικό πεδίο E_{th} | 54 dBμV/m |

Πίνακας 1.6 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των 34 SFN δικτύων της ελληνικής επικράτειας
Στα σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται οι χάρτες ραδιοκάλυψης για την Αττική.



Εικόνα 1.4 Περιοχή απονομής 20 Αττική [SFN-1]



Εικόνα 1.5 Περιοχή απονομής 21 Αττική [SFN-2]

Κεφάλαιο 2 LTE²

2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα LTE, το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και ως 4G ή δίκτυο B3G (Beyond 3G) ή τέλος ως All-IP ασύρματο δίκτυο, σχεδιάστηκε εξ αρχής με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας ράδιο-πρόσβασης (radio access) έτσι ώστε όλες οι υπηρεσίες να στηρίζονται στη μεταγωγή πακέτων (packet switched) και όχι στη μεταγωγή κυκλώματος (circuit switched), όπως τα προϋπάρχοντα κινητά δίκτυα. Όσο αφορά την αρχιτεκτονική του δικτύου, ο όρος LTE αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της ραδιοπρόσβασης και καλείται Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), ενώ η εξέλιξη των συστατικών στοιχείων του δικτύου που δεν αποτελούν τη ραδιοδιεπαφή (non-radio aspects) καλύπτονται από τον όρο System Architecture Evolution (SAE) ο οποίος περιλαμβάνει και το Evolved Packet Core (EPC) δίκτυο. Οι δύο αυτοί όροι (LTE και SAE) συνθέτουν το Evolved Packet System (EPS).

Χαρακτηριστικά του δικτύου όπως η επίπεδη αρχιτεκτονική (flat architecture) καθώς και η χρήση της μεταγωγής πακέτων και του IP πρωτοκόλλου (Internet Protocol) για την επικοινωνία, συμβάλλουν καθοριστικά στην επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Οι πιο χαρακτηριστικοί από τους οποίους είναι η βελτίωση της ρυθμαπόδοσης και η μείωση της καθυστέρησης σε επίπεδο χρήστη, η καλύτερη αντιμετώπιση της κινητικότητας και η υποστήριξη handover ακόμα και σε άλλες ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης.

Επίσης, εξέχουσα σημασία στην εκπλήρωση των απαιτήσεων του δικτύου κατέχουν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε φυσικό επίπεδο. Η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) και η Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας του συστήματος και του εξοπλισμού των χρηστών (user equipment - UE), επιτρέπουν ευέλικτη ανάπτυξη του ράδιο-φάσματος σε υπάρχοντα ή νέα φάσματα συχνοτήτων και τέλος καθιστούν δυνατή τη συνύπαρξη του με άλλες 3GPP Radio Access Technologies (RATs).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα <<αντίπαλα>> πρότυπα για το LTE είναι το Mobile WiMAX και το Ultra-Mobile Broadband (UMB). Το ερευνητικό πεδίο που σχετίζεται με το πρότυπο LTE ήδη γνωρίζει έντονη δραστηριότητα και αναμένεται να επηρεάσει την αγορά σταδιακά. Γραφικά, η χρονική εξέλιξη των τριών ανταγωνιστικών προτύπων (3GPP, 802.16 και 3GPP2) συνοψίζεται στο σχήμα 2.1.

² Πηγές κεφαλαίου

Μελέτη παρεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες τέταρτης γενιάς (4G) LTE FDD, Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2011

Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολής στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες (LTE FDD, LTE TDD, CDMA 2000), Γεώργιος Δ. Μαμαρέλης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2010

LTE: The Evolution of Mobile Broadband, David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall, Ericsson Research

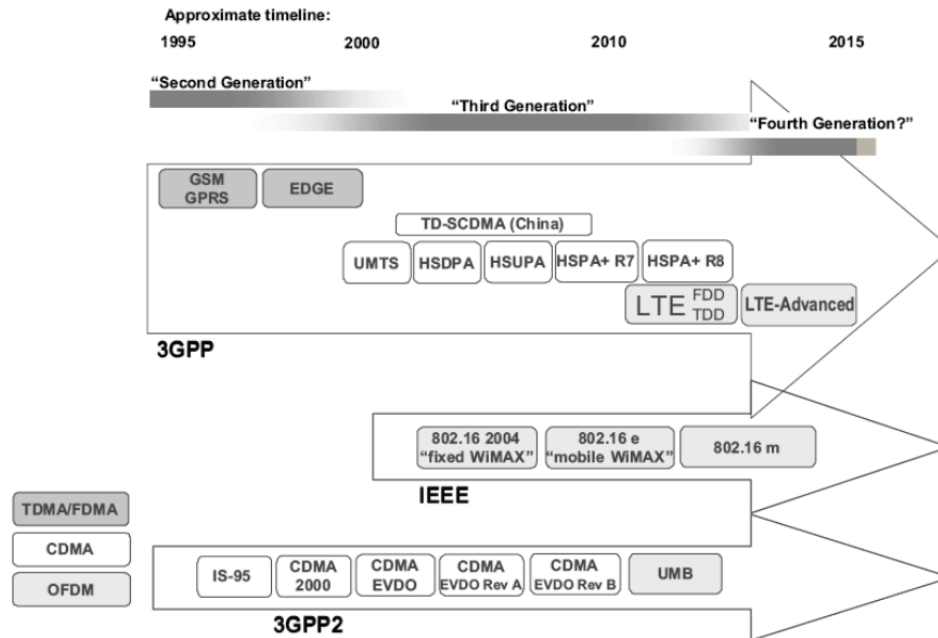
Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σε κινητά OFDMA δίκτυα, Διπλωματική Εργασία, Γεώργιος Μ. Καβουργιάς, Πάτρα 2011
Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks, Rizwan Ghaffar, Raymond Knopp, Eurecom

Χάρτης συχνοτήτων, Digea

ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 2704, Χάρτης Συχνοτήτων Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Τηλεοπτικού Σήματος, 5 Οκτωβρίου 2012

UHF TV band spectrum and field-strength measurements before and after analogue switch-off, P. I. Lazaridis, S. Kasampalis, Z. D. Zaharis, J. Cosmas, A. Bizopoulos, P. Latkoski, L. Gavrilovska, O. Fratu, and R. Prasad.

ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1956, Εκχώρηση φάσματος επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής στη «ΝΕΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΑ, INTERNET ΚΑΙ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ Α.Ε.» (NEPIT A.E.), 12 Αυγούστου 2013



Σχήμα 2.1 Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των κινητών προτύπων

2.1.1 Στόχοι της τεχνολογίας LTE

Η τεχνολογία LTE εστιάζει αποκλειστικά στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης δεδομένων με μεταγωγή πακέτων, όπως είναι οι πολυφασικές εφαρμογές. Επίσης, θέτει πολύ υψηλούς και φιλόδοξους στόχους. Οι βασικότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το πρότυπο LTE αναφέρονται στη συνέχεια:

- **Εύρος Ζώνης:** Κλιμακωτή χρήση φάσματος εύρους ζώνης της τάξης των 5, 10, 15 και 20 MHz. Επίσης, μπορεί να γίνει και χρήση εύρους ζώνης μικρότερου των 5 MHz (1,5 MHz και 2,5MHz) για επιπλέον ευελιξία.
- **Ρυθμοί Μετάδοσης:** Επίτευξη μέγιστων ρυθμών μετάδοσης της τάξης των 100 Mbps στον κατερχόμενο και 50 Mbps στον ανερχόμενο σύνδεσμο για εύρος ζώνης 20 MHz.
- **Τρόπος Λειτουργίας:** Λειτουργία της τεχνολογίας LTE τόσο σε **FDD (frequency division duplex)** όσο και **TDD (time division duplex)**.
- **Ρυθμαπόδοση – Φασματική απόδοση:** Επίτευξη 3-4 φορές μεγαλύτερης μέσης ρυθμαπόδοσης χρήστη ανά MHz στον κατερχόμενο σύνδεσμο και αντίστοιχα 2-3 φορές μεγαλύτερης για τον ανερχόμενο σύνδεσμο συγκριτικά με τις εκδόσεις 6 και 7 του προτύπου 3GPP (HSDPA και HSUPA).
- **Αποδοτικότητα φάσματος:** Επίτευξη 2-3 φορές μεγαλύτερης αποδοτικότητας φάσματος σε σχέση με την έκδοση 6 του προτύπου 3GPP (HSPDA).
- **Καθυστέρηση:** Σημαντική μείωση του χρόνου Round-Trip Time (RTT) από το χρήστη έως το σταθμό βάσης στα 5 ms – 10 ms.
- **Κινητικότητα:** Δυνατότητα βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος για χαμηλές ταχύτητες κίνησης των χρηστών (0-15 χμ/ώρα) καθώς και δυνατότητα υποστήριξης χρηστών που κινούνται σε πολύ υψηλές ταχύτητες.
- **Λειτουργικότητα:** Δυνατότητα ταυτόχρονης λειτουργίας με μη-3GPP πρότυπα επικοινωνιών καθώς και με τα υπάρχοντα UTRAN/GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN) συστήματα κινητών επικοινωνιών. Επίσης, υποστήριξη δυνατότητας handover από και προς τα συστήματα αυτά.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας:** Υποστήριξη από άκρο σε άκρο ποιότητας υπηρεσίας QoS, για την υποστήριξη απαιτητικών υπηρεσιών σε Quality of Service (QoS) όπως είναι οι VoIP εφαρμογές.

2.1.2 Υπηρεσίες τεχνολογίας LTE

Η τεχνολογία LTE επιτρέπει τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών διαδικτύου και μεταφοράς δεδομένων καθώς και την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στους κινητούς χρήστες. Μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας MBMS σε evolved MBMS παρέχεται multicast υπηρεσιών ψηφιακού περιεχομένου, ταυτόχρονα με τις υπηρεσίες δεδομένων, πιο αποδοτικά και με περισσότερες δυνατότητες όσον αφορά τη χωρητικότητα και το πλήθος των προσφερόμενων καναλιών. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία LTE ουσιαστικά παρέχει βελτιωμένη ποιότητα, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μικρότερη καθυστέρηση για τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από την τεχνολογία HSPA+ ενώ επιπρόσθετα δύναται να υποστηρίξει μέσω της τεχνολογίας evolved MBMS:

- **Μετάδοση υψηλής ποιότητας περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο** – Streaming υπηρεσίες ήχου και εικόνες: τηλεόραση, ραδιόφωνο. Το μεταδιδόμενο περιεχόμενο μπορεί να μεταφέρεται σε πραγματικό χρόνο ή να είναι αποθηκευμένο και να αναμεταδίδεται.
- **Υπηρεσίες παρεχόμενες / διαφοροποιούμενες ανά εντοπισμένη περιοχή εξυπηρέτησης** – δυνατότητα συνδυασμού εθνικών και τοπικών προγραμμάτων τηλεόρασης ή άλλου περιεχομένου ανά γεωγραφική περιοχή, multicast μετάδοση τουριστικού περιεχομένου (video-clips, διαφημίσεις) με πληροφορίες για φεστιβάλ, εστιατόρια, ξενοδοχεία μουσεία κ.ο.κ.

2.1.3 Σύγκριση της νέας τεχνολογίας (4G) με την προηγούμενη (3G)

Κάτωθι παρουσιάζουμε τους λόγους ανάπτυξης της τεχνολογίας 4G.

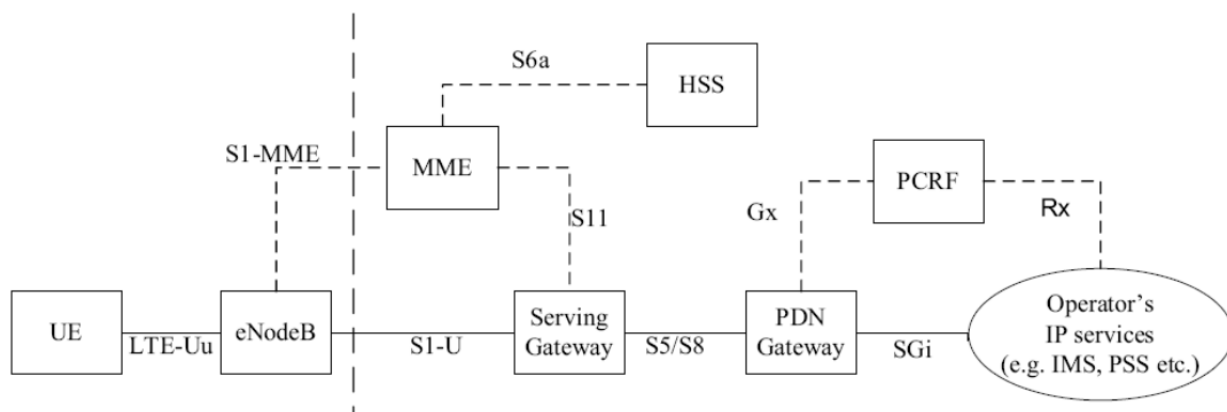
- Τα 3G συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές αποδόσεις, όπως εφαρμογές πολυμέσων, full motion, video και ασύρματη τηλεδιάσκεψη. Επομένως **χρειάζεται ένα σύστημα που αυξάνει την ήδη υπάρχουσα χωρητικότητα.**
- Υπάρχει μια πλειάδα προτύπων και πρωτοκόλλων 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 κυβελωτά 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/2.5G/sub3G | 4G |
|-----------------------------------|---|--|
| Βασικές απαιτήσεις αρχιτεκτονικής | Κατά κύριο λόγο δεδομένα φωνής | Converged data and voice over IP |
| Αρχιτεκτονική δικτύου | Ευρεία περιοχή – Κυψελωτό δίκτυο | Υβριδική – Ενσωμάτωση Wlan (Wi-Fi, Bluetooth) και Ευρύτερη περιοχή |
| Ταχύτητα | 384 Kbps έως 2Mbps | 20 έως 100Mbps εν κινήσει |
| Ζώνη συχνοτήτων | Εξαρτάται από χώρα (1800 – 2100 MHz) | Υψηλές ζώνες συχνοτήτων (2-8GHz) |
| Εύρος ζώνης | 5-20MHz | 100MHz (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 schem |
| Σχεδιαστική υλοποίηση | Optimized antenna design, multi-band adapters | Smarter Antennas, software multiband and wideband radio |
| IP | IP 5.0 | IP 6.0 |

Πίνακας 2.1 Σύγκριση παραμέτρων και χαρακτηριστικών 3G και 4G

2.2 Αρχιτεκτονική συστήματος

Όπως προαναφέρθηκε το **EPS δίκτυο αποτελείται** από το **δίκτυο κορμού (EPC)** και το **δίκτυο πρόσβασης (E-UTRAN)**. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, το **δίκτυο κορμού αποτελείται από πολλές λογικές οντότητες**, ενώ αντίθετα το **δίκτυο πρόσβασης συντελείται από ένα και μοναδικό στοιχείο, τον evolved NodeB (eNodeB)**, ο οποίος συνδέεται με τους UEs. Επίσης απεικονίζονται οι επαφές που συνδέουν τις οντότητες αυτές μεταξύ τους.



Σχήμα 2.2 Στοιχεία του EPS δικτύου

2.2.1 Δίκτυο Κορμού

Οι βασικές οντότητες του δικτύου κορμού (Core Network) είναι οι εξής:

2.2.1.1 Serving Gateway

Η **Serving Gateway (S-GW)** **δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη**, ενώ επίσης ενεργεί ως σημείο αναφοράς όταν ο χρήστης κινείται μεταξύ των **eNodeBs** ή μεταξύ του LTE και άλλων 3GPP τεχνολογιών (handover). Η **Mobility Management Entity (MME)** δίνει εντολή στη S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον ένα eNodeB στον άλλο. Επίσης, μπορεί να ζητήσει από τη S-GW να παρέχει πόρους σύνδεσης για τη διαβίβαση δεδομένων, αν υπάρχει ανάγκη, από τον αρχικό eNodeB στον επόμενο. Άλλο ένα σενάριο είναι η αλλαγή από μια S-GW σε άλλη, με την MME να ελέγχει τη μετακίνηση αυτή αναλόγως με την κατάργηση συνδέσεων στην παλιά S-GW και την εγκατάστασή τους στην νέα S-GW.

Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε ένα UE ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και της **Packet Data Network Gateway (P-GW)**. Ωστόσο, όταν ένας UE είναι σε κατάσταση αδράνειας οι πόροι στον eNodeB απελευθερώνονται και η πορεία των δεδομένων τερματίζει στην S-GW. Εάν η S-GW λάβει πακέτα δεδομένων από την P-GW, τότε θα αποθηκεύσει τα πακέτα και θα ζητήσει από την MME να αρχικοποιήσει τη διαδικασία τηλεειδοποίησης του UE. Αυτό θα παρακινήσει τον UE να ξανασυνδεθεί και όταν οι συνδέσεις πραγματοποιηθούν, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν.

Η S-GW παρακολουθεί τα δεδομένα στις συνδέσεις και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρέωσης των χρηστών. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει τη **λειτουργία νόμιμης παρακολούθησης**, η οποία δίνει τη δυνατότητα να παρέχονται τα δεδομένα, του χρήστη που παρακολουθείται, στις αρχές για περαιτέρω έλεγχο.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο eNodeBs και επίσης μπορεί να υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο MMEs που ελέγχουν αυτή την περιοχή. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, αντιθέτως το S-GW μπορεί να μεταφερθεί.

2.2.1.2 Packet Data Network Gateway

Η P-GW παρέχει τη δυνατότητα της σύνδεσης του UE με εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων με το να δρα ως σημείο εξόδου και εισόδου της κυκλοφορίας για τον UE. Ένας UE μπορεί να έχει ταυτόχρονη σύνδεση με περισσότερες από μια P-GW για πρόσβαση σε πολλαπλά Packet Data Networks (PDNs).

Επίσης, είναι το σημείο όπου δίνεται η IP σε κάθε UE. Συνήθως διανέμει μια IP διεύθυνση στον UE, και αυτός τη χρησιμοποιεί για να επικοινωνεί με άλλους IP hosts σε εξωτερικά δίκτυα, π.χ. στο Διαδίκτυο.

Ένας άλλος βασικός ρόλος της P-GW είναι να ενεργεί ως σημείο αναφοράς για την κινητικότητα μεταξύ 3GPP και άλλων τεχνολογιών (όπως το WiMAX και 3GPP2). **Όταν ένας UE μετακινείται από μια S-GW σε άλλη, οι φορείς/κανάλια πρέπει να αλλάξουν στο P-GW. Η P-GW θα λάβει ένδειξη για να αλλάξει τις ροές δεδομένων από το νέο S-GW.** Τέλος, περιλαμβάνει το **PCEF (Policy Control Enforcement Function)**, πράγμα που σημαίνει ότι εκτελεί **gating και filtering λειτουργίες** όπως απαιτείται από τις πολιτικές που καθορίζονται για τον UE και την εν λόγω υπηρεσία, ενώ συλλέγει και αναφέρει και τις σχετικές πληροφορίες χρέωσης.

2.2.1.3 Mobility Management Entity

Η οντότητα **MME** είναι ο **κόμβος κλειδί για τον έλεγχο πρόσβασης στο LTE δίκτυο.** Είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση των συσκευών που βρίσκονται σε αδράνεια και για την διαδικασία τηλεειδοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των αναμεταδόσεων. Συμμετέχει στη διαδικασία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του φορέα/καναλιού και επίσης είναι υπεύθυνη για την επιλογή του S-GW για ένα UE κατά την αρχική σύνδεση και τη στιγμή του LTE handover συμπεριλαμβάνοντας τη μετεγκατάσταση του CN.

Επίσης, είναι **υπεύθυνη για τον έλεγχο ταυτότητας των χρηστών** (μέσω αλληλεπίδρασης με το HSS). Οι **Non Access Stratum (NAS)** διαδικασίες τερματίζουν στο MME και είναι υπεύθυνες για την παραγωγή και την κατανομή προσωρινών **“ταυτοτήτων”** για τους UEs. **Ελέγχουν την άδεια του UE** για το αν μπορεί να συμμετέχει στην υπηρεσία που προσφέρει ο πάροχος (Public Land Mobile Network) και **επιβάλλει περιορισμούς περιαγωγής στον UE.** Η MME είναι το τελικό σημείο του δικτύου για **κρυπτογράφηση/προστασία ακεραιότητας για τις NAS διαδικασίες και αναλαμβάνει την διαχείριση του κλειδιού ασφαλείας.** Επίσης παρέχει τη λειτουργία **control plane για κινητικότητα μεταξύ LTE και 2G/3G δικτύων μέσω της S3 διεπαφής.** Τέλος τερματίζει την διεπαφή S6a προς το HSS για τις συσκευές χρηστών με περιαγωγή.

2.2.1.4 Policy and Charging Resource Function

Το **Policy and Charging Resource Function (PCRF)** είναι ένα στοιχείο του δικτύου που είναι **υπεύθυνο για την Πολιτική και τον Έλεγχο Χρέωσης (Policy Control and Charging)**. Λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πως δρουν οι υπηρεσίες όσον αφορά το QoS και παρέχει πληροφορίες στο PCEF, που βρίσκεται στο P-GW, έτσι ώστε κατάλληλοι φορείς και ανάλογη τακτική να μπορούν να οριστούν. **Οι πληροφορίες που παρέχει το PCRF στον PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Το PCRF θα στείλει τους κανόνες PCC κάθε φορά που ένας νέος φορέας/κανάλι θα πρέπει να εγκατασταθεί.** Για παράδειγμα, όταν ο UE συνδέεται για πρώτη φορά στο δίκτυο και ο αρχικός φορέας εγκατασταθεί στην συνέχεια ένας ή περισσότεροι αφιερωμένοι φορείς εγκαθίστανται.

2.2.1.5 Home Subscription Server

Ο **Home Subscription Server (HSS)** είναι η «αποθήκη» δεδομένων με τις εγγραφές όλων των μόνιμων χρηστών. Είναι μια βάση δεδομένων αποθηκευμένη σε κάποιο εξυπηρετητή, ο οποίος βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS κρατάει το κύριο αντίγραφο του προφίλ του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που ισχύουν για το χρήστη, καθώς και σχετικά με τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και το αν επιτρέπεται ή όχι περιαγωγή σε ένα δίκτυο που έχει επισκεφθεί. Για την υποστήριξη handover μεταξύ των μη-3GPP δικτύων, ο HSS αποθηκεύει επίσης τις ταυτότητες των P-GWs που είναι διαθέσιμες προς χρήση.

Ακόμα μία οντότητα που μπορεί να είναι ενσωματωμένη στο HSS είναι το **Κέντρο Ταυτοποίησης (Authentication Center)** το οποίο παράγει τα διανύσματα για την ταυτοποίηση και τα κλειδιά ασφαλείας. Σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες ο HSS αλληλεπιδρά με την MME, επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με κάθε MME σε όλο το δίκτυο, προκειμένου να παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να μετακινείται. Για κάθε UE, οι εγγραφές του HSS θα δείχνουν σε ένα MME που του προσφέρει υπηρεσίες κάθε στιγμή, και μόλις ένα νέο MME αναφέρει ότι προσφέρει υπηρεσίες στον UE, το HSS θα ακυρώσει την τοποθεσία της προηγούμενης MME.

2.2.2 Δίκτυο Πρόσβασης

2.2.2.1 Evolved NodeB

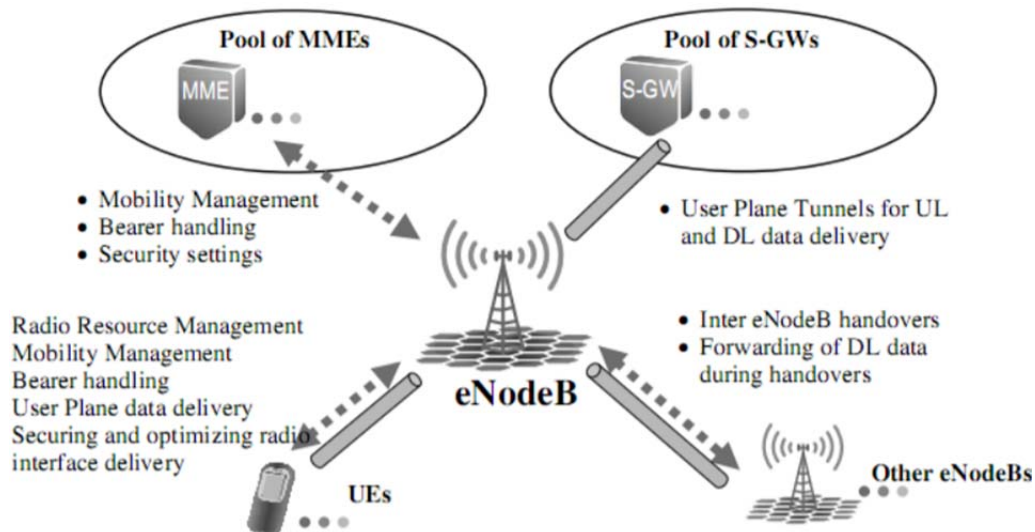
Ο **μόνος κόμβος στο E-UTRAN είναι ο evolved NodeB (eNodeB)**. Με απλά λόγια, **ο eNodeB είναι ένας σταθμός βάσης που ελέγχει όλες τις ραδιολειτουργίες που συνδέονται με το σταθερό μέρος του συστήματος**. Οι σταθμοί βάσης, όπως ο eNodeB, κατανέμονται συνήθως σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων και κάθε eNodeB είναι τοποθετημένος κοντά στις ραδιο κεραίες (radio antennas).

Λειτουργικά ο **eNodeB ενεργεί ως μια γέφυρα μεταξύ του UE και του EPC**, αφού είναι το σημείο τερματισμού όλων των πρωτοκόλλων του UE ενώ ταυτόχρονα αναμεταδίδει τα δεδομένα προς το EPC, μεταξύ των ραδιοσυνδέσεων και της αντίστοιχης σύνδεσης που είναι βασισμένη σε IP. Σε αυτό το ρόλο ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του UE, καθώς επίσης συμπίεση / αποσυμπίεση των IP κεφαλίδων, πράγμα που σημαίνει την αποφυγή επανειλημμένης αποστολής των ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων στην κεφαλίδα IP.

Επιπλέον, **ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση κινητικότητας**. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις της έντασης του ραδιο-συστήματος (radio signal) που πραγματοποιούνται από τον UE, κάνει παρόμοιες μετρήσεις ο ίδιος, και με βάση αυτές λαμβάνεται η απόφαση για το handover των UEs μεταξύ των κελιών. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται υπό κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στην MME η οποία προηγουμένως εξυπηρετούσε το συγκεκριμένο UE. Σε

περίπτωση που η δρομολόγηση προς την προηγούμενη MME δεν είναι διαθέσιμη ή λείπουν κάποιες πληροφορίες δρομολόγησης, επιλέγεται μία νέα MME.

Στο σχήμα 2.3 φαίνονται οι συνδέσεις που έχει ο eNodeB με τους περιβάλλοντες λογικούς κόμβους και συνοψίζονται οι βασικές λειτουργίες αυτών. Ένας eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς UEs στην περιοχή κάλυψης του, ωστόσο κάθε UE μπορεί να είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο eNodeB. Επίσης γειτονικοί eNodeBs πρέπει να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Τέλος, κάθε στιγμή σε ένα UE προσφέρονται υπηρεσίες από μία μόνο MME και S-GW, και ο eNodeB πρέπει να παρακολουθεί αυτή την συσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι ένας eNodeB είναι πιθανό να πρέπει να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs.



Σχήμα 2.3 Συνδέσεις του eNodeB με άλλους λογικούς κόμβους και κύριες λειτουργίες

2.2.3 Εξοπλισμός χρήστη

Ο **εξοπλισμός χρήστη (User Equipment)** είναι η συσκευή την οποία ο τελικός χρήστης χρησιμοποιεί για **επικοινωνία**. Συνήθως πρόκειται για μια συσκευή χειρός όπως είναι ένα smart phone ή ακόμα και ένα laptop. Επίσης περιλαμβάνει την **Universal Subscriber Identity Module (USIM)**, που είναι μια ξεχωριστή μονάδα από τον υπόλοιπο UE, που συχνά αποκαλείται **Τερματικός Εξοπλισμός (Terminal Equipment)**. Η USIM είναι μια εφαρμογή που τοποθετείται σε μια αφαιρούμενη έξυπνη κάρτα που λέγεται Universal Integrated Circuit Card (UICC) και χρησιμοποιείται για να προσδιορίζει και να ελέγχει την ταυτότητα του χρήστη καθώς και να παράγει κλειδιά ασφαλείας για την προστασία της μετάδοσης στην ραδιο-επαφή.

Ο UE είναι μια πλατφόρμα για εφαρμογές επικοινωνίας που επιτελεί λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας όπως handover και αναφορά της τοποθεσίας όπου βρίσκεται ο τερματικός σταθμός. Ίσως το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο UE παρέχει τη διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές όπως VoIP να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.

2.3 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

Τα πρωτόκολλα χωρίζονται σε **δύο κατηγορίες: User Plane (UP) και τα Control Plane (CP)** τα οποία έχουν να κάνουν με **μεταδόσεις δεδομένων του χρήστη (user data transmission)** και **μεταδόσεις σήματος (signaling transmission)**, αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η δομή των πρωτοκόλλων από την πλευρά του eNodeB.

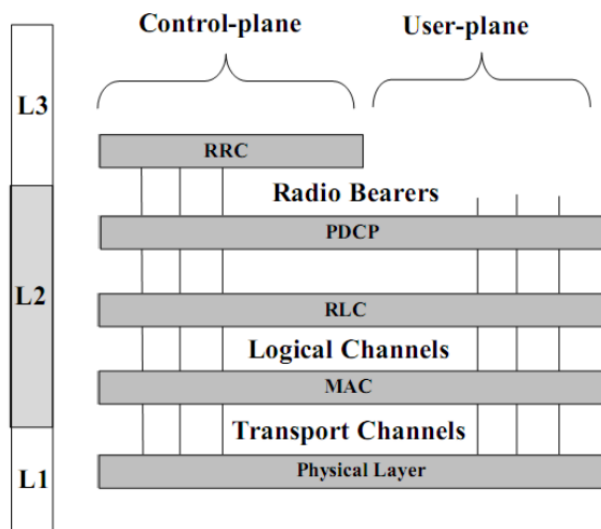
Ξεκινώντας από την κορυφή της εικόνας, το **επίπεδο RRC (Radio Resource Control)** υποστηρίζει όλες τις διαδικασίες **σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και του eNodeB**. Αυτό περιλαμβάνει **διαδικασίες κινητικότητας**, καθώς και τη **διαχείριση της σύνδεσης του τερματικού**. Η σηματοδότηση από το EPC Control Plane

(π.χ. για καταχώρηση του τερματικού ή ταυτοποίηση) μεταφέρεται στο τερματικό μέσω του πρωτοκόλλου RRC, εξ ου και η σχέση μεταξύ του RRC και των ανώτερων επιπέδων.

Το επίπεδο PDCP (κύριος ρόλος του οποίου είναι η **συμπύεση κεφαλίδων και η εφαρμογή ασφαλείας, όπως η κρυπτογράφηση και η ακεραιότητα**) προσφέρεται στους φορείς (Radio Bearers) από τα κατώτερα επίπεδα του E-UTRAN. Καθένας από αυτούς τους φορείς αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη ροή πληροφοριών, όπως δεδομένα User Plane (π.χ. **πλαίσια φωνής, ροές δεδομένων, σηματοδότηση IMS**) ή **σηματοδότηση Control Plane (όπως RRC σηματοδότηση που προέρχεται από το EPC)**. Λόγω του συγκεκριμένου σκοπού και χειρισμού τους, οι ροές πληροφοριών που δημιουργούνται από το 'System Information Broadcast' και οι λειτουργίες σελιδοποίησης (Paging) είναι διαφανείς στο επίπεδο PDCP.

Το επίπεδο RLC παρέχει σε αυτό του PDCP βασικές υπηρεσίες παρόμοιες με αυτές του επιπέδου 2 του OSI, όπως **τμηματοποίηση των πακέτων δεδομένων και ARQ (Automatic Repeat Request)** ως μηχανισμό διόρθωσης λαθών. Υπάρχει ένα-προς-ένα αντιστοίχιση μεταξύ κάθε RLC εισερχόμενης ροής και των λογικών καναλιών (Logical Channels) που παρέχονται από το επίπεδο RLC στο MAC.

Το επίπεδο MAC λαμβάνει υπόψη του τις προτεραιότητες στις ροές δεδομένων που παρέλαβε από το επίπεδο RLC, να χαρτογραφήσει και να πολυπλέξει τα λογικά κανάλια στα κανάλια μεταφοράς (Transport Channels). Οι ροές που είναι πολυπλεγμένες σε ένα κανάλι μεταφοράς μπορεί να προέρχονται είτε από ένα μόνο χρήστη (π.χ. ένα ή περισσότερα στιγμιότυπα από τα DCCH και DTCH) είτε από πολλαπλούς (π.χ. πολλά DTCH από διαφορετικούς χρήστες). Το MAC υποστηρίζει επίσης HARQ (Hybrid ARQ), η οποία είναι μια γρήγορη διαδικασία επανάληψης. **Τέλος, το MAC παραδίδει τις ροές μεταφορές στο PHY επίπεδο, το οποίο θα εφαρμόσει κωδικοποίηση καναλιού και διαμόρφωση πριν κάνει τη μετάδοση μέσω των ραδιοδιεπαφών.**



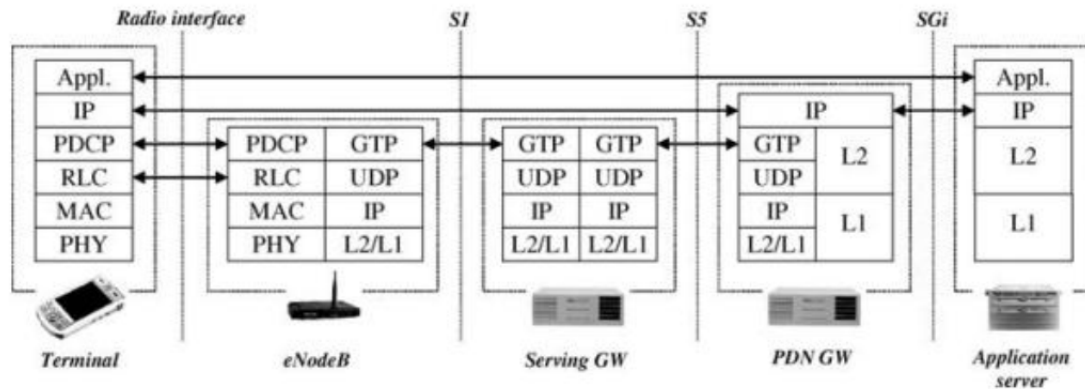
Σχήμα 2.4 Δομή πρωτοκόλλων

2.3.1 User Plane

Από την οπτική γωνία του ασύρματου δικτύου το UP περιλαμβάνει όχι μόνο τα δεδομένα του χρήστη, όπως πακέτα φωνής ή Web περιεχόμενο, αλλά και τη σηματοδότηση που σχετίζεται με τις υπηρεσίες εφαρμογών όπως τις SIP (Session Initiation Protocol) και RTCP (Real Time Control Protocol). Η σηματοδότηση υψηλού επιπέδου (high-level signaling), παρά το γεγονός ότι θεωρείται πληροφορία ελέγχου από τα επίπεδα εφαρμογών, μεταδίδεται μέσω του User Plane.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η στοίβα πρωτοκόλλων User Plane, από το τερματικό μέχρι τον εξυπηρετητή εφαρμογών (application server). Καταρχάς, το επίπεδο εφαρμογών, που είναι παρόν μόνο στο τερματικό και στον εξυπηρετητή εφαρμογών, βασίζεται σε IP μετάδοση δεδομένων και τα πακέτα δρομολογούνται μέσω των Packet

Core Gateways πριν φτάσουν στον προορισμό τους. Τέλος, τα L1 και L2 αναφέρονται αντίστοιχα στις φυσικές (physical) ζεύξης και ζεύξης δεδομένων (data link) διεπαφές των S1, S5 και SGi διεπαφών δικτύου.



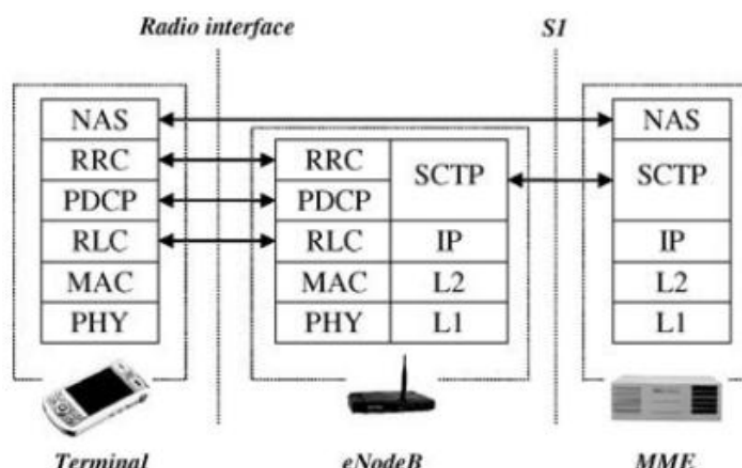
Σχήμα 2.5 User Plane στοίβα πρωτοκόλλων

2.3.2 Control Plane

Το CP αντιστοιχεί στις ροές πληροφορίας που στην πραγματικότητα θεωρούνται ως σηματοδότηση από τα E-UTRAN και EPC. Για παράδειγμα, περιλαμβάνει όλες τις υπηρεσίες RRC (Radio Resource Control) E-UTRAN σηματοδοτήσεις (λειτουργίες υποστήριξης όπως διαχείριση των Radio Bearer, κινητικότητα και σελιδοποίηση) και τις NAS σηματοδοτήσεις, που αναφέρονται σε λειτουργίες και υπηρεσίες που είναι ανεξάρτητες από την τεχνολογία πρόσβασης. Το NAS περιλαμβάνει επίσης τα GSM (GPRS Mobility Management) και SM (Session Management) επίπεδα για λογαριασμό όλων των διαδικασιών σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και της MME για διαχείριση έλεγχο ασφάλειας και ταυτοποίηση της συνόδου (session) και του EPS φορέα (EPS bearer).

Η στοίβα πρωτοκόλλων CP παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6. Όπως είναι εμφανές σταματά στην MME, αφού εκεί τερματίζουν τα πρωτόκολλα ανωτάτου επιπέδου (top-level). Στη ραδιοδιεπαφή, το CP χρησιμοποιεί την ίδια στοίβα πρωτοκόλλων (PDCP, RLC, MAC, PHY) για να μεταφέρει τόσο την RRC (Radio Resource Control) όσο την Core Network NAS σηματοδότηση.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, τα επίπεδα RLC, MAC και PHY υποστηρίζουν τις ίδιες λειτουργίες για τα UP και CP, ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι οι πληροφορίες τους μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο. Πολλαπλοί ραδιοφορείς μπορεί να εγκατασταθούν μεταξύ του τερματικού και του δικτύου, με τον καθένα από αυτούς να ανταποκρίνεται σε ένα συγκεκριμένο σχήμα μετάδοσης (transmission scheme), ραδιοπροστασία (radio protection) και χειρισμό προτεραιότητας (priority handling). Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω των ραδιοκαναλιών τα οποία παρουσιάζονται εν συνεχεία.



Σχήμα 2.6 Control Plane στοίβα πρωτοκόλλων

2.4 Κανάλια

Όπως έχει γίνει ήδη σαφές από τις απαιτήσεις, το E-UTRAN πρέπει να μεταδίδει πληροφορίες με υψηλή ταχύτητα και χαμηλή καθυστέρηση με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Ωστόσο, δεν απαιτούν όλες οι ροές πληροφορίας την ίδια προστασία από σφάλματα ή την ίδια QoS.

Σε γενικές γραμμές είναι ζωτικής σημασίας, ειδικά στην περίπτωση κινητικότητας, τα μηνύματα σηματοδότησης του E-UTRAN να διαβιβάζονται όσο το δυνατόν γρηγορότερα, χρησιμοποιώντας το καλύτερο σχήμα προστασίας από σφάλματα (error protection scheme). Αντιθέτως, η φωνή ή οι εφαρμογές ροής δεδομένων μπορεί να έχουν μία, λογική, ανοχή σε σφάλματα κατά τη μετάδοσή τους.

Το E-UTRAN, προκειμένου να είναι ευέλικτο και να επιτρέπει διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης δεδομένων, υποστηρίζει τα εξής είδη καναλιών:

- **Λογικά (logical) κανάλια** (περιέχουν το αντικείμενο που μεταδίδεται)
- **Κανάλια μεταφοράς (transport)** (εκφράζουν τον τρόπο που μεταδίδεται)
- **Φυσικά (physical) κανάλια**

2.4.1 Λογικά Κανάλια

Τα λογικά κανάλια ανταποκρίνονται στις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που παρέχονται από τα πρωτόκολλα ραδιοδιεπαφών, στα ανώτερα στρώματα. Υπάρχουν δύο είδη λογικών καναλιών: τα κανάλια ελέγχου (control channels, πίνακας 2.2) για τη μεταφορά των πληροφοριών CP και τα κανάλια δοσοληψίας (traffic channels, πίνακας 2.3) για τη μεταφορά UP πληροφοριών. Κάθε ένα από τα κανάλια αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τύπο ροής πληροφορίας.

| | |
|------|---------------------------|
| BCCH | Broadcast Control Channel |
| PCCH | Paging Control Channel |
| CCCH | Common Control Channel |
| MCCH | Multicast Control Channel |
| DCCH | Dedicated Control Channel |

Πίνακας 2.2 Control Channels

| | |
|------|---------------------------|
| DTCH | Dedicated Traffic Channel |
| MTCH | Multicast Traffic Channel |

Πίνακας 2.3 Traffic Channels

2.4.2 Κανάλια Μεταφοράς

Τα κανάλια μεταφοράς περιγράφουν με ποια χαρακτηριστικά μεταφέρονται τα δεδομένα μέσω των ραδιοδιεπαφών, ενώ χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: στα κανάλια μεταφοράς κατερχόμενης ζεύξης (downlink transport channels, πίνακας 2.4) και στα κανάλια μεταφοράς ανερχόμενης ζεύξης (uplink transport channels, πίνακας 2.5).

| | |
|--------|-------------------------|
| BCH | Broadcast Channel |
| PCH | Paging Channel |
| DL-SCH | Downlink Shared Channel |
| MCH | Multicast Channel |

Πίνακας 2.4 Downlink Transport Channels

| | |
|--------|-----------------------|
| UL-SCH | Uplink Shared Channel |
| RACH | Random Access Channel |

Πίνακας 2.5 Uplink Transport Channels

2.4.3 Φυσικά Κανάλια

Τα φυσικά κανάλια είναι η ουσιαστική εφαρμογή του καναλιού μεταφοράς πάνω στη ραδιοδιεπαφή. Είναι γνωστά μόνο στο φυσικό επίπεδο του E-UTRAN και η δομή τους έχει ισχυρή εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά της φυσικής διεπαφής του OFDM. Χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες: σε αυτά της κατερχόμενης ζεύξης (**downlink physical channels**, πίνακας 2.6) και σε αυτά της ανερχόμενης ζεύξης (**uplink physical channels**, πίνακας 2.7).

| | |
|--------|---|
| PDSCH | Physical Downlink Shared Channel |
| PDCCH | Physical Downlink Control Channel |
| PMCH | Physical Multicast Channel |
| PBCH | Physical Broadcast Channel |
| PCFICH | Physical Control Format Indicator Channel |
| PHICH | Physical Hybrid ARQ Indicator Channel |

Πίνακας 2.6 Downlink Physical Channels

| | |
|--------|---------------------------------|
| BCH | Physical Uplink Shared Channel |
| PCH | Physical Uplink Control Channel |
| DL-SCH | Physical Random Access Channel |

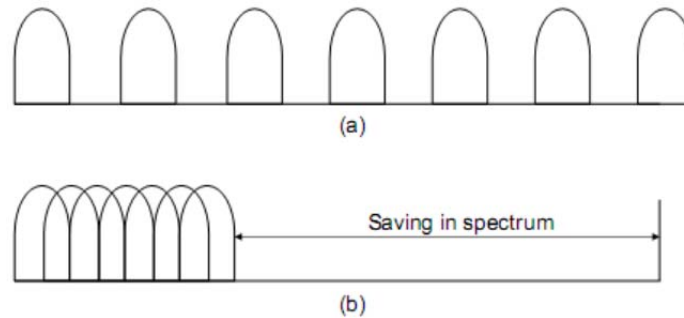
Πίνακας 2.7 Uplink Physical Channels

2.5 Βασικές Τεχνικές Μετάδοσης Πληροφορίας σε Συστήματα LTE

Για την επίτευξη των παραπάνω απαιτήσεων είναι προφανές ότι η τεχνολογία LTE πρέπει να βασιστεί σε βέλτιστες τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας στο ασύρματο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις εξής τεχνολογίες: multicarrier τεχνολογία και τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (multiple antenna technology).

2.5.1 Multicarrier τεχνολογία

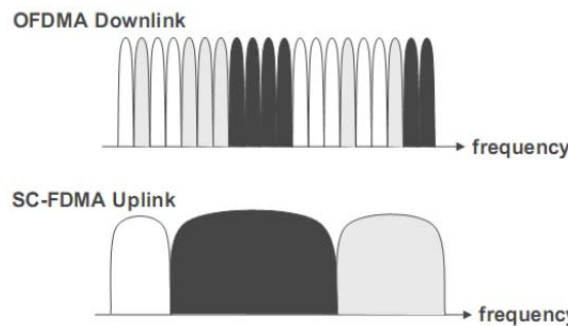
Μία από τις κύριες τεχνολογίες που υιοθετεί η τεχνολογία LTE είναι το **Orthogonal Frequency Division Multiplexing**. Κύριος λόγος υιοθέτησης του OFDM ως μοντέλου διαμόρφωσης για το LTE είναι η μεγάλη αντοχή που επιδεικνύει σε περιβάλλοντα εξασθένισης σήματος και παρεμβολών. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνει καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης του καναλιού (σχήμα 2.7), χωρίζοντας το σε υποκανάλια (subchannels) που είναι μεν επικαλυπτόμενα αλλά ακολουθούν την αρχή της ορθογωνιότητας.



Σχήμα 2.7 α) Απλός διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού β) OFDM διαχωρισμός εύρους ζώνης καναλιού

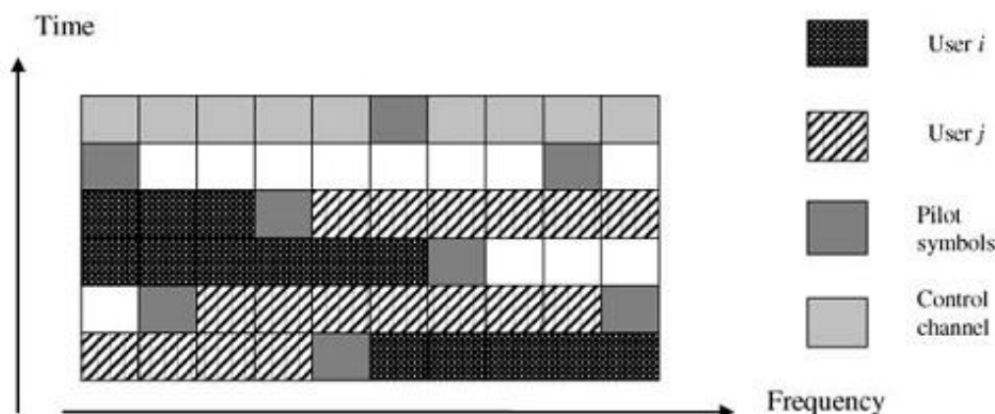
Αυτό απαλλάσσει τους κατασκευαστές από την ανάγκη να διαχωρίσουν τους φορείς (carriers) με τη χρήση guard-bands, αποφεύγοντας την άσκοπη σπατάλη του παρεχόμενου εύρους ζώνης.

Ειδικότερα, για την περίπτωση της μετάδοσης δεδομένων στον κατερχόμενο σύνδεσμο χρησιμοποιείται η Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) τεχνολογία, ενώ για την περίπτωση του ανερχόμενου συνδέσμου προτείνεται η χρήση της τεχνολογίας Single Carrier OFDM (SC-OFDM).



Σχήμα 2.8 Τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης LTE

Η OFDMA είναι μία γενίκευση του OFDM στην περίπτωση πολλών χρηστών. Η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται στην OFDMA με την ανάθεση των υποσυνόλων των υπό-μεταφορέων (subcarrier) στους μεμονωμένους χρήστες. Αυτό, όπως φαίνεται και στην σχήμα 2.9, επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση από διάφορους χρήστες, αλλά και τη μετάδοση των πιλοτικών συμβόλων (pilot symbols) και των δεδομένων των καναλιών ελέγχου (control channels) χωρίς παρεμβολές.



Σχήμα 2.9 Δέσμευση πόρων στο πεδίο του χώρο-χρόνου

Όσον αφορά το SC-OFDM στον ανερχόμενο σύνδεσμο, η τεχνολογία LTE διαφοροποιείται από το πρότυπο WiMAX, το οποίο χρησιμοποιεί την OFDMA τεχνική για τον ανερχόμενο σύνδεσμο. Η OFDMA τεχνική, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, μπορεί να αποβεί ανασταλτικός παράγοντας για τη μπαταρία των κινητών συσκευών των χρηστών, καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία LTE υιοθετείται η SC-OFDM τεχνική. Η SC-OFDM τεχνική παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αφού έχει πολύ υψηλό λόγο Peak-to-

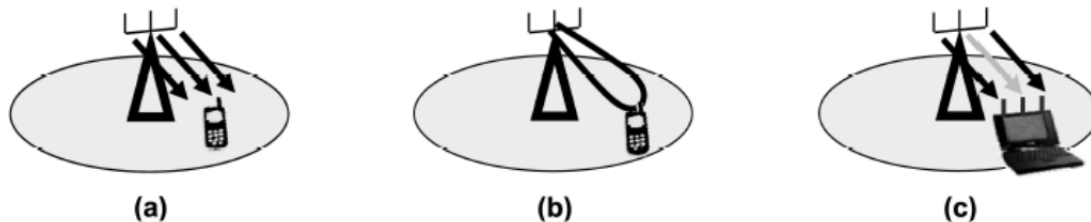
Average Ratio (PAR) σήματος. Ο λόγος PAR είναι πολύ καθοριστικός δείκτης για τον ανερχόμενο σύνδεσμο, και σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, η SC-OFDM τεχνική επιτρέπει υψηλή απόδοση και μικρή πολυπλοκότητα υλοποίησης της κεραίας του σταθμού βάσης. Εν γένει, η SC-OFDM τεχνική επιφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στον ανερχόμενο σύνδεσμο, κυρίως όταν ο χρήστης βρίσκεται κοντά στον σταθμό βάσης.

2.5.2 Τεχνολογία πολλαπλών κεραιών (MIMO systems)

Μια ακόμη τεχνολογία που υπόσχεται ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη κάλυψη δικτύου και αυξημένη χωρητικότητα στην τεχνολογία LTE είναι αυτή των πολλαπλών κεραιών. Η χρήση τους επιτρέπει την εκμετάλλευση του πεδίου του χώρου (spatial domain), έχοντας σαν αποτέλεσμα η απόδοση φάσματος να αυξάνει γραμμικά με την αύξηση των κεραιών εκπομπής και λήψης.

Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το πλήθος των κεραιών που υπάρχουν στον πομπό και στο δέκτη (SIMO, MISO, MIMO), ή ανάλογα τον τρόπο σύνδεσης του συστήματος κεραιών με τον UE (Single-User για p-t-p και Multi-User για p-t-m). Όλοι αυτοί στηρίζονται σε τρεις βασικές αρχές οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10 και είναι οι ακόλουθες:

- **Diversity gain:** Χρήση της ποικιλομορφίας στο χώρο που παρέχεται από τις πολλαπλές κεραίες, έτσι ώστε να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα της μετάδοσης ενάντια στην εξασθένηση λόγω των πολλών διαδρομών (multipath fading).
- **Array gain:** Συγκέντρωση της ενέργειας σε μία ή περισσότερες κατευθύνσεις (επιτρέπει την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλαπλών χρηστών που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία MU-MIMO).
- **Spatial Multiplexing gain:** Μετάδοση πολλαπλών ροών (signal stream) σε ένα χρήστη σε πολλαπλά επίπεδα χώρου που έχουν δημιουργηθεί από τις διαθέσιμες κεραίες.



Σχήμα 2.10 Πλεονεκτήματα Πολλαπλών Κεραιών

Ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση της μετάδοσης πολλαπλής εισόδου-πολλαπλής εξόδου (**Multiple Input – Multiple Output**) στην οποία συχνά περικλείονται και οι SIMO και MISO σαν ειδικές περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία MIMO συνίσταται στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών (κεραιοσυστημάτων) τόσο στον πομπό - σταθμό βάσης όσο και στον δέκτη - UE. Σε πρώτη φάση υποστηρίζεται η ύπαρξη MIMO κεραιοσυστημάτων 2x2 (δύο κεραίες στο σταθμό βάσης και δύο κεραίες στη συσκευή του χρήστη) για την επίτευξη υψηλής απόδοσης, ενώ είναι δυνατό να γίνει χρήση συστημάτων MIMO 4x4.

2.6 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 καθυστέρηση. Το εύρος ζώνης 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 2.8.

| Δείκτες απόδοσης | Προδιαγραφές |
|----------------------------------|---|
| Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης | DL: 100Mbps UL: 50Mbps (για εύρος ζώνης 20 MHz) |
| Υποστήριξη κινητικότητας χρηστών | >500 Km/h Βέλτιστη χρήση δικτύου για ταχύτητες από 0 έως 15 km/h |
| Καθυστέρηση ελέγχου | < 100ms (για πλήρη ενεργοποίηση ελέγχου) |
| Καθυστέρηση χρήστη (αντιληπτή) | < 5ms |
| Χωρητικότητα ελέγχου | >200 χρήστες/ κελί (για εύρος ζώνης 5MHz) |
| Κάλυψη | 5-100Km (υποβάθμιση ποιότητας για απόσταση μεγαλύτερη των 30Km) |

Πίνακας 2.8 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 η ρυθμαπόδοση όσο και η αποδοτικότητα του φάσματος είναι σημαντικά βελτιωμένα σε σχέση με το UMTS (UTRAN) υπερκαλύπτοντας τις απαιτήσεις απόδοσης που απαιτούνται.

2.7 Λειτουργία, συντήρηση και ασφάλεια

Μία από τις βασικότερες απαιτήσεις είναι η μείωση των λειτουργικών δαπανών. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζουν τα αυτό-διαχειριζόμενα 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 απαιτήσεις για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη (φορητές συσκευές τηλεόρασης, βιντεοκάμερες) και απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση (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 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

2.8 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

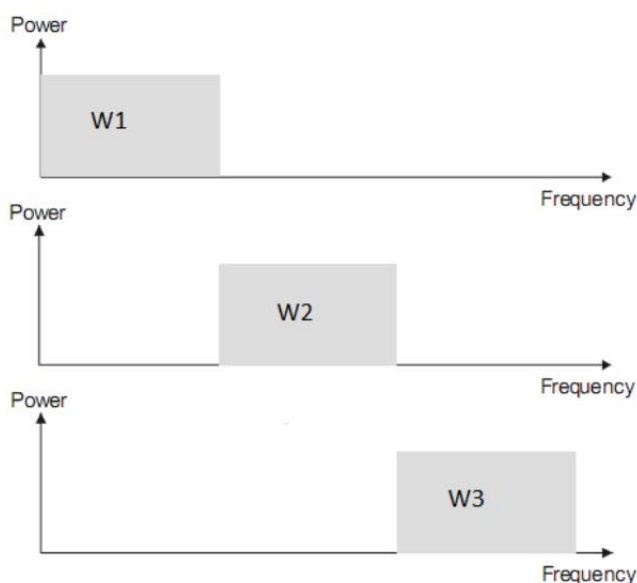
Η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας αποτελεί μία μέθοδο ICIC (Inter-Cell Interference Coordination). Ειδικότερα, χρησιμοποιώντας κατάλληλα τους διαθέσιμους πόρους και εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας, γίνονται προσπάθειες να μειωθεί η ICI. Αυτό έχει σαν έμμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, για να υπάρχει σφαιρική άποψη του θέματος καλό είναι να

αναφερθούν, έστω επιγραμματικά, κάποια μειονεκτήματα που έχουν να κάνουν με τη συγκεκριμένη διαδικασία. Καταρχάς, το δίκτυο επιβαρύνεται από επιπλέον διεργασίες όπως η επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων του δικτύου, αλλά και η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Επίσης, περιορίζοντας τον αριθμό των RB που χρησιμοποιούνται κάθε στιγμή επιτυγχάνεται μεν η μείωση των επιβλαβών συγκρούσεων, αλλά ταυτόχρονα έχουμε κακή χρήση των παρεχόμενων πόρων. Τέλος, στην προσπάθεια αύξησης της ρυθμιζόμενης του κελιού, είναι πιθανό να γίνει άδικη, για κάποιους χρήστες, κατανομή των πόρων οδηγώντας σε καταπάτηση των QoS που πρέπει να προσφέρονται. Για όλα αυτά τα προβλήματα υπάρχουν λύσεις μειώνοντας στο ελάχιστο τα μειονεκτήματα και αυτό κάνει ακόμα πιο ενδιαφέρουσα την ICIC.

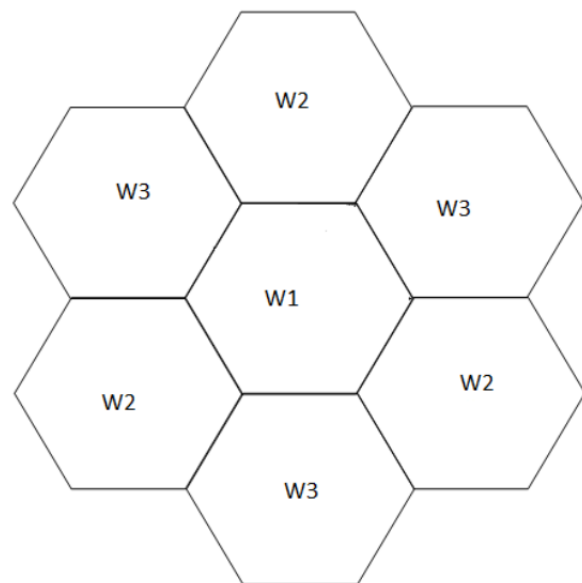
Τα σχήματα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι τα full, hard (HFR), soft (SFR) και fractional frequency reuse (FFR). Η περίπτωση του full frequency reuse είναι όταν ολόκληρο το παρεχόμενο εύρος ζώνης χρησιμοποιείται από κάθε κυψέλη, χωρίς περιορισμούς. Ακολουθεί η ανάλυση των υπολοίπων σχημάτων.

2.8.1 Hard Frequency Reuse

Το φάσμα συχνοτήτων χωρίζεται σε ένα πλήθος διακεκριμένων υποφασμάτων (sub-bands) σύμφωνα με τον επιλεγμένο παράγοντα επαναχρησιμοποίησης (reuse factor) και τα γειτονικά κελιά είναι αναγκασμένα να εκπέμπουν το καθένα σε διαφορετικό υποφασμά. Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης στο παράδειγμα που ακολουθεί είναι 3.



Σχήμα 2.11 Διαχωρισμός εύρους ζώνης



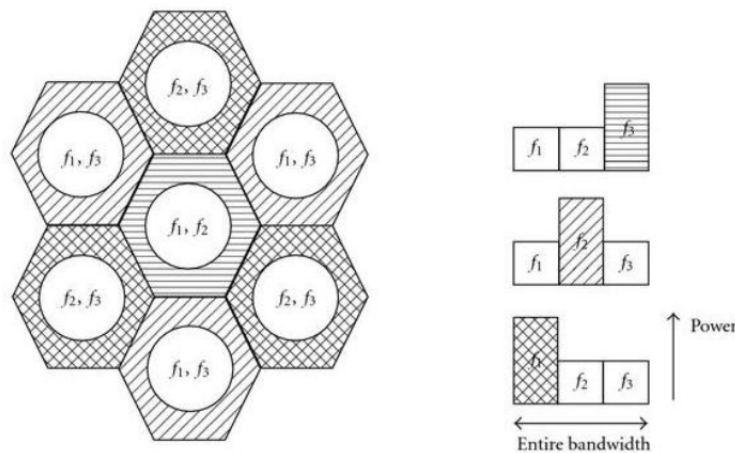
Σχήμα 2.12 Ανάθεση συχνοτήτων στα κελιά

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται ο διαχωρισμός του εύρους ζώνης σε τρία διακεκριμένα υποφάσματα, ενώ στο σχήμα 2.12 φαίνεται η ανάθεση των υποφασμάτων στις κυψέλες του δικτύου.

Μία ιδιαίτερα σημαντική παρατήρηση είναι ότι ναι μεν μειώνουμε δραστικά το ICI, αφού σε κάθε κελί η χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι διαφορετική από το γειτονικό κελί, ωστόσο γίνεται μεγάλη σπατάλη πόρων. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι σε κάθε κυψέλη η εκπομπή γίνεται μόνο από το 1/3 του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης.

2.8.2 Soft Frequency Reuse

Σε αυτή την περίπτωση είναι ανάγκη να εισάγουμε μία νέα έννοια όσο αφορά το διαχωρισμό των χρηστών που βρίσκονται στην κυψέλη. Θεωρούμε ότι η κυψέλη χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα τμήμα αποτελείται από τα σημεία που βρίσκονται στην άκρη της κυψέλης (cell edge) και το άλλο τμήμα αποτελείται από την υπόλοιπη κυψέλη, δηλαδή τα σημεία όπου βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο (cell center). Ανάλογα με το σημείο που βρίσκεται ο χρήστης λέγεται cell edge user ή cell center user αντίστοιχα. Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η περίπτωση του SFR. Παρατηρούμε ότι το φάσμα χωρίζεται και πάλι σε ένα πλήθος υποφασμάτων (τρία στην προκειμένη περίπτωση) ορθογώνιων μεταξύ τους. Σε κάθε γειτονική κυψέλη αντιστοιχίζεται ένα από αυτά τα υποφάσματα έτσι ώστε να εξυπηρετούνται οι cell edge users, ωστόσο και πάλι δίνεται ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε όλα τα γειτονικά κελιά να χρησιμοποιούν διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων και έτσι να μειώνεται το φαινόμενο της ICI. Όσον αφορά το εσωτερικό της κυψέλης, είναι δυνατό να χρησιμοποιείται κάποια συχνότητα που είναι κοινή με αυτή που έχει ανατεθεί στην εξωτερική περιοχή μιας γειτονικής κυψέλης, αλλά αυτό γίνεται με μειωμένη ισχύ. Το κέρδος σε αυτή την περίπτωση είναι διπλό. Καταρχάς γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των παρεχόμενων πόρων, αφού σε κάθε κυψέλη είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί όλο το παρεχόμενο εύρος ζώνης. Επιπρόσθετα, η μειωμένη ισχύς στο κέντρο της κυψέλης δεν δημιουργεί παρεμβολές στην εξωτερική ζώνη του γειτονικού κελιού.



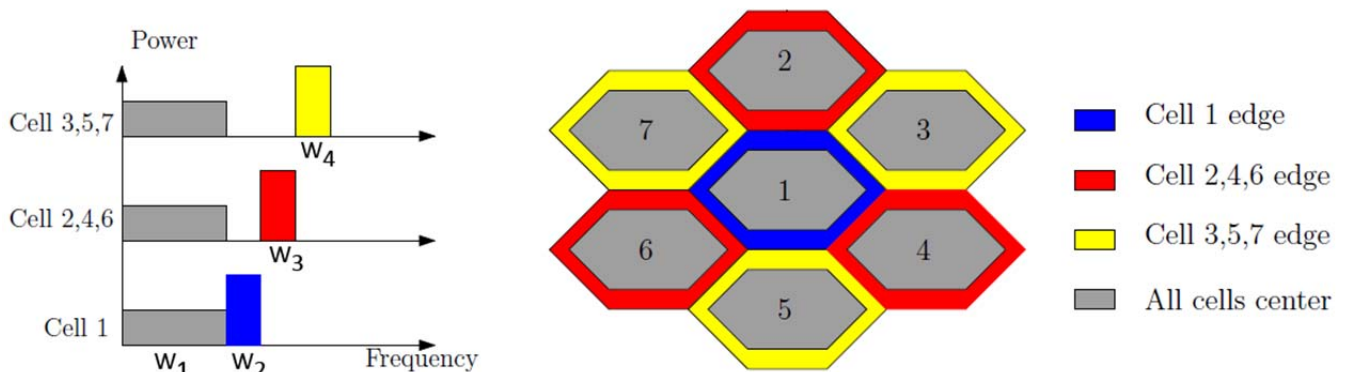
Σχήμα 2.13 Διαχωρισμός εύρους ζώνης και ανάθεση συχνοτήτων στην SFR

Επικεντρώνοντας και πάλι στο παράδειγμα και στην περίπτωση της κεντρικής κυψέλης, βλέπουμε ότι το εξωτερικό εκπέμπει μόνο στην f_3 συχνοτική ζώνη η οποία μάλιστα είναι διαφορετική και στα έξι γειτονικά κελιά, ενώ στο εσωτερικό του μπορεί να εκπέμπει σε κοινές συχνότητες με το εξωτερικό τμήμα των γειτονικών κελιών (f_2 και f_3), αυτό όμως γίνεται με μειωμένη ισχύ.

2.8.3 Fractional Frequency Reuse

Χρησιμοποιώντας και πάλι το διαχωρισμό που έγινε νωρίτερα για τις περιοχές ενός κελιού και τους αντίστοιχους χρήστες, η συγκεκριμένη υποενοότητα είναι αφιερωμένη στην περιγραφή της FFR. Όσον αφορά το διαχωρισμό του παρεχόμενου εύρους ζώνης, έχουμε και πάλι υποφάσματα τα οποία είναι αμοιβαίως αποκλειόμενα. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι ο διαχωρισμός γίνεται σε δύο κατηγορίες αυτή τη φορά. Η μία αποτελεί το εύρος ζώνης που εξυπηρετεί το εσωτερικό μέρος του κελιού και η άλλη το εξωτερικό. Στη συνέχεια, το εύρος ζώνης που πρόκειται να χρησιμοποιήσει το εξωτερικό μέρος του τμήματος υπόκειται σε επιπλέον διαχωρισμό με παράγοντα επαναχρησιμοποίησης μεγαλύτερο του 1. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14, το συχνοτικό περιεχόμενο W_1 αποτελεί το εύρος ζώνης που πρόκειται να εξυπηρετήσει το εσωτερικό μέρος, ενώ το υπόλοιπο εύρος ζώνης χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα (W_2 , W_3 και W_4), αφού στο παράδειγμά μας θα υποθέσουμε ότι έχουμε παράγοντα επαναχρησιμοποίησης 3 για το εξωτερικό τμήμα του κελιού. Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι για τη συχνότητα που ανατίθεται στο εσωτερικό μέρος του κελιού έχουμε

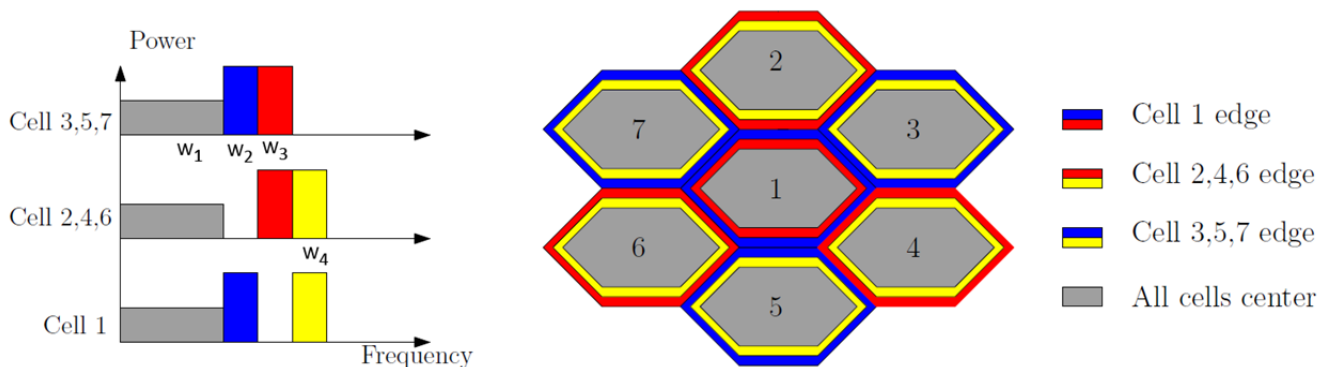
επαναχρησιμοποίηση 1, ενώ για το υπόλοιπο συχνοτικό περιεχόμενο (το οποίο ανατίθεται στην εξωτερική περιοχή) έχουμε επαναχρησιμοποίηση K.



Σχήμα 2.14 Διαχωρισμός - Ανάθεση συχνοτήτων για FFR

Στο σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η ανάθεση των συχνοτήτων στα κελιά με βάση την FFR. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα W_1 είναι κοινή για όλες τις περιοχές που εξυπηρετούν τους cell center users, ενώ στο εξωτερικό μέρος του κελιού χρησιμοποιείται μία εκ των W_2 , W_3 και W_4 με τον περιορισμό να μην είναι κοινή σε γειτονικές κυψέλες.

Πράγματι, στην κυψέλη 1 οι cell edge UEs εξυπηρετούνται από το συχνοτικό περιεχόμενο W_4 (πράσινο) και σε όλα τα γειτονικά κελιά χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες. **Χρησιμοποιώντας διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων για τους cell edge users που βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες, επιτυγχάνεται ο στόχος που δεν είναι άλλος από τη μείωση της ICI.** Είναι σημαντικό ότι (όπως και στην περίπτωση του soft reuse) παρά το γεγονός ότι στην εσωτερική περιοχή του κελιού χρησιμοποιούνται ίδιες συχνότητες, **η απόσταση από την εσωτερική περιοχή του γειτονικού κελιού είναι αρκετά μεγάλη και αυτό μειώνει το φαινόμενο της ICI.** Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζουμε μία εναλλακτική υλοποίηση FFR, η οποία προτείνεται στο εγχειρίδιο 9 της βιβλιογραφίας. Ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης στην εν λόγω περίπτωση είναι 1.5 και έτσι έχουμε 50% καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων έναντι του κλασσικού FFR (σχήμα 2.14) το οποίο έχει παράγοντα επαναχρησιμοποίησης 3.



Σχήμα 2.15 Διαφορετική υλοποίηση FFR

Κεφάλαιο 3 Παρεμβολή ψηφιακής τηλεόρασης από σήμα κινητής τηλεφωνίας (LTE)³

3.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε σε θεωρητικό επίπεδο τα πρότυπα της ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T) καθώς και διάφορα πρωτόκολλα και τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας. Σε αυτό το κεφάλαιο, **θα μελετήσουμε με πειραματικό τρόπο τις παρεμβολές που μπορεί να υπάρχουν ανάμεσα στις δύο τεχνολογίες (ψηφιακή τηλεόραση και κινητή τηλεφωνία) και το κατά πόσο επηρεάζει η εκπομπή σημάτων κινητής τηλεφωνίας την λήψη επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης.** Οι μετρήσεις διεξήχθησαν στο χώρο του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

3.2 Όργανα μέτρησης

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- **Φορητός αναλυτής σήματος Promax TV explorer II**
- **Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A**
- **Γεννήτρια ηλεκτρικού σήματος Rohde&Schwarz SMBV100A**

³ Πηγές κεφαλαίου

Μελέτη παρεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες τέταρτης γενιάς (4G) LTE FDD, Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2011

Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολής στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες (LTE FDD, LTE TDD, CDMA 2000), Γεώργιος Δ. Μαμαρέλης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2010

Promax TV Explorer II manual, Promax

Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A manual, Anritsu

Γεννήτρια Rohde&Schwarz SMBV100A quick start guide, Rohde & Schwarz

Κεραία BicoLOG 20300 datasheet, Aaronia

Κεραία Schaffner CBL6141A datasheet & specifications, Test equipment connection

MEASUREMENTS ON THE PERFORMANCE OF DVB-T RECEIVERS IN THE PRESENCE OF INTERFERENCE FROM THE MOBILE SERVICE (ESPECIALLY FROM LTE), Marseille June 2010, Electronic Communications Committee (ECC)

Η σωστή ερμηνεία των μετρήσεων MER CBER & VBER, Θανάσης Κυριακόπουλος, ΤΕΧΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Φορητός Αναλυτής Σήματος DVB-T

Εικόνα 3.1 Φορητός Αναλυτής Σήματος DVB-T Promax TV explorer II

Χαρακτηριστικά Φορητού Αναλυτή Σήματος DVB-T Promax-TV Explorer II

- Συντονισμός (από κανάλι ή συχνότητα)
- Κάλυψη επίγειων, δορυφορικών, καλωδιακών και κινητών σημάτων
- Λειτουργίες τηλεόρασης (Αναλυτής φάσματος, μετρήσεις, αποκωδικοποιητής σήματος)
- Αυτόματος προσδιορισμός τύπου σήματος
- Αυτόματη ρύθμιση του επιπέδου αναφοράς
- Διαγράμματα αστερισμού DVB-T / DVB-H / DVB-C / DVB-S / DVB-S2
- Οθόνη 6.5" LCD TFT 16:9
- Αυτόματες μετρήσεις και αναφορές μετρήσεων
- Επιπλέον λειτουργίες (κρυπτογραφημένα κανάλια, καταγραφή και αναπαραγωγή βίντεο, 1 GB εσωτερική μνήμη, αυτόματες αναβαθμίσεις μέσω διαδικτύου κ.α.)

| 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 |

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά δέκτη Promax TV Explorer II

Ο τηλεοπτικός δέκτης λάμβανε το σήμα σε κεντρική συχνότητα 666 MHz (662-670 MHz) στο κανάλι 45 UHF που εκπέμπουν οι σταθμοί ATTICA, EXTRA 3, HIGH TV, NICKELODEON το πρόγραμμά τους.

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν μέσω του τηλεοπτικού δέκτη είναι:

- **C/N**: Είναι ο λόγος του φέροντος σήματος προς τον θόρυβο.
- **Ένταση καναλιού**: Η ένταση καναλιού μετριέται υποθέτοντας ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι ομοιόμορφη σε όλο το εύρος ζώνης καναλιού.
- **MER**: Ο ρυθμός λαθών διαμόρφωσης (modulation error ratio). Ο ρυθμός λαθών διαμόρφωσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος των μεταδιδόμενων συμβόλων (P_s) του αστερισμού προς την ισχύ του σφάλματος διαμόρφωσης (P_e). Το σφάλμα διαμόρφωσης είναι η διανυσματική διαφορά μεταξύ του ιδανικού συμβόλου και του μεταδιδόμενου.
- **CBER**: Μέτρηση (Bit error rate, ρυθμός λανθασμένων bit: Ο ρυθμός λανθασμένων bit εκφράζει το πόσο συχνά λαμβάνουμε ένα λανθασμένο bit στην εισερχόμενη ροή δεδομένων) για το ψηφιακό σήμα πριν την διόρθωση λαθών (Forward Error Correction) (BER before FEC)
- **VBER**: Μέτρηση (Bit error rate) για το ψηφιακό σήμα μετά την διόρθωση λαθών (BER after Viterbi).

Κεραία Profitec DVB-1700N DVB-T PASSIVE VHF/UHF συνδεόμενη στον φορητό αναλυτή σήματος



Εικόνα 3.2 Κεραία Profitec DVB-1700N DVB-T

Χαρακτηριστικά κεραίας Profitec DVB-1700N: Αναζητήθηκαν τα χαρακτηριστικά της κεραίας στο διαδίκτυο χωρίς επιτυχία. Έτσι για τους μετέπειτα θεωρητικούς υπολογισμούς θα θεωρήσουμε ότι έχει κέρδος **2,15 dBi** (ενδεικτική τιμή κέρδος διπόλου).

Αναλυτής Φάσματος Anritsu MS2721A



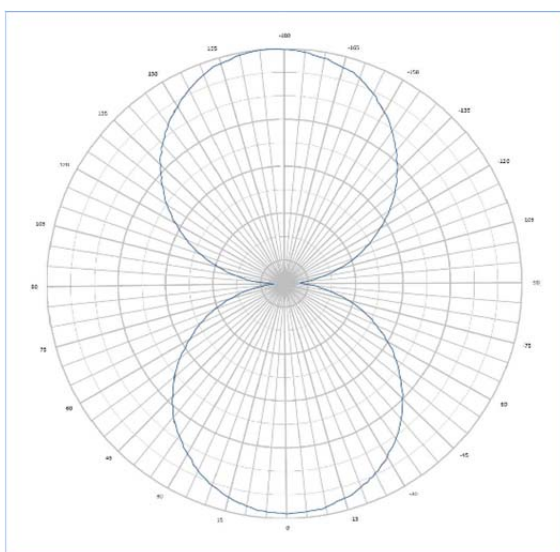
Εικόνα 3.3 Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A

Χαρακτηριστικά αναλυτή φάσματος Anritsu MS2721A: Συχνότητες λήψης από 100 KHz έως 7,1 GHz

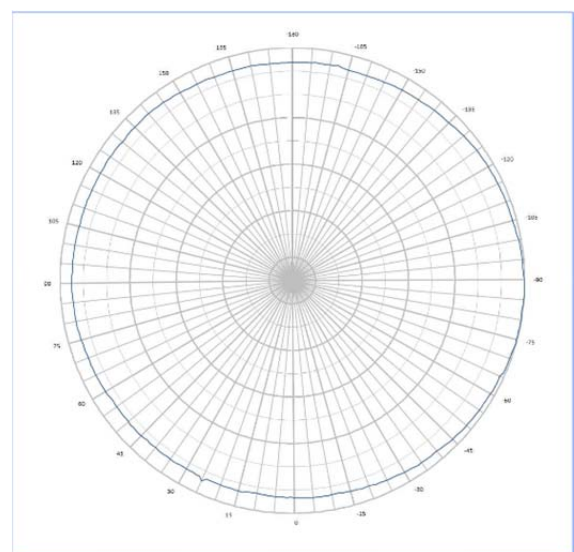
Κεραία BicoLOG 20300 συνδεόμενη στον Αναλυτή Φάσματος



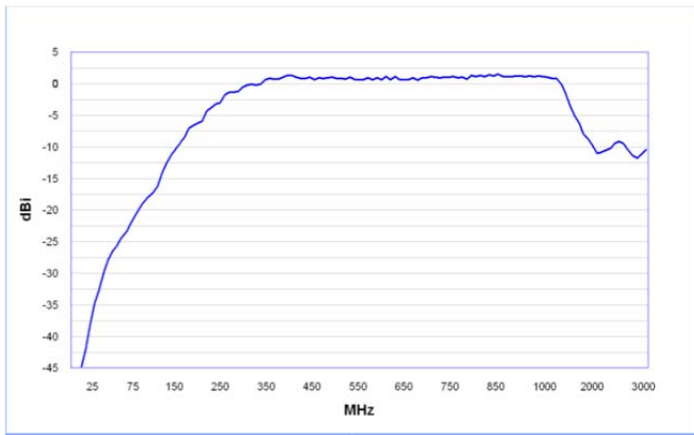
Εικόνα 3.4 Κεραία λήψης BicoLOG 20300



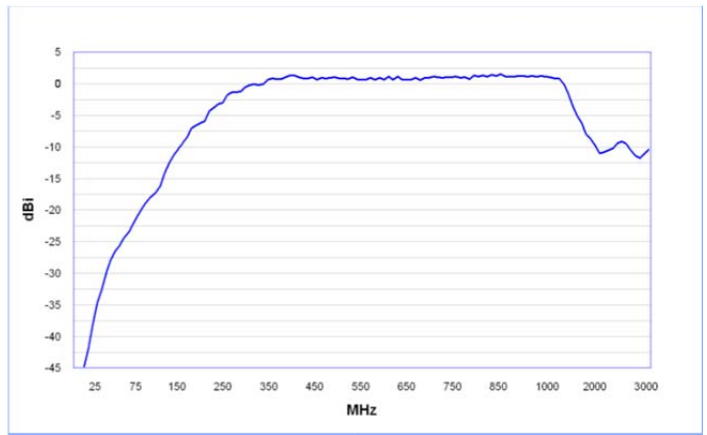
Σχήμα 3.1 Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας BicoLOG 20300



Σχήμα 3.2 Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας BicoLOG 20300



Σχήμα 3.3 Κέρδος κεραίας λήψης BicoLOG 20300



Σχήμα 3.4 Παράγοντας κεραίας (antenna factor) κεραίας λήψης BicoLOG 20300

| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Μοντέλο | INOX |
| Περιοχή συχνοτήτων | 20 MHz – 3 GHz |
| Μέγιστη ισχύς | 1 W (30 dBm ή 0 dBW) |
| Ονομαστική αντίσταση | 50 Ohm |
| Κέρδος (G) | από -45 dBi έως 1 dBi |
| Κέρδος στην συχνότητα 666 MHz | 2 dBi |
| Παράγοντας κεραίας (AF) | 20 - 51 dB/m |
| Σημεία βαθμονόμησης | 296 (Διαστήματα 5 MHz ή 10 MHz) |
| Σύνδεση RF | SMA υποδοχή (18 GHz) ή N |
| Σύνδεση τρίποδα | 1/4" |
| Διαστάσεις (Μ/Π/Υ) | 350x160x140 mm |
| Βάρος | 350 gr |

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά κεραίας λήψης BicoLOG 20300
Γεννήτρια Ηλεκτρικού Σήματος Rohde&Schwarz SMBV100A



Εικόνα 3.5 Γεννήτρια ηλεκτρικού σήματος Rohde&Schwarz SMBV100A

Χαρακτηριστικά Γεννήτριας Ηλεκτρικού Σήματος Rohde&Schwarz SMBV100A

- Συχνότητες εκπομπής 9 KHz έως 3,2/6 GHz
- Ισχύς εκπομπής -145 dBm έως +18 dBm

Μέσω του λογισμικού WinIQSIM2™ που παρέχεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας κατασκευάσαμε σήμα LTE οι προδιαγραφές του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

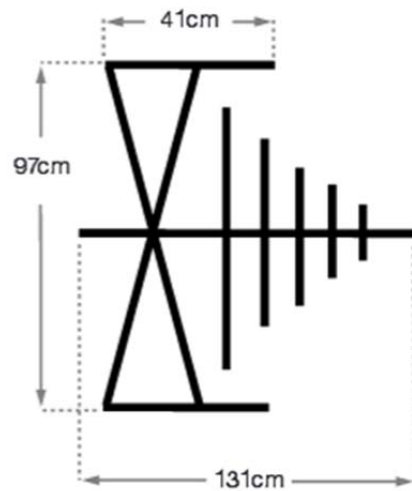
| Ρυθμίσεις | Τιμές |
|---|------------------|
| 3GPP Version | Release 10 |
| Duplexing | FDD |
| Link Direction | Downlink (OFDMA) |
| Sequence length | 1 Frames |
| MBSFN Mode | Off |
| Channel Bandwidth | 5 MHz |
| Physical Resource Block Bandwidth | 12*15 KHz |
| Number of Resource blocks per slot | 25 |
| FFT Size | 512 |
| Occupied Bandwidth | 4.515 MHz |
| Sampling Rate | 7.660 MHz |
| Number of occupied subcarriers | 301 |
| Number of Left Guard Subcarriers | 106 |
| Number of right Guard Subcarriers | 105 |
| PDSCH Scheduling | Manual |
| Global MIMO Configuration | 1 TxAntenna |
| Simulated Antenna | Antenna 1 |
| Cell Id | 0 |
| Physical Cell Id group | 0 |
| Physical Layer Id | 0 |
| Cyclic Prefix | Normal |
| PDSCH P_B | 0 |
| PDSCH Ratio rho_B/rho_A | 0 dB |
| PDSCH Ratio rho_B/rho_A | 0 dB |
| PBCH Ratio rho_B/rho_A | 0 dB |
| PHICH duration | Normal |
| PHICH N_g | 1/6 |
| RA_RNTI | 1 |
| Reference Signal Power | 0 dB |
| RS Power per RE relative to Level Display | -24.71 dB |
| P-/S-SYNC Tx Antenna | All |
| P-SYNC Power | 0 dB |
| S-SYNC Power | 0 dB |
| PRS State | unchecked |
| PRS Configuration Index | 0 |
| PRS Periodicity T_PRS | 160 |
| PRS Subframe offset Delta_PRS | 0 |
| Number of PRS DL Subframes (N_PRS) | 1 |
| PRS Bandwidth | 5 MHz |
| PRS Power | 0 dB |
| PRS Muting Info | 11 |

Πίνακας 3.3 Προδιαγραφές σήματος παρεμβολής LTE

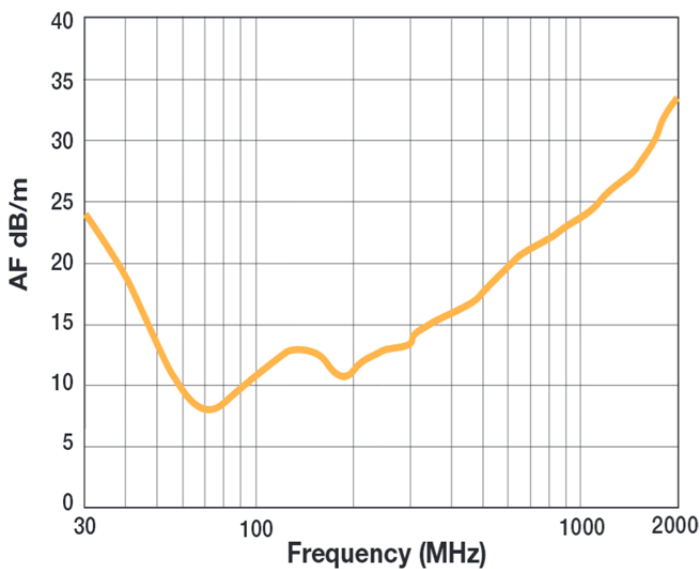
Κεραία Schaffner CBL6141A συνδεδεμένη στην Γεννήτρια



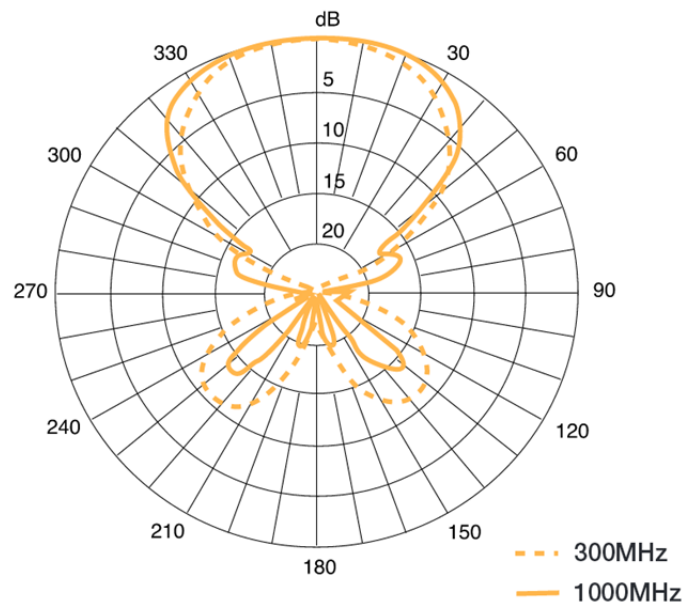
Εικόνα 3.6 Σκαρίφημα κεραίας εκπομπής Schaffner CBL6141A



Σχήμα 3.5 Σκαρίφημα κεραίας εκπομπής Schaffner CBL6141A



Σχήμα 3.6 Παράγοντας κεραίας (antenna factor) κεραίας λήψης Schaffner CBL6141A



Σχήμα 3.7 Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας Schaffner CBL6141A

| Χαρακτηριστικά | Τιμή |
|-------------------------------|------------------|
| Περιοχή συχνοτήτων | 30 MHz – 2 GHz |
| Κέρδος στην συχνότητα 666 MHz | 4,68 dBi |
| Ονομαστική αντίσταση | 50 Ω |
| Τύπος σύνδεσης | N τύπου (θηλυκό) |
| VSWR | 2:1 μέση τιμή |
| Μέγιστη ισχύς εκπομπής | 300 W |
| Διαστάσεις (Μ/Π/Υ) | 135x97x41 mm |
| Βάρος | 3,5 kg |

Πίνακας 3.4 Χαρακτηριστικά κεραίας λήψης Schaffner CBL6141A

3.3 Μεγέθη που μετρήθηκαν - Διαδικασία λήψεως μετρήσεων - Κατώφλια μεγεθών

Αρχικά, μετρήσαμε το ψηφιακό σήμα της τηλεόρασης χωρίς παρεμβολή. Συγκεκριμένα μετρήθηκαν μέσω του φορητού αναλυτή σήματος Promax TV Explorer II τα ακόλουθα μεγέθη:

- Σηματοθορυβικός λόγος SNR (dB)
- Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου (E) (dBμV/m)
- Ρυθμός λαθών διαμόρφωσης MER (dB)
- Ρυθμός λανθασμένων bit CBER
- Ρυθμός λαθών μετά την διόρθωση λαθών (BER after Viterbi) VBER

ενώ μέσω του αναλυτή φάσματος Anritsu μετρήσαμε τα ακόλουθα μεγέθη:

- Ισχύς καναλιού (Channel Power) (dBm)
- Πυκνότητα ισχύος καναλιού (Channel Power density) (dBm/Hz)

Έπειτα μέσω των ίδιων οργάνων μετρήσαμε τα ίδια μεγέθη, αλλά υπό την παρουσία παρεμβολής. Το πείραμα χωρίστηκε σε δύο μέρη. Στην πρώτη περίπτωση το σήμα παρεμβολής ήταν μονοχρωματικό, ενώ στην δεύτερη το σήμα παρεμβολής ήταν LTE εύρους ζώνης 8 MHz.

Στην περίπτωση του μονοχρωματικού σήματος αρχικά ρυθμίσαμε την γεννήτρια να εκπέμπει σήμα παρεμβολής σταθερής ισχύος (0 dBm) και μεταβάλλαμε σταδιακά την συχνότητα εκπομπής από 662 MHz έως 670 MHz με βήμα 1 MHz. Εν συνεχεία, ρυθμίσαμε την γεννήτρια να εκπέμπει σήμα παρεμβολής σταθερής συχνότητας (666 MHz) και μεταβάλλαμε σταδιακά την ισχύ εκπομπής από 0 dBm έως -20 dBm.

Στην περίπτωση του σήματος LTE αρχικά ρυθμίσαμε την γεννήτρια να εκπέμπει σήμα παρεμβολής σταθερής ισχύος (0 dBm) και μεταβάλλαμε σταδιακά την συχνότητα εκπομπής από 659 MHz έως 673 MHz με βήμα 1 MHz. Εν συνεχεία, ρυθμίσαμε την γεννήτρια να εκπέμπει σήμα παρεμβολής σταθερής συχνότητας (666 MHz) και μεταβάλλαμε σταδιακά την ισχύ εκπομπής από 0 dBm έως -20 dBm.

Αναζητήθηκαν και βρέθηκαν οι απαιτούμενες τιμές για τα μεγέθη SNR, MER, BER, VBER, E για την επίγεια ψηφιακή τηλεόραση και παρουσιάζονται στον κάτωθι πίνακα.

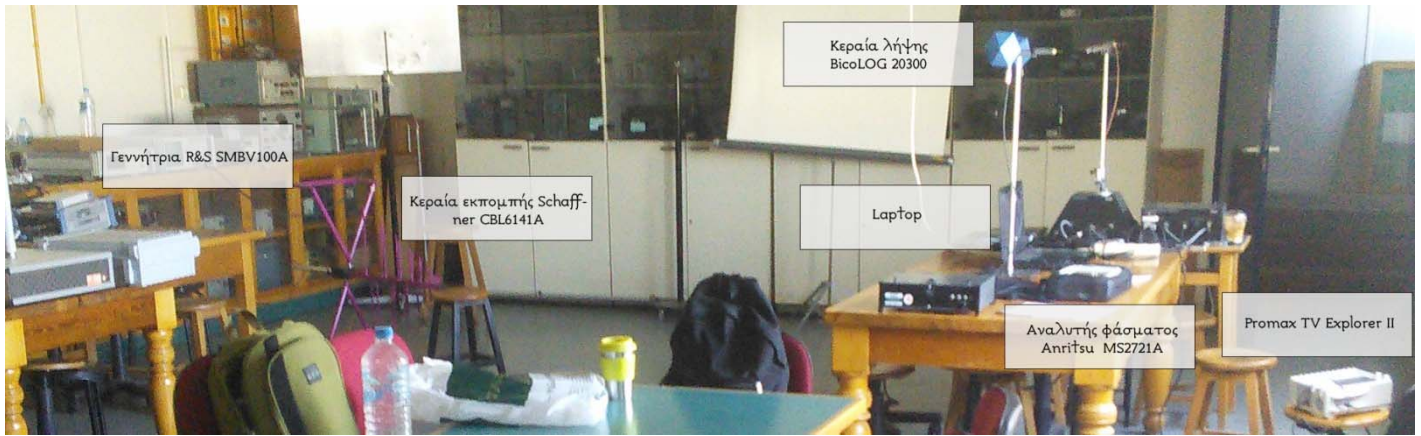
| Κατώφλια | Τιμές |
|------------------------------|-----------|
| SNR | 16,7 dB |
| MER | 13 dB |
| BER | 1E-2 |
| VBER | 2E-4 |
| Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου (E) | 54 dBμV/m |

Πίνακας 3.5 Ενδεικνυόμενες τιμές κατωφλίων

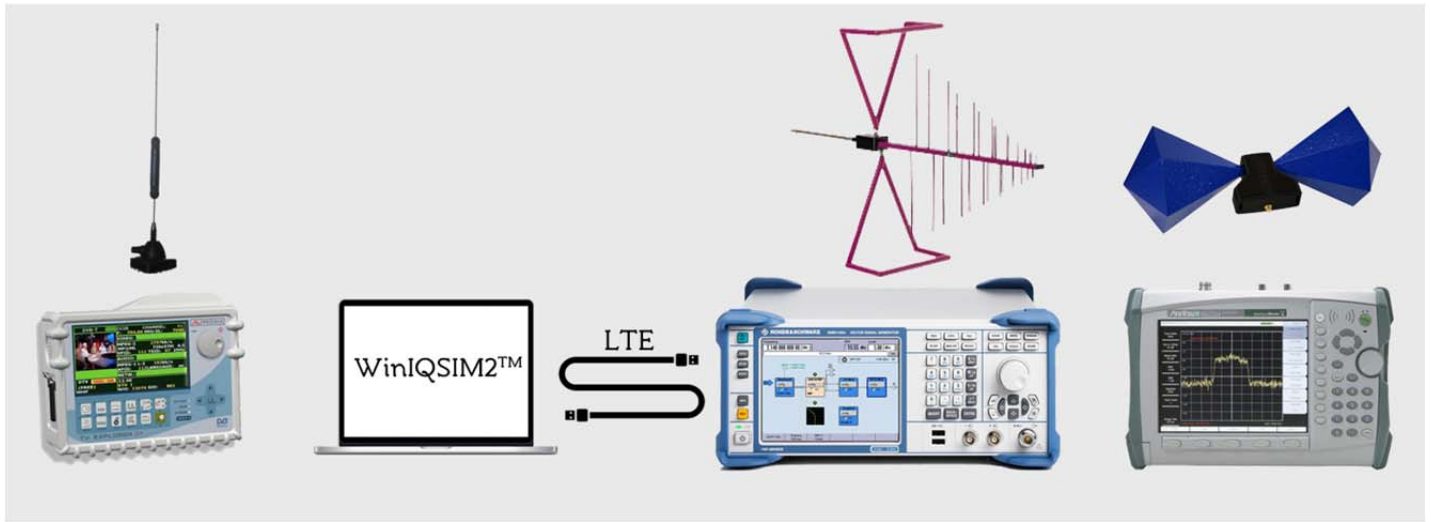
Οι ανωτέρω τιμές είναι ενδεικτικές αφού τα κατώφλια εξαρτώνται και από τα χαρακτηριστικά του τηλεοπτικού δέκτη.

3.4 Πειραματική Διάταξη

Παρουσιάζουμε τη διάταξη των οργάνων σε μορφή φωτογραφίας και σχήματος, όπως χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.



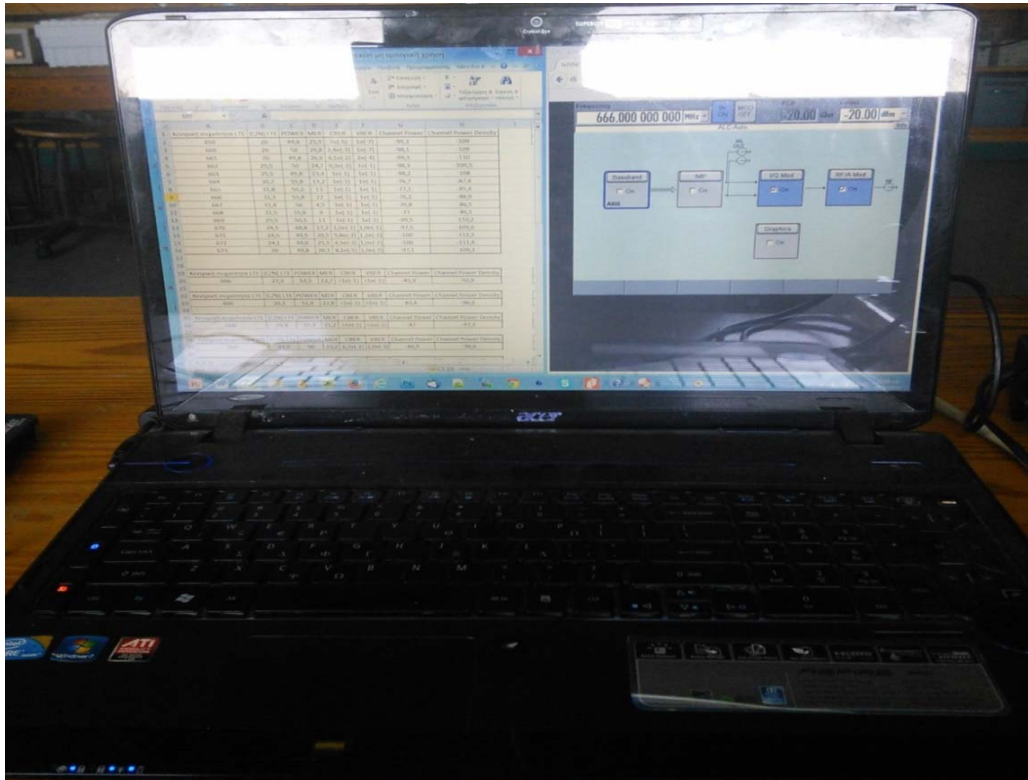
Εικόνα 3.7 Πειραματική διάταξη (α)



Σχήμα 3.8 Πειραματική διάταξη (β)



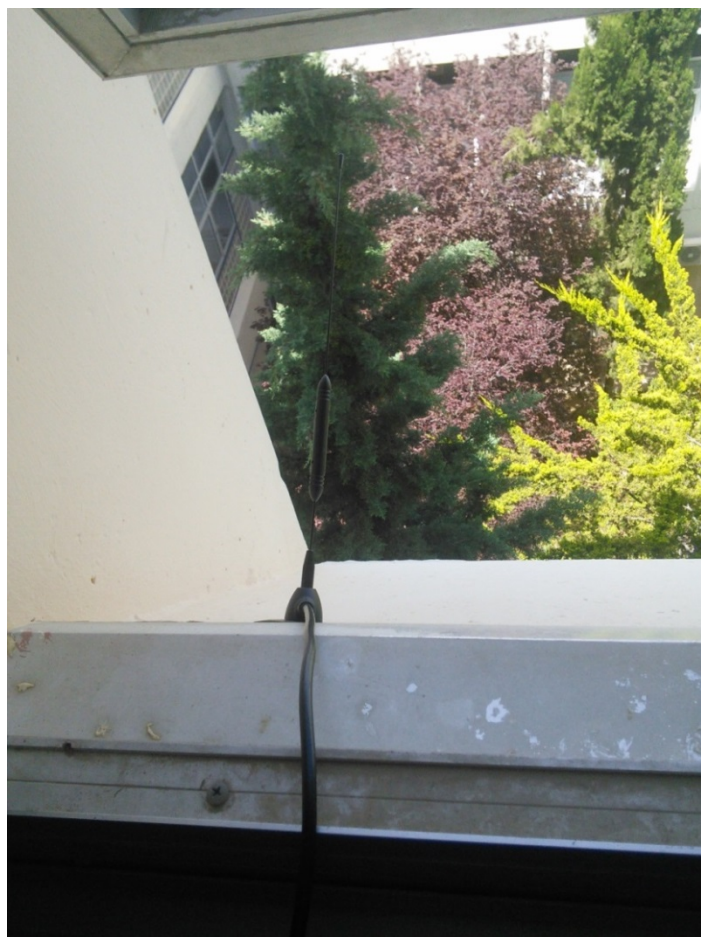
Εικόνα 3.8 Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A



Εικόνα 3.9 Laptop που χρησιμοποιήθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος



Εικόνα 3.10 Τηλεοπτικός δέκτης Promax TV explorer II



Εικόνα 3.11 Κεραία λήψης Profitec DVB-1700N DVB-T



Εικόνα 3.12 Κεραία λήψης BicoLOG 20300

3.5 Θεωρητικό υπόβαθρο για την αντιπαράβολή των μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο έτσι ώστε να έχουμε την δυνατότητα σύγκρισης των μετρούμενων τιμών με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές.

Αρχικά μέσω του αναλυτή φάσματος Anritsu MS2721A μετρήσαμε την φασματική πυκνότητα στάθμης θορύβου $N_0 = -90 \text{ dBm/Hz}$ γύρω από το κανάλι. Έπειτα, δεδομένου ότι το εύρος ζώνης του DVB-T καναλιού είναι $B = 8 \text{ MHz}$ υπολογίσαμε την ισχύ θορύβου

$$N_{dBm} = N_0 * 10 \log(B^6) \approx -104 \text{ dBm} \quad 3.5.1$$

Η ενεργά ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς $EIRP$ υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$EIRP = P_{dBm}^{Gen} - L_{dB}^c + G_{dBi}^{Gen} \quad 3.5.2$$

όπου P_{dBm}^{Gen} η ισχύς εκπομπής της γεννήτριας, L_{dB}^c οι απώλειες του ομοαξονικού καλωδίου της γεννήτριας της οποίες και θεωρούμε μηδενικές και $G_{dBi}^{Gen} = 4,68 \text{ dBi}$ το κέρδος της κεραίας εκπομπής Schaffner CBL6141A το οποίο εξήχθη από το διάγραμμα 3.5. Έτσι Η ενεργά ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς που εκπέμπει η γεννήτρια στον χώρο είναι

$$EIRP = (P_{dBm}^{Gen} + 4,68) \text{ dBm} \quad 3.5.3$$

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου (FSPL) υπολογίζονται μέσω της σχέσης

$$FSPL = (20 \log(d) + 20 \log(f) - 147,55) \text{ dB} \quad 3.5.4$$

όπου $d_1 = 4 \text{ m}$ η απόσταση μεταξύ της γεννήτριας και του αναλυτή φάσματος. Η συχνότητα εκπομπής είναι $f = 666 \text{ MHz}$. Έτσι οι απώλειες ελευθέρου χώρου για την ζεύξη γεννήτρια – αναλυτή φάσματος είναι

$$FSPL_1 \approx 40,96 \text{ dB} \quad 3.5.5$$

Η θεωρητική ισχύς παρεμβολής υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$I_{dBm}^{th} = EIRP - FSPL + G_{dBi}^r \quad 3.5.6$$

όπου G_{dBi}^r το κέρδος της κεραίας λήψης. Στην ζεύξη μεταξύ γεννήτριας και αναλυτή φάσματος η κεραία λήψης είναι η VicoLOG 20300 με κέρδος $G_{dBi}^r = 2 \text{ dBi}$ το οποίο εξήχθη από το διάγραμμα 3.3. Έτσι βάσει των σχέσεων 3.5.3, 3.5.5, 3.5.6 υπολογίζουμε την θεωρητική ισχύ λήψης λόγω παρεμβολής συναρτήσει της ισχύς εκπομπής της γεννήτριας.

$$I_{dBm}^{th} = (P_{dBm}^{Gen} + 4,68) \text{ dBm} - 40,96 \text{ dB} + 2 \text{ dBi} = P_{dBm}^{Gen} - 34,28 \text{ dB} \quad 3.5.7$$

Ο υπολογισμός της θεωρητικής ισχύος λήψης του τηλεοπτικού σήματος θεωρείται δύσκολος εν γένει. Συγκεκριμένα εξαρτάται από την ισχύ των κέντρων εκπομπής Υμηττός και Πάρνηθα καθώς και από την επιλογή του μοντέλου που προσομοιάζει το μέσο διάδοσης (IEEE 802.16 SU1, Cost 231- Hata, κ.λ.π.). Παρόλα αυτά ενδεικτική τιμή για την ισχύ λήψης μπορεί να εξαχθεί από διαθέσιμους χάρτες ραδιο-κάλυψης. Επιπροσθέτως, η ισχύς του τηλεοπτικού σήματος μπορεί να υπολογιστεί από την μέτρηση SNR του τηλεοπτικού δέκτη δίχως την παρουσία παρεμβολής.

$$SNR = P_{dBm}^{tv} - N_{dBm} \Rightarrow P_{dBm}^{tv} = SNR + N_{dBm} \quad 3.5.8$$

Ο μετρούμενος σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του τηλεοπτικού δέκτη σύμφωνα με τον πίνακα 3.6 είναι

$$SNR = 26,2 \text{ dB} \quad 3.5.9$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 3.5.1, 3.5.8 και 3.5.9 υπολογίζουμε ενδεικτικά την ισχύ του τηλεοπτικού σήματος στην είσοδο του τηλεοπτικού δέκτη

$$P_{dBm}^{tv} = 26,2 \text{ dB} - 104 \text{ dBm} = -77,8 \text{ dBm} \quad 3.5.10$$

Έτσι θεωρητικά η συνολική ισχύς στον δέκτη είναι

$$P_{dBm}^T = P_{dBm}^{tv} + I_{dBm}^{th} = -77,8 \text{ dBm} + P_{dBm}^{Gen} - 34,28 \text{ dB} = P_{dBm}^{Gen} - 112,08 \text{ dBm} \quad 3.5.11$$

Η υπολογιζόμενη τιμή P_{dBm}^T είναι άμεσα συγκρίσιμη με το μέγεθος Channel Power το οποίο μετρήσαμε μέσω του αναλυτή φάσματος.

3.6 Παρουσίαση μετρήσεων

3.6.1 Μετρήσεις δίχως παρεμβολή

Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών ποιότητας υπηρεσίας της ψηφιακής τηλεόρασης δίχως την παρουσία παρεμβολής.

| | Μετρούμενο μέγεθος | Τιμή |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| Promax Tv Explorer II | SNR_a | 26,2 dB |
| | Power | 50,1 dBμV/m |
| | MER | 26,6 dB |
| | CBER | 5E(-5) dB |
| | VBER | 1E(-7) dB |
| Spectrum analyzer Anritsu MS2721A | Channel Power | -99,3 dBm |
| | Channel Power Density | -109 dBm/Hz |

Πίνακας 3.6 Μετρήσεις δίχως παρεμβολή

3.6.2 Μετρήσεις υπό παρεμβολή (μονοχρωματική συχνότητα)

Στον Πίνακα 3.7 φαίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών ποιότητας υπηρεσίας της ψηφιακής τηλεόρασης υπό την επίδραση παρεμβολής για σήμα μονοχρωματικής συχνότητας, ισχύς εκπομπής 0 dBm (1mW) και συχνότητα εκπομπής από 662 έως 670 MHz.

| Συχνότητα εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (MHz) | Promax Tv Explorer II | | | | | Spectrum analyzer Anritsu MS2721A | | |
|---|-----------------------|----------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------|
| | SNR_b (dB) | Power (dBμV/m) | MER (dB) | CBER (dB) | VBER (dB) | Channel Power (dBm) | Power Densnsity (dBm/Hz) | Interference (dBm) |
| 662 | 27,3 | 53,3 | 21,2 | 3,0E-03 | 2,4E-07 | -97 | -108,2 | 1,10 |
| 663 | 27,3 | 53,5 | 19,1 | 7,2E-03 | 7,4E-06 | -97,7 | -106,8 | 1,10 |
| 664 | 25,9 | 53,2 | 19,6 | 6,1E-03 | 1,4E-05 | -95,2 | -107,5 | -0,30 |
| 665 | 26,1 | 53,3 | 18,9 | 8,2E-03 | 2,0E-05 | -96,3 | -106,4 | -0,10 |
| 666 | 44,4 | 72,4 | 14,9 | 1,6E-02 | 1,6E-04 | -60,5 | -67 | 18,20 |
| 667 | 27,2 | 53,2 | 21,9 | 3,4E-03 | 2,7E-07 | -97,5 | -106,5 | 1,00 |
| 668 | 26,7 | 53,7 | 23,4 | 2,7E-03 | 8,1E-07 | -96,7 | -108 | 0,50 |
| 669 | 26,7 | 53,6 | 22,9 | 2,9E-03 | 2,5E-07 | -96,2 | -106,9 | 0,50 |
| 670 | 25,3 | 53,2 | 23,1 | 1,3E-03 | 1,7E-07 | -98,3 | -106,4 | -0,90 |

Πίνακας 3.7 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)

Παρατηρείτε ότι το SNR που μετρήσαμε από τον Promax TV Explorer δέκτη αυξήθηκε. Το συμπέρασμα αυτό αν και είναι παράδοξο από πρώτης απόψεως, είναι λογικό μιας και ο τηλεοπτικός δέκτης δεν ξεχωρίζει το ωφέλιμο σήμα P_{DVB-T} από το σήμα παρεμβολής I_{gen}^{db} και έτσι τα μετράει αθροιστικά. Για ακρίβεια **το μετρούμενο SNR δίχως την παρουσία παρεμβολής είναι**

$$SNR_a = P_{DVB-T}^{db} - N^{db} \tag{3.6.2.1}$$

ενώ το μετρούμενο SNR υπό την παρουσία παρεμβολής είναι

$$SNR_b = P_{DVB-T}^{db} + I_{gen}^{db} - N^{db} = SNR_a + I_{gen}^{db} \tag{3.6.2.2}$$

ενώ το ζητούμενο SNIR είναι

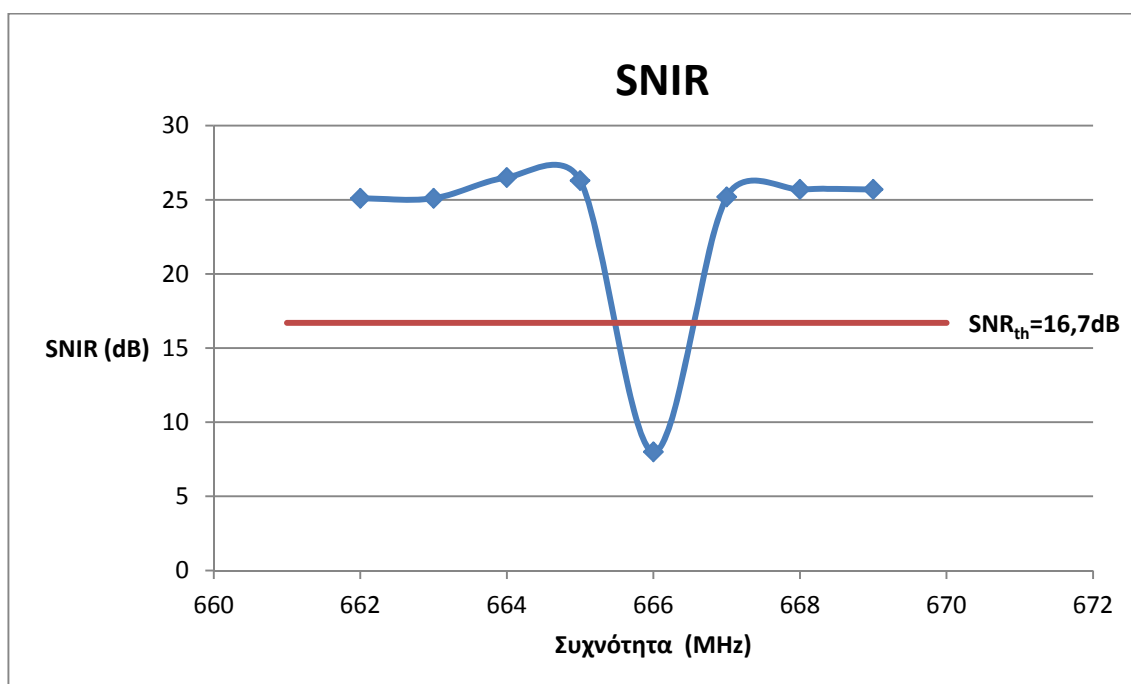
$$SNIR = P_{DVB-T}^{db} - I_{gen}^{db} - N^{db} = 2SNR_a - SNR_b \tag{3.6.2.3}$$

Με την βοήθεια της σχέσης 3.6.2.3 κατασκευάσαμε τον πίνακα 3.8.

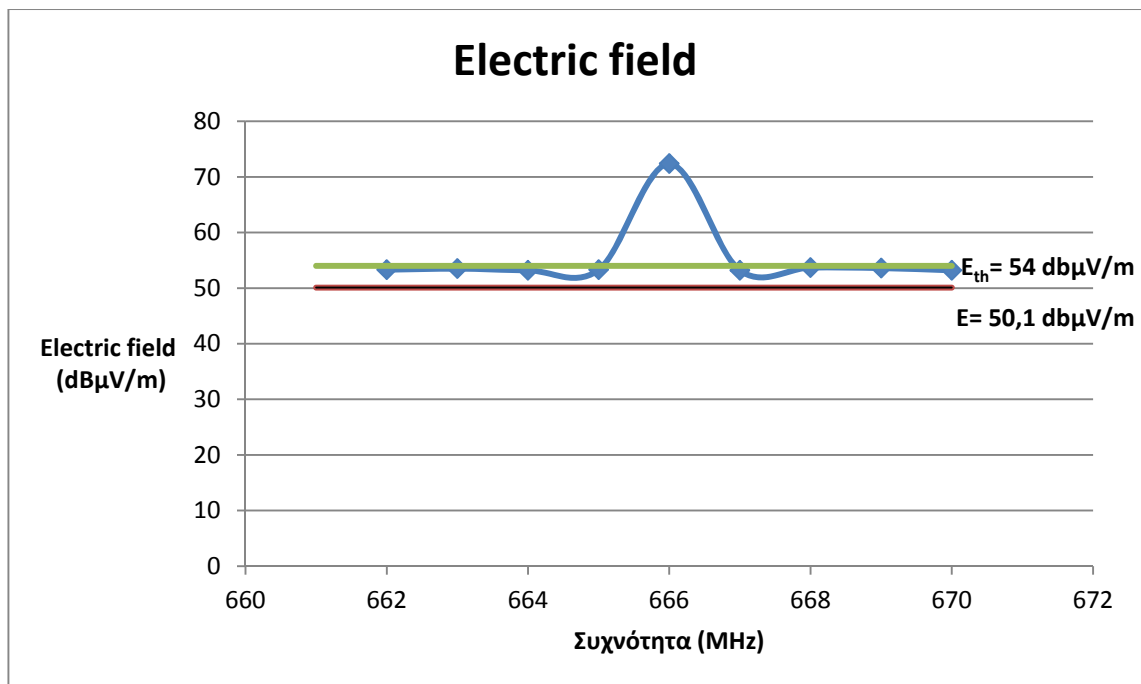
| Συχνότητα εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (MHz) | SNIR (dB) |
|---|-----------|
| 662 | 25,1 |
| 663 | 25,1 |
| 664 | 26,5 |
| 665 | 26,3 |
| 666 | 8 |
| 667 | 25,2 |
| 668 | 25,7 |
| 669 | 25,7 |
| 670 | 27,1 |

Πίνακας 3.8 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)

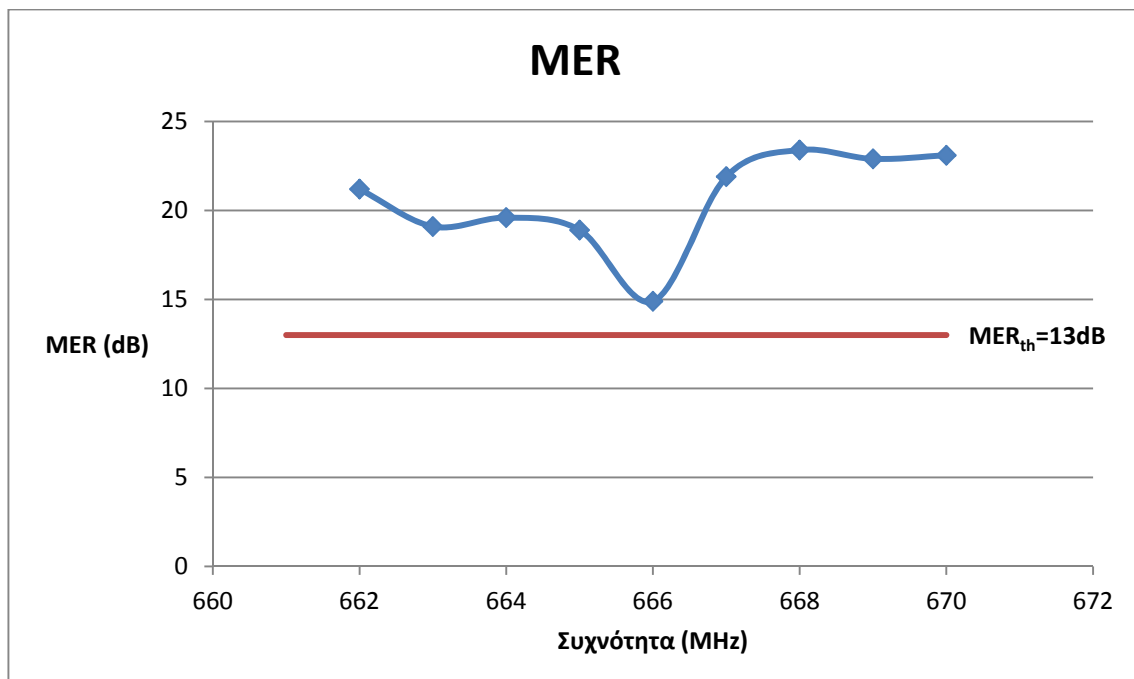
Από τους πίνακες 3.7 και 3.8 εξάγαμε τα ακόλουθα διαγράμματα:



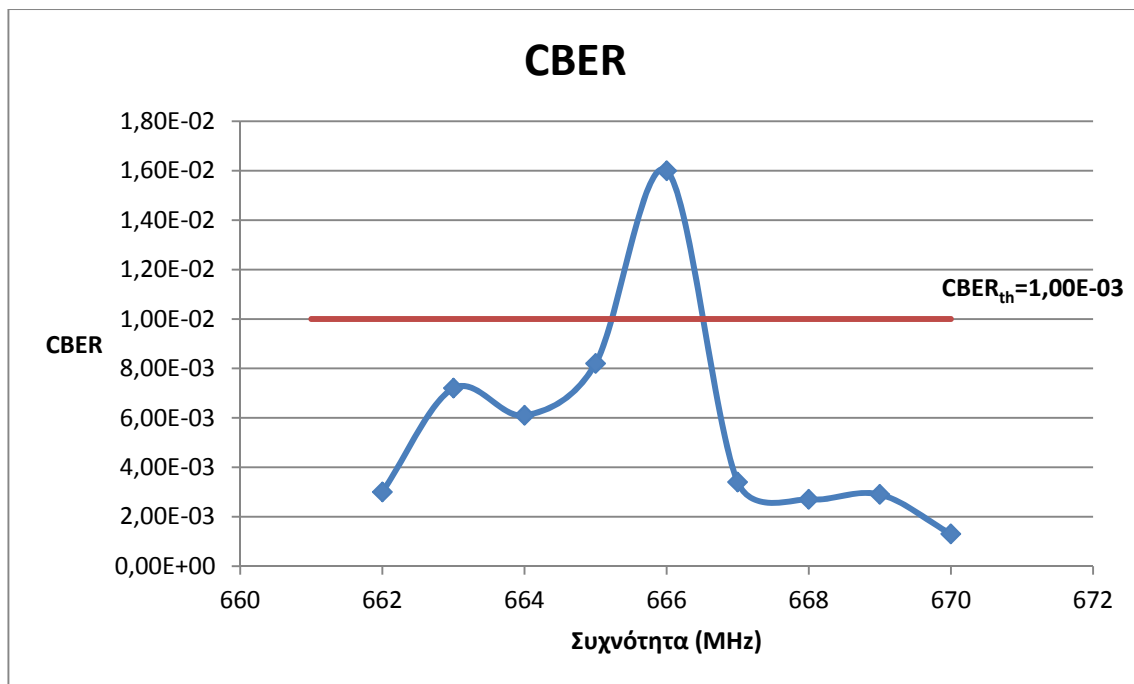
Σχήμα 3.9 SNIR υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



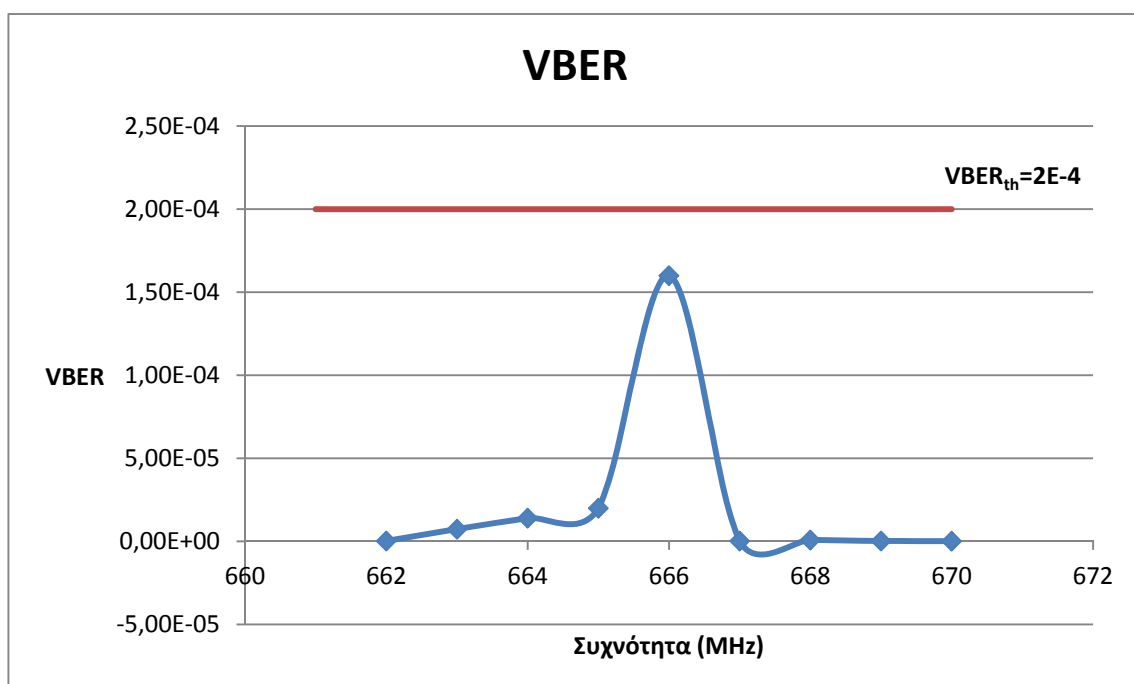
Σχήμα 3.10 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



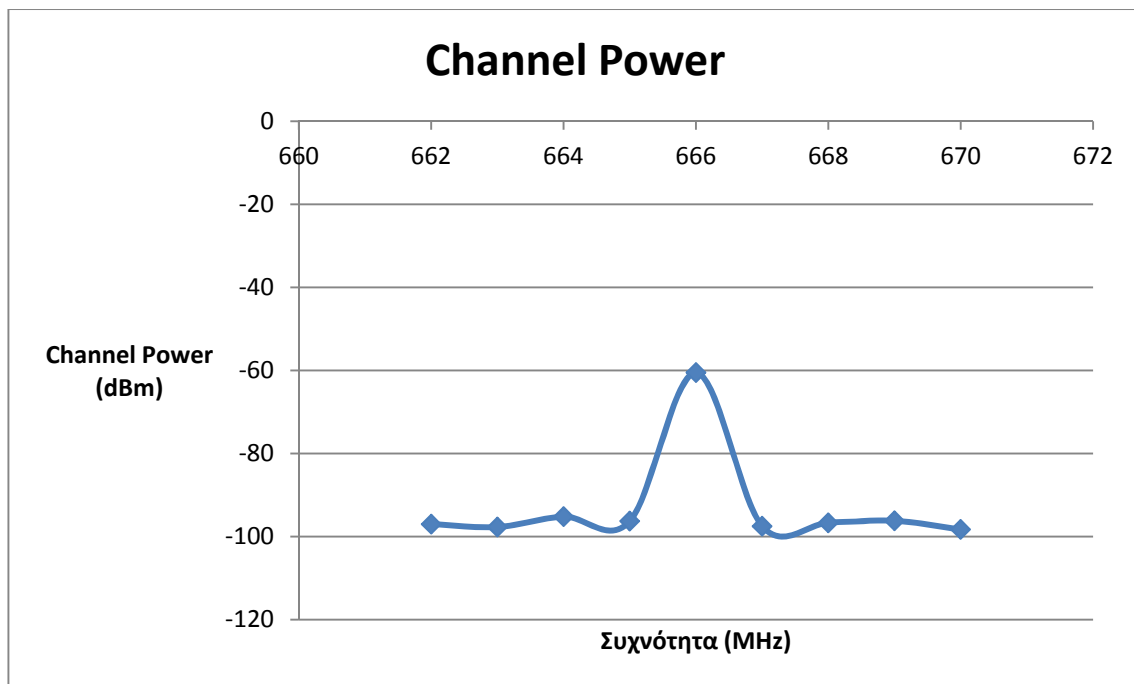
Σχήμα 3.11 MER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



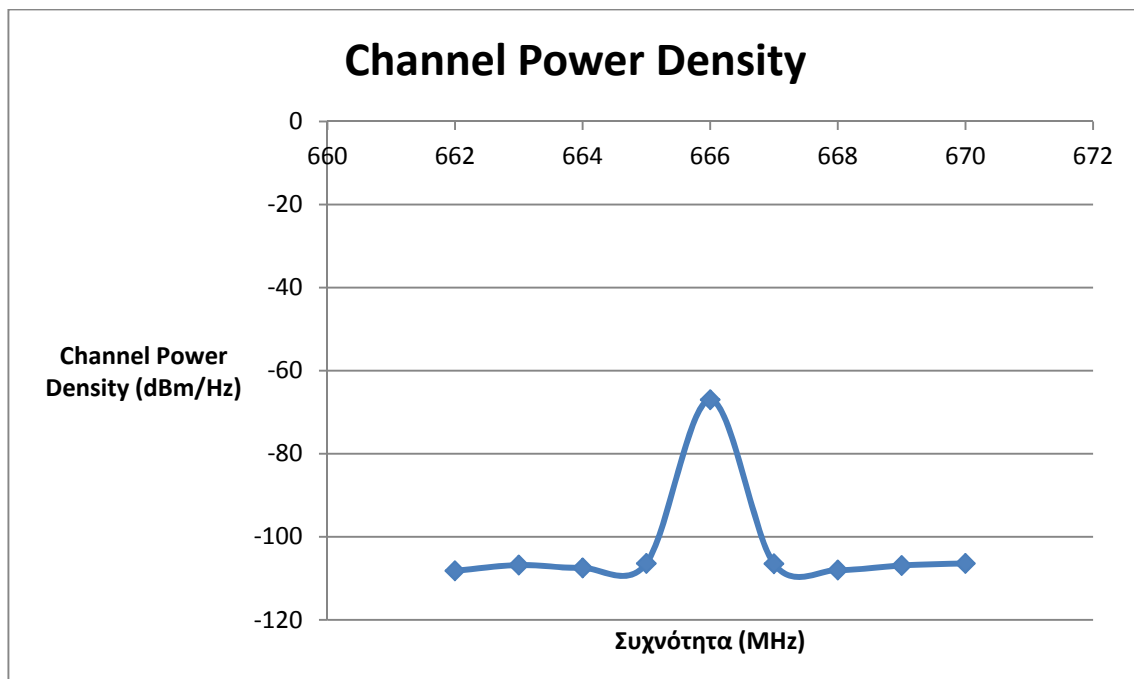
Σχήμα 3.12 CBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.13 VBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.14 Channel Power υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.15 Channel Power density υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (ισχύς εκπομπής σταθερή)

Στον Πίνακα 3.9 φαίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών ποιότητας υπηρεσίας της ψηφιακής τηλεόρασης υπό την επίδραση παρεμβολής για σήμα μονοχρωματικής συχνότητας, ισχύ εκπομπής από 0 dBm (1mW) έως -20 dBm (0.01 mW) και συχνότητα εκπομπής σταθερή 666 MHz.

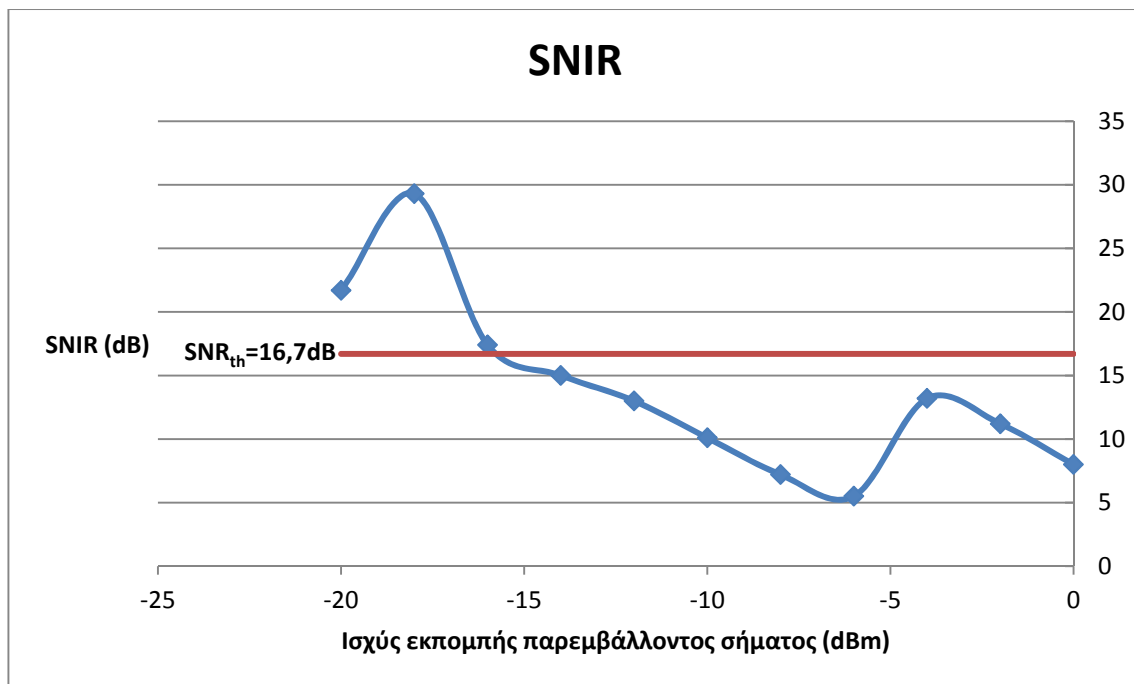
| Ισχύς εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (dBm) | Promax Tv Explorer II | | | | | Spectrum analyzer Anritsu MS2721A | | |
|---|-----------------------|-------------------|-------------|--------------|--------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| | SNR_b (dB) | Power (dBμV/m) | MER (dB) | CBER (dB) | VBER (dB) | Channel Power (dBm) | Channel Power Density (dBm/Hz) | Interference (dBm) |
| 0 | 44,40 | 76,30 | 14,90 | 1,6E-02 | 1,6E-04 | -60,50 | -67,00 | 18,20 |
| -2 | 41,20 | 72,50 | 15,90 | 1,4E-02 | 3,0E-05 | -59,00 | -68,40 | 15,00 |
| -4 | 39,20 | 71,20 | 22,90 | 2,5E-03 | 4,1E-07 | -61,60 | -70,80 | 13,00 |
| -6 | 46,90 | 68,70 | 23,70 | 2,1E-03 | 5,0E-07 | -64,00 | -73,00 | 20,70 |
| -8 | 45,20 | 67,30 | 23,60 | 2,2E-03 | 6,2E-07 | -65,90 | -75,20 | 19,00 |
| -10 | 42,30 | 62,70 | 24,00 | 1,8E-03 | 4,3E-07 | -67,90 | -77,10 | 16,10 |
| -12 | 39,40 | 62,00 | 24,50 | 1,4E-03 | 2,5E-07 | -69,70 | -78,70 | 13,20 |
| -14 | 37,40 | 60,30 | 24,60 | 9,4E-04 | 1,0E-07 | -72,80 | -81,10 | 11,20 |
| -16 | 35,00 | 57,50 | 24,90 | 9,1E-04 | 1,0E-07 | -73,50 | -83,80 | 8,80 |
| -18 | 23,10 | 55,40 | 25,60 | 7,1E-04 | 1,0E-07 | -74,10 | -84,70 | -3,10 |
| -20 | 30,70 | 53,30 | 25,30 | 6,5E-04 | 1,0E-07 | -78,50 | -87,30 | 4,50 |

Πίνακας 3.9 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή)
Με την βοήθεια της σχέσης 3.6.2.3 κατασκευάσαμε τον πίνακα 3.10.

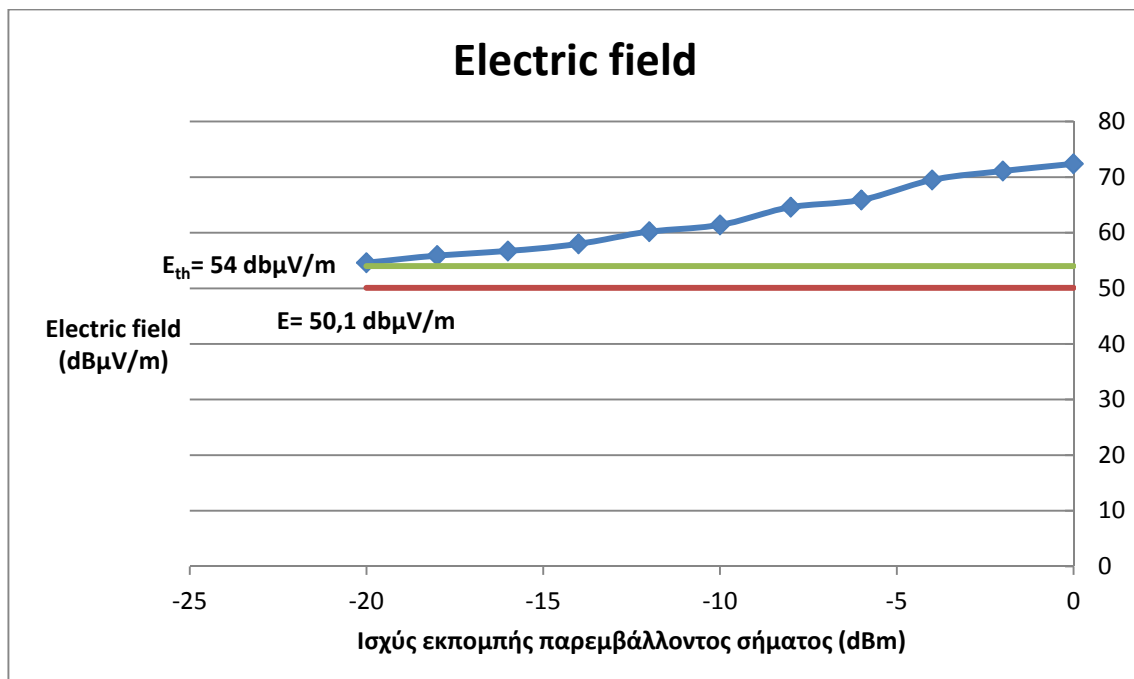
| P_{gen} (dBm) | $SNIR$ (dB) |
|-----------------|----------------|
| 0 | 8,00 |
| -2 | 11,20 |
| -4 | 13,20 |
| -6 | 5,50 |
| -8 | 7,20 |
| -10 | 10,10 |
| -12 | 13,00 |
| -14 | 15,00 |
| -16 | 17,40 |
| -18 | 29,30 |
| -20 | 21,70 |

Πίνακας 3.10 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής μονοχρωματικού σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή)

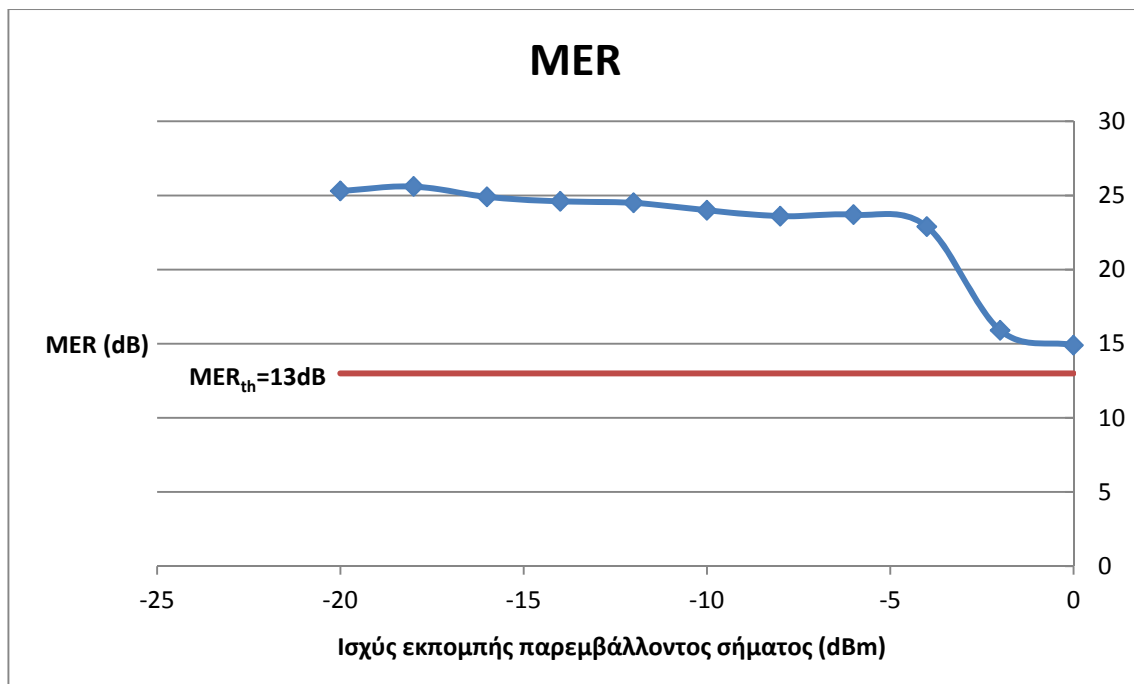
Από τους πίνακες 3.9 και 3.10 εξάγαμε τα ακόλουθα διαγράμματα:



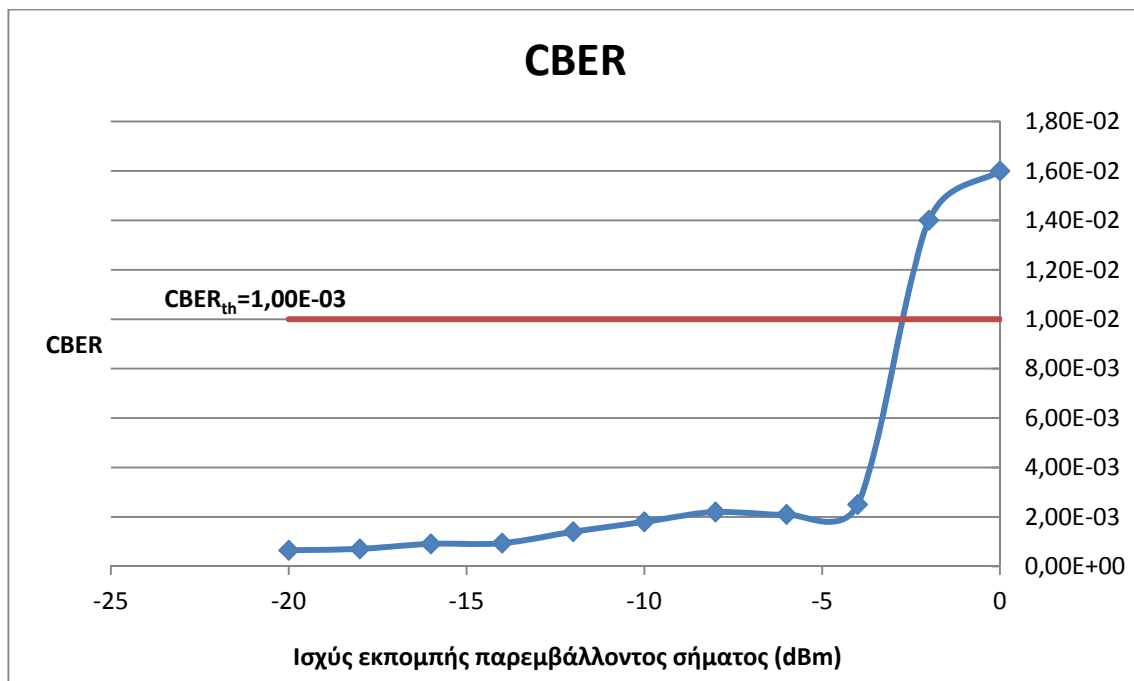
Σχήμα 3.16 SNIR υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



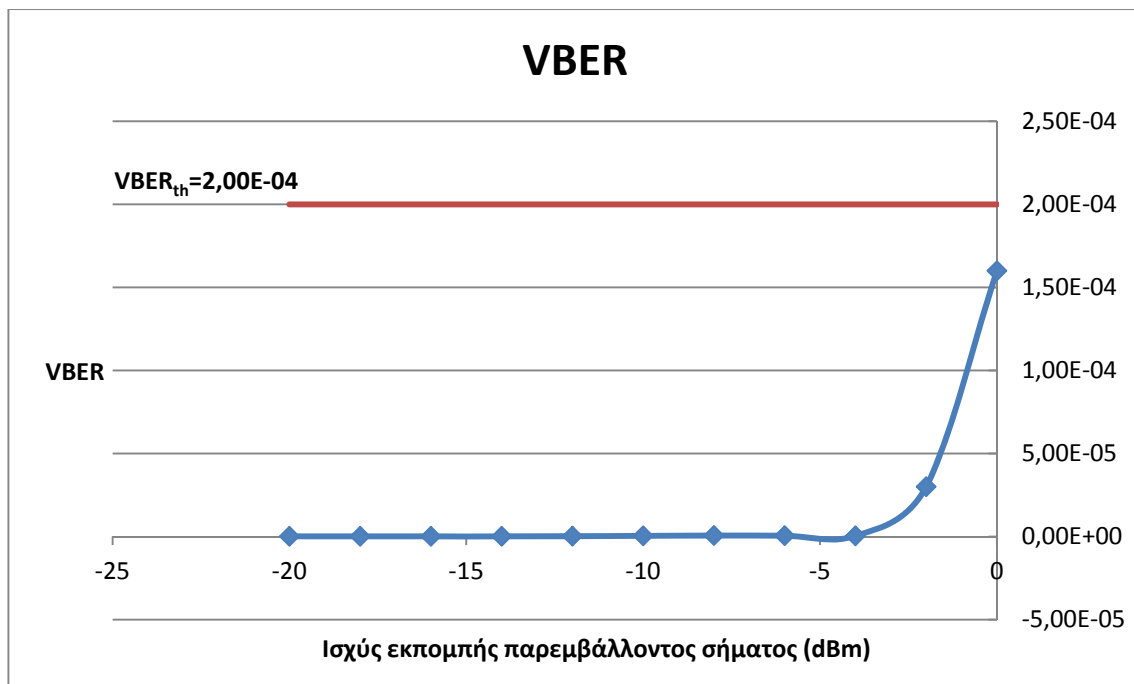
Σχήμα 3.17 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



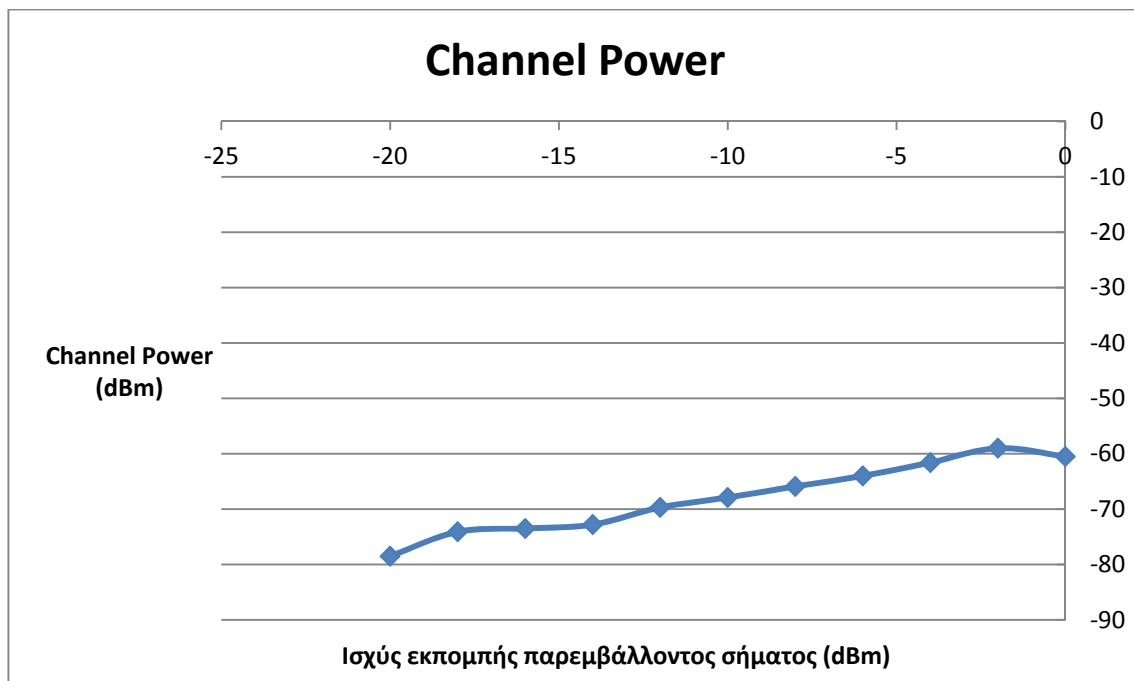
Σχήμα 3.18 MER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



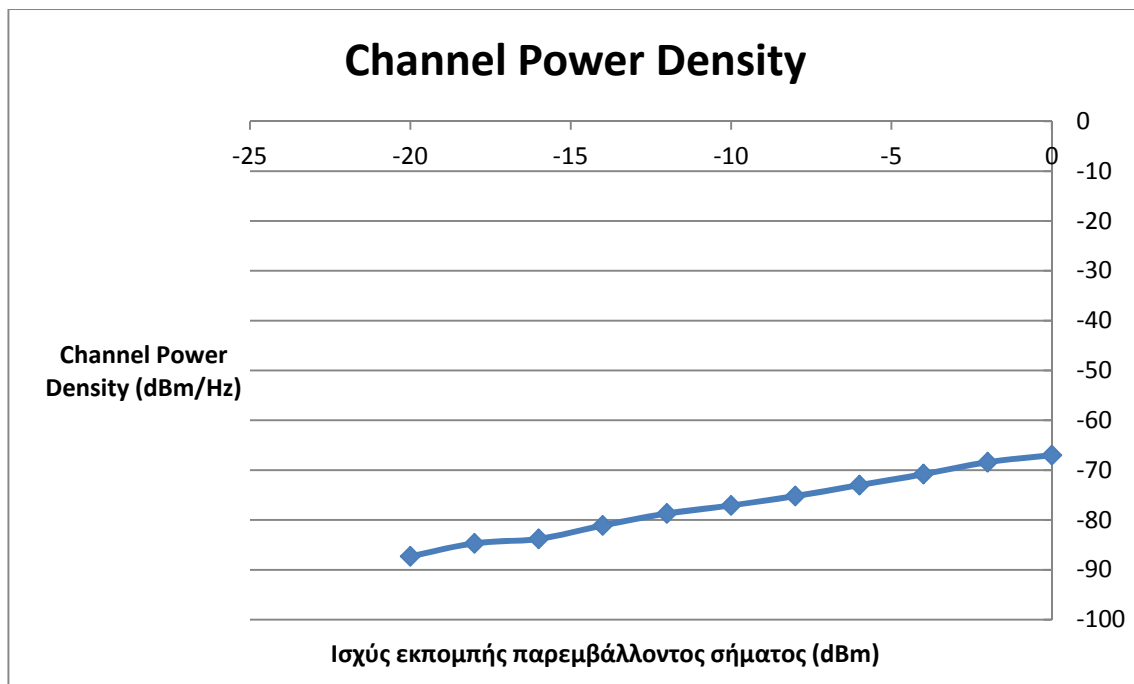
Σχήμα 3.19 CBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



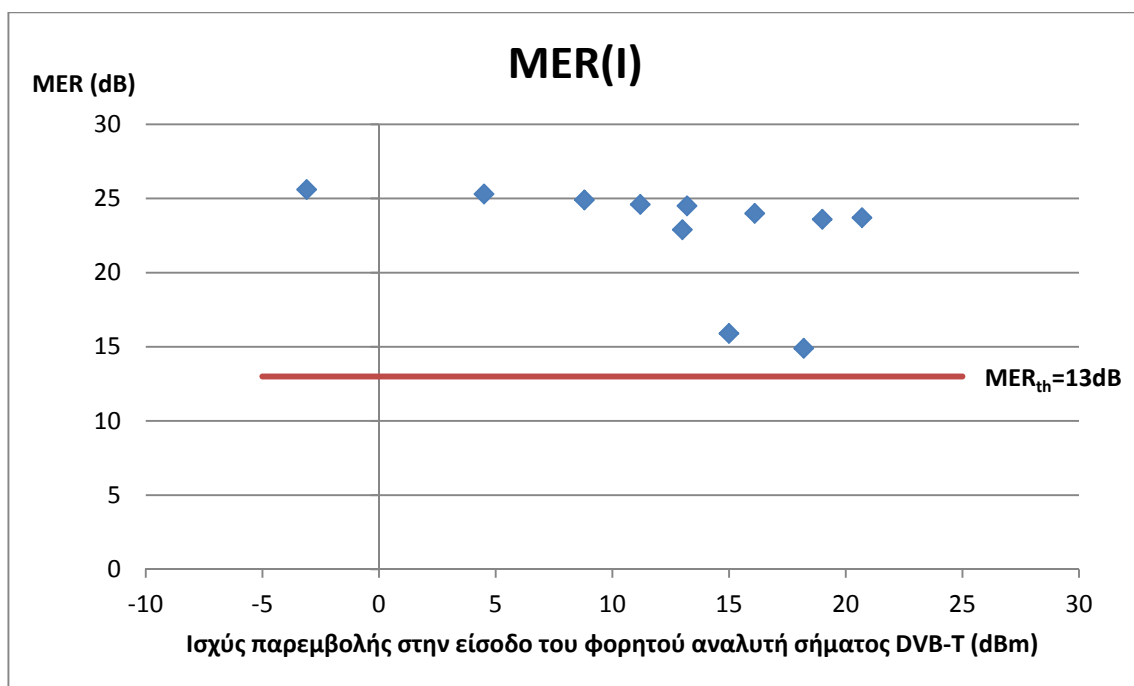
Σχήμα 3.20 VBER υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



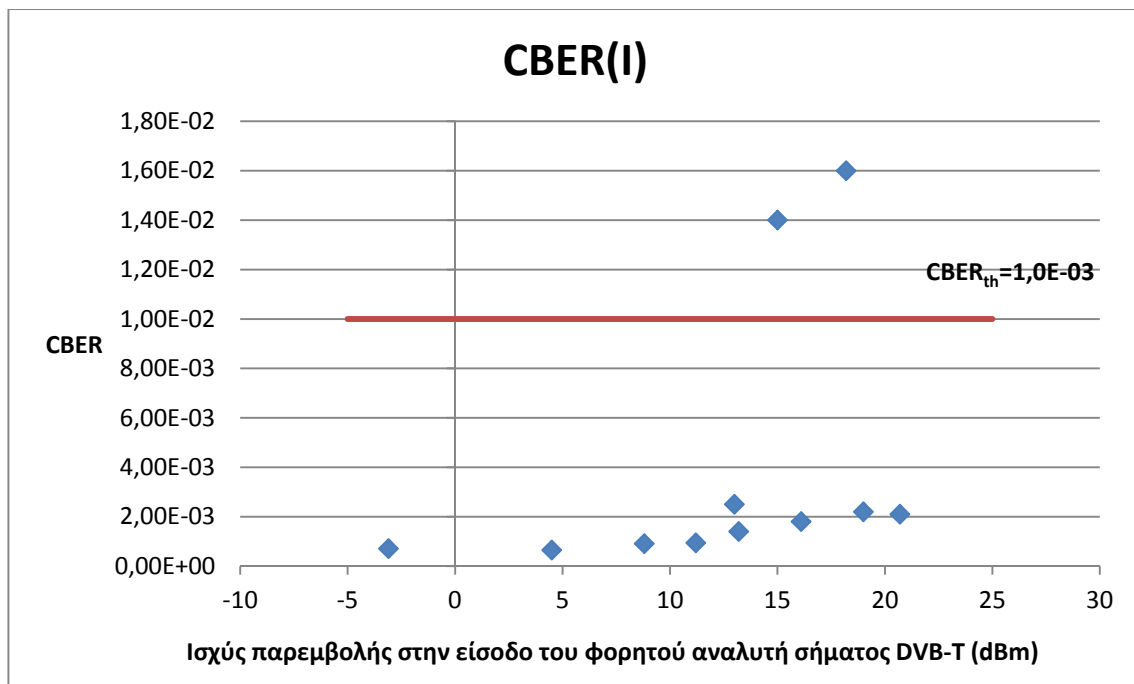
Σχήμα 3.21 Channel Power υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



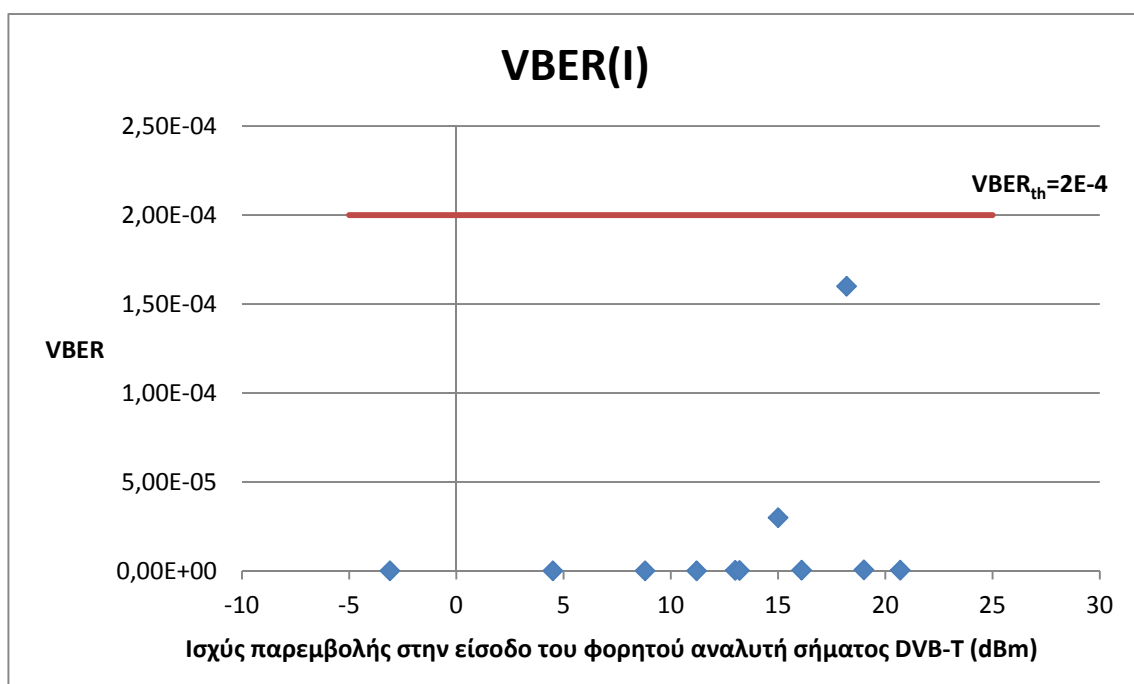
Σχήμα 3.22 Channel Power Density υπό την παρουσία σήματος παρεμβολής μονοχρωματικής συχνότητας (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



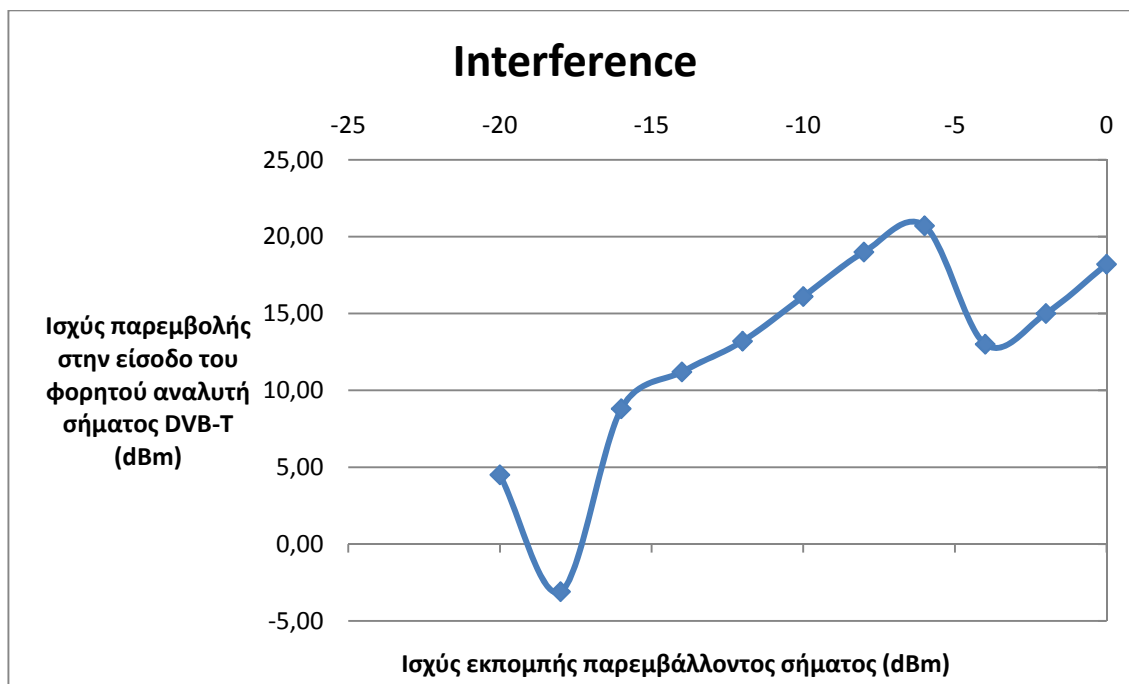
Σχήμα 3.23 MER συναρτήσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.24 CBER συναρτήσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.25 VBER συναρτήσει της παρεμβολής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.26 Παρεμβολή συναρτήσει της ισχύος εκπομπής για μονοχρωματικό σήμα (συχνότητα εκπομπής σταθερή)

3.6.3 Μετρήσεις υπό παρεμβολή (LTE σήμα)

Στον Πίνακα 3.11 φαίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών ποιότητας υπηρεσίας της ψηφιακής τηλεόρασης υπό την επίδραση παρεμβολής για σήμα LTE εύρους ζώνης 5 MHz, ισχύ εκπομπής 0 dBm (1mW) και συχνότητα εκπομπής από 659 έως 673 MHz.

| Συχνότητα εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (MHz) | Promax Tv Explorer II | | | | | Spectrum analyzer Anritsu MS2721A | | |
|---|-----------------------|----------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| | SNR_b (dB) | Power (dBμV/m) | MER (dB) | CBER (dB) | VBER (dB) | Channel Power (dBm) | Channel Power Density (dBm/Hz) | Interference (dBm) |
| 659 | 26,00 | 49,80 | 25,90 | 7,0E-05 | 1,0E-07 | -99,30 | -109,00 | 18,20 |
| 660 | 26,00 | 50,00 | 26,80 | 2,4E-03 | 1,0E-07 | -98,10 | -109,00 | 15,00 |
| 661 | 26,00 | 49,80 | 26,60 | 4,1E-02 | 2,0E-04 | -99,30 | -110,00 | 13,00 |
| 662 | 25,50 | 50,00 | 24,70 | 9,3E-02 | 1,0E-01 | -98,30 | -109,50 | 20,70 |
| 663 | 25,50 | 49,80 | 23,40 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -98,20 | -108,00 | 19,00 |
| 664 | 30,70 | 55,80 | 13,20 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -76,70 | -87,40 | 16,10 |
| 665 | 31,80 | 56,20 | 13,00 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -77,10 | -85,40 | 13,20 |
| 666 | 31,30 | 55,80 | 22,00 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -76,20 | -88,90 | 11,20 |
| 667 | 31,40 | 56,00 | 4,50 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -76,80 | -86,50 | 8,80 |
| 668 | 31,50 | 55,80 | 9,00 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -77,00 | -86,10 | -3,10 |
| 669 | 25,50 | 50,30 | 13,00 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -99,50 | -110,20 | 4,50 |
| 670 | 24,50 | 48,80 | 17,20 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -97,50 | -109,60 | 18,20 |
| 671 | 24,50 | 49,50 | 20,50 | 5,8E-02 | 1,2E-02 | -100,00 | -111,20 | 15,00 |
| 672 | 24,10 | 49,60 | 25,50 | 4,5E-03 | 1,0E-07 | -100,00 | -111,40 | 13,00 |
| 673 | 26,00 | 49,80 | 26,10 | 8,2E-05 | 1,0E-07 | -97,10 | -109,30 | 20,70 |

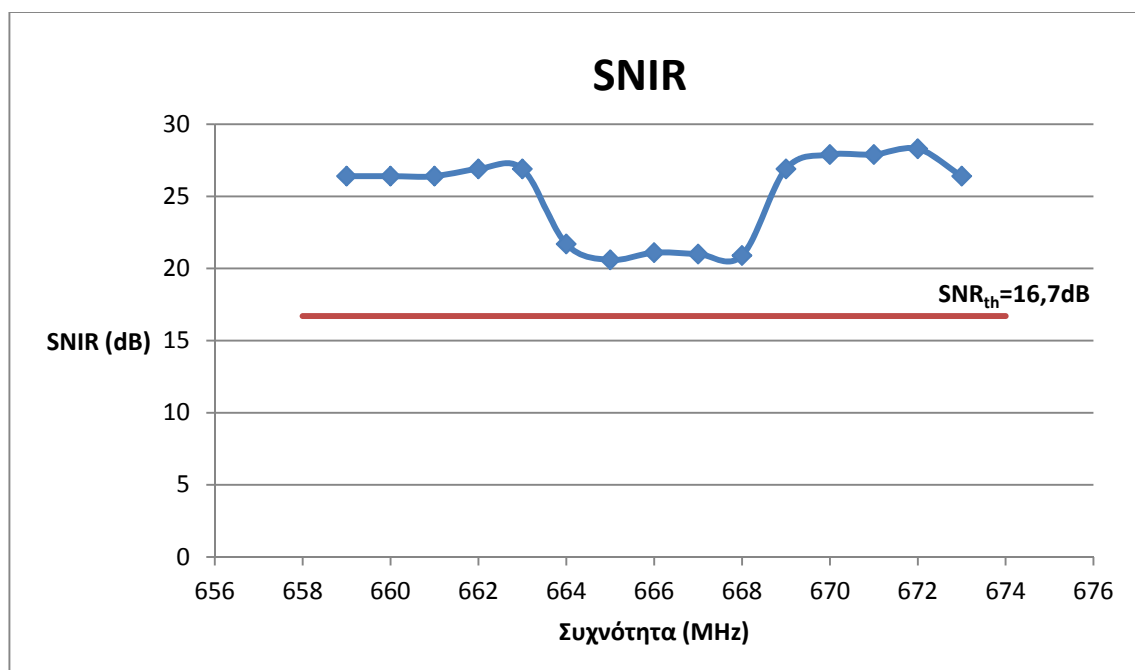
Πίνακας 3.11 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής LTE σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)

Με την βοήθεια της σχέσης 3.4.1 κατασκευάσαμε τον πίνακα 3.12.

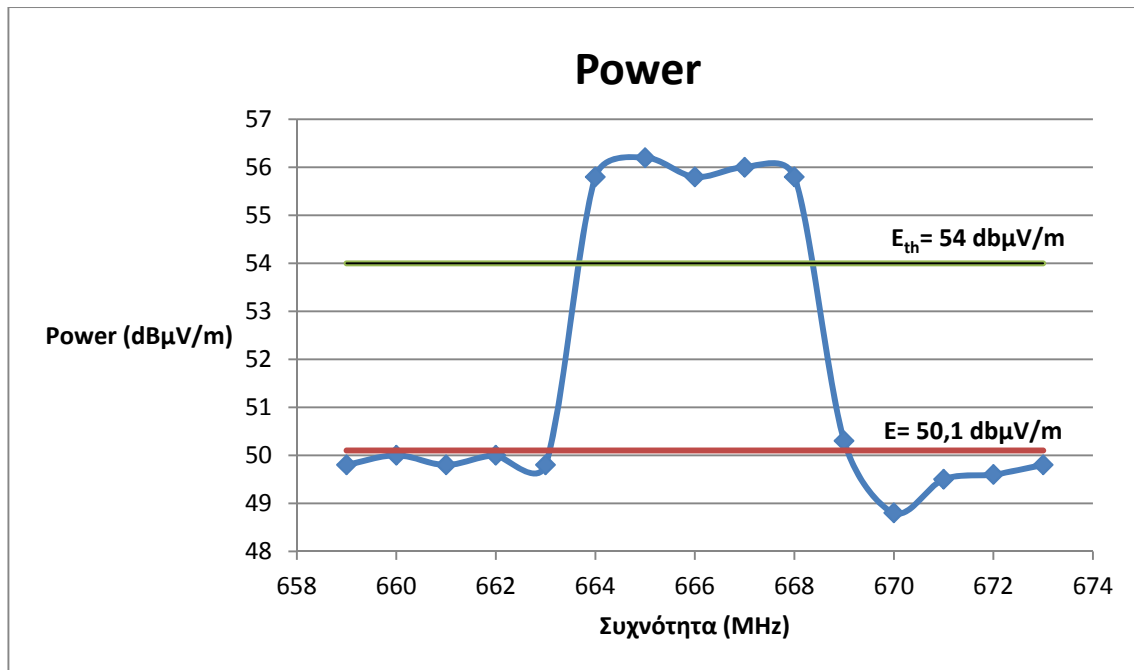
| Συχνότητα εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (MHz) | SNIR (dB) |
|---|-----------|
| 659 | 26,4 |
| 660 | 26,4 |
| 661 | 26,4 |
| 662 | 26,9 |
| 663 | 26,9 |
| 664 | 21,7 |
| 665 | 20,6 |
| 666 | 21,1 |
| 667 | 21 |
| 668 | 20,9 |
| 669 | 26,9 |
| 670 | 27,9 |
| 671 | 27,9 |
| 672 | 28,3 |
| 673 | 26,4 |

Πίνακας 3.12 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής σήματος LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)

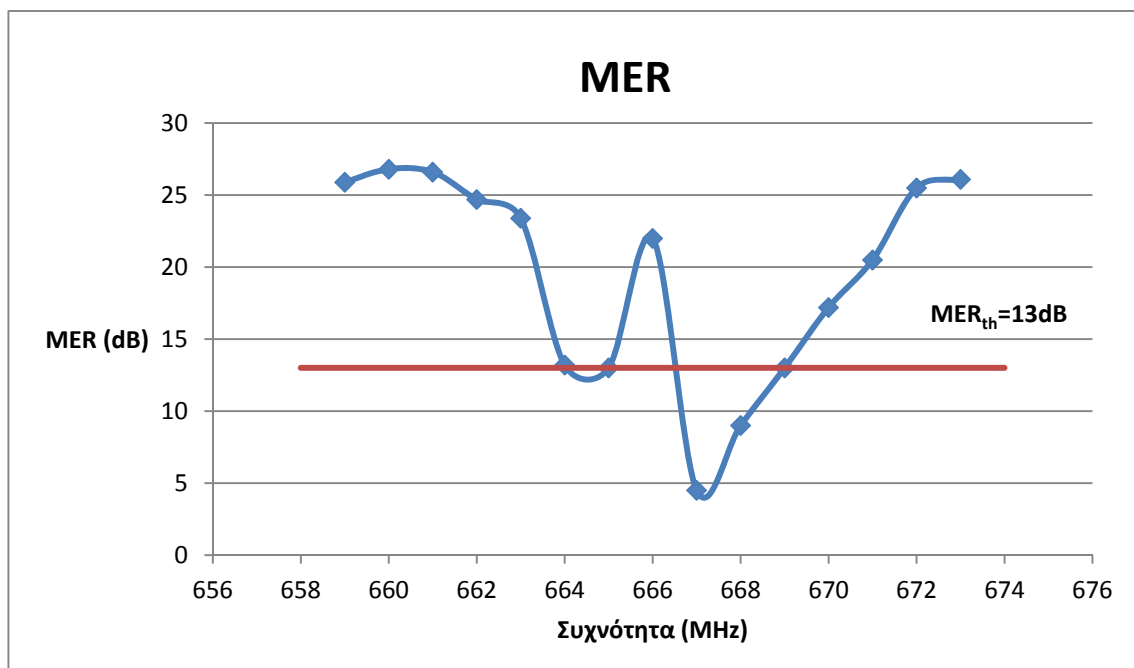
Από τους πίνακες 3.11 και 3.12 εξάγαμε τα ακόλουθα διαγράμματα:



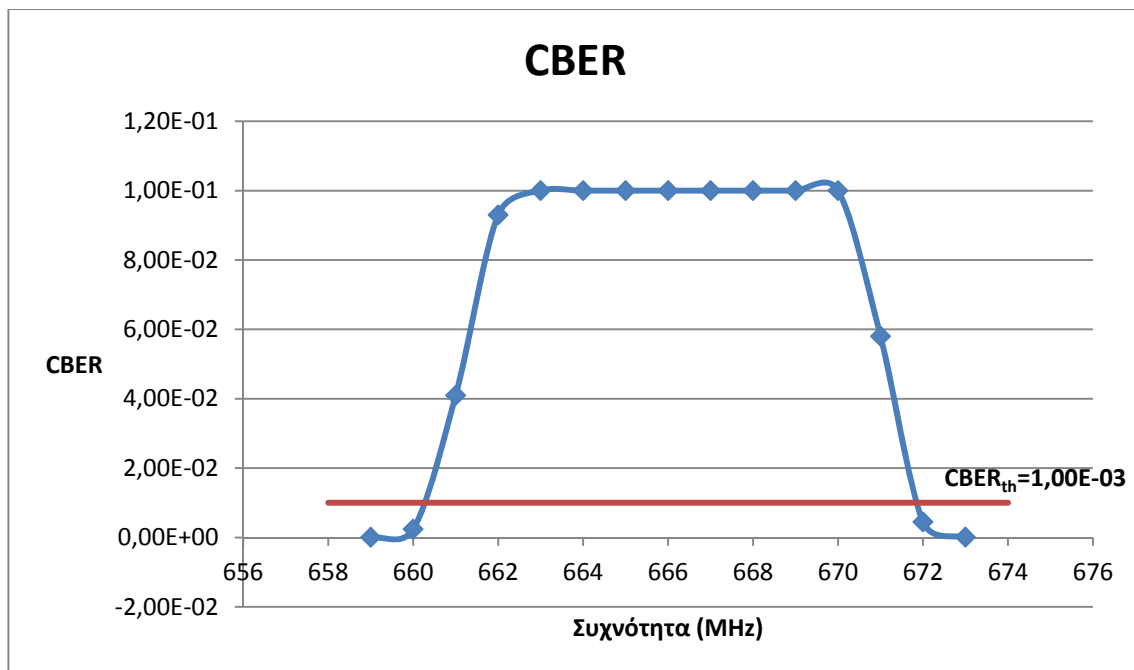
Σχήμα 3.27 SNIR υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



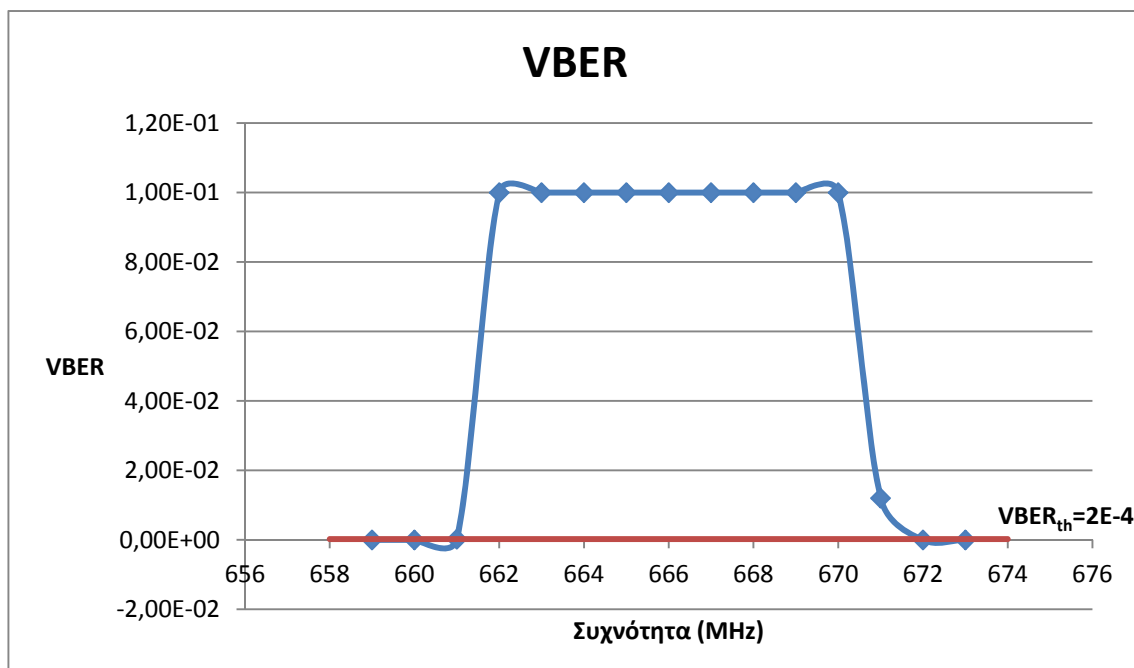
Σχήμα 3.28 Ισχύς λήψης υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



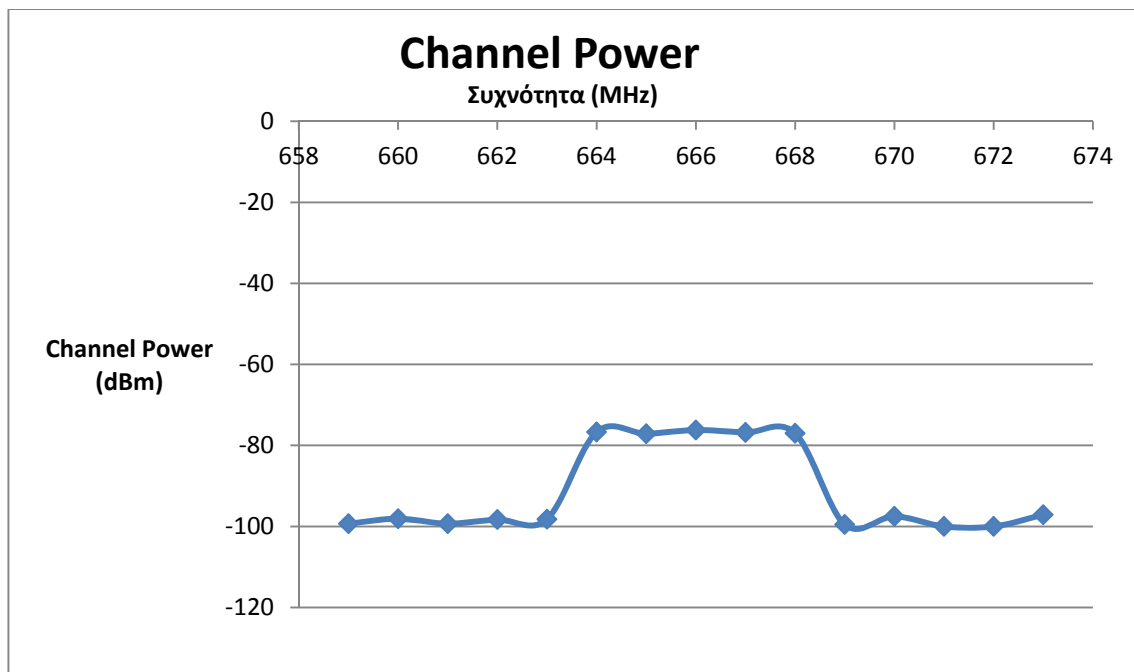
Σχήμα 3.29 MER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



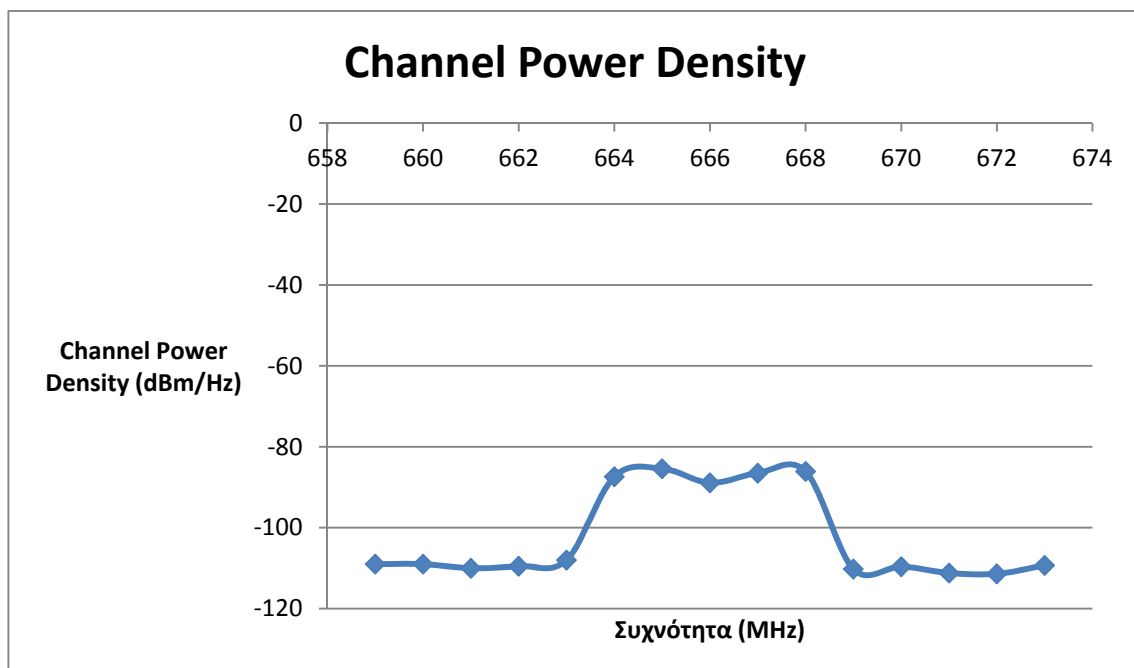
Σχήμα 3.30 CBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.31 VBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.32 Channel Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.33 Channel Power density υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (ισχύς εκπομπής σταθερή)

Στον Πίνακα 3.13 φαίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών ποιότητας υπηρεσίας της ψηφιακής τηλεόρασης υπό την επίδραση παρεμβολής για LTE σήμα, ισχύ εκπομπής από 0 dBm (1mW) έως -20 dBm (0.01 mW) και συχνότητα εκπομπής σταθερή 666MHz.

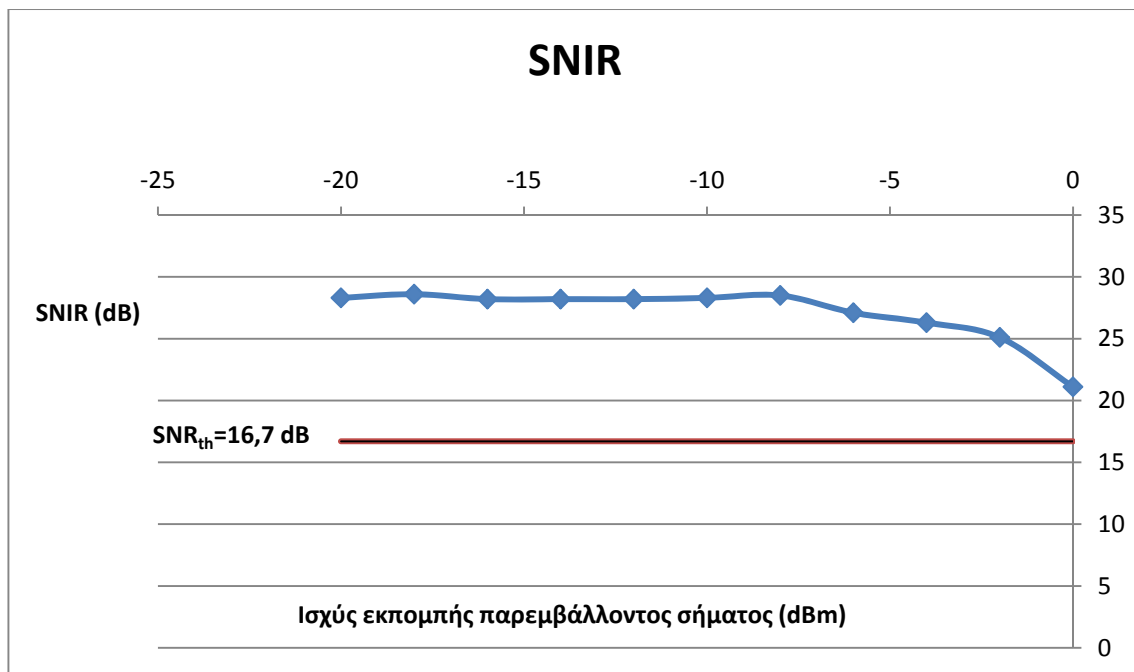
| Ισχύς εκπομπής μονοχρωματικού σήματος (dBm) | Promax Tv Explorer II | | | | | Spectrum analyzer Anritsu MS2721A | | |
|---|-----------------------|----------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| | SNR_b (dB) | Power (dBμV/m) | MER (dB) | CBER (dB) | VBER (dB) | Channel Power (dBm) | Channel Power Denssity (dBm/Hz) | Interference (dBm) |
| 0 | 31,30 | 55,80 | 22,00 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -76,20 | -88,90 | -0,20 |
| -2 | 27,30 | 52,50 | 22,70 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -81,90 | -92,90 | -0,20 |
| -4 | 26,10 | 51,90 | 22,80 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -83,40 | -96,20 | -0,20 |
| -6 | 25,30 | 51,30 | 21,20 | 1,0E-01 | 1,0E-01 | -87,00 | -97,30 | -0,70 |
| -8 | 23,90 | 50,00 | 23,20 | 6,7E-02 | 2,0E-03 | -86,90 | -98,60 | -0,70 |
| -10 | 24,10 | 50,00 | 23,20 | 4,0E-02 | 9,2E-02 | -90,20 | -100,40 | 4,50 |
| -12 | 24,20 | 50,20 | 23,30 | 3,8E-02 | 9,6E-03 | -90,70 | -101,70 | 5,60 |
| -14 | 24,20 | 50,10 | 23,50 | 2,3E-02 | 4,5E-04 | -95,40 | -106,00 | 5,10 |
| -16 | 24,20 | 50,20 | 23,40 | 1,1E-2 | 1,0E-07 | -94,00 | -103,50 | 5,20 |
| -18 | 23,80 | 50,00 | 23,50 | 4,7E-03 | 1,0E-07 | -96,20 | -106,30 | 5,30 |
| -20 | 24,10 | 50,00 | 23,70 | 1,7E-03 | 1,0E-07 | -98,30 | -106,80 | -0,70 |

Πίνακας 3.13 Μετρήσεις υπό την επίδραση παρεμβολής LTE σήματος (συχνότητα εκπομπής σταθερή) Με την βοήθεια της σχέσης 3.6.2.3 κατασκευάσαμε τον πίνακα 3.14.

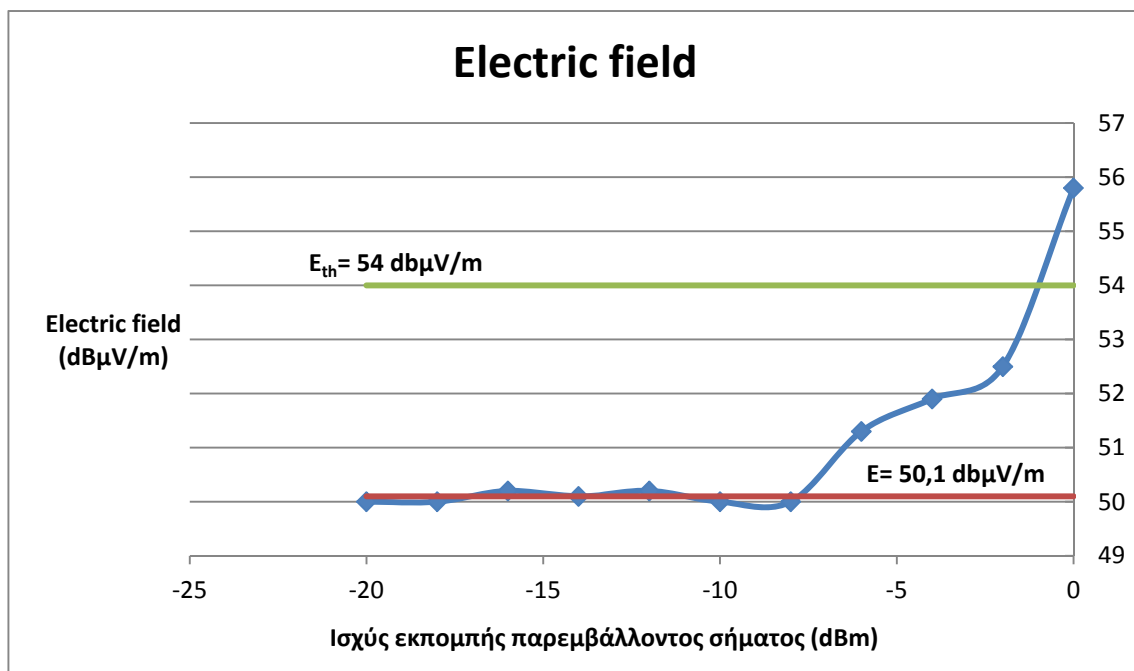
| P_{gen} (dBm) | SNIR (dB) |
|-----------------|-----------|
| 0 | 21,10 |
| -2 | 25,10 |
| -4 | 26,30 |
| -6 | 25,30 |
| -8 | 23,90 |
| -10 | 24,10 |
| -12 | 24,20 |
| -14 | 24,20 |
| -16 | 24,20 |
| -18 | 23,80 |
| -20 | 24,10 |

Πίνακας 3.14 Υπολογιζόμενο SNIR υπό την παρουσία παρεμβολής LTE σήματος (ισχύς εκπομπής σταθερή)

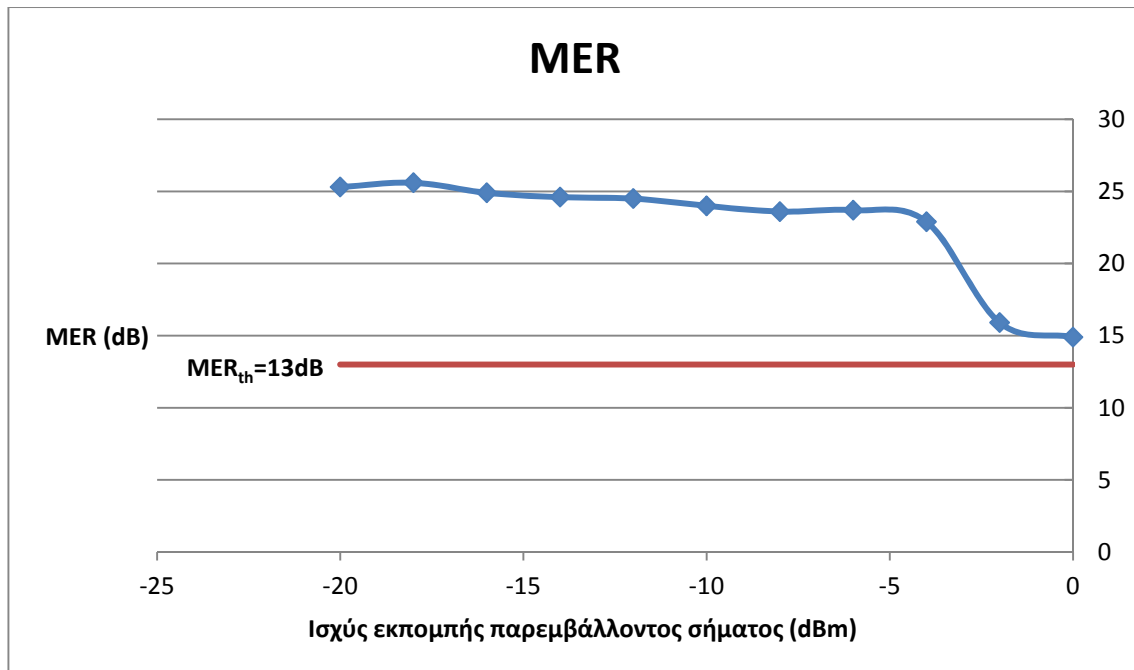
Από τους πίνακες 3.13 και 3.14 εξάγαμε τα ακόλουθα διαγράμματα:



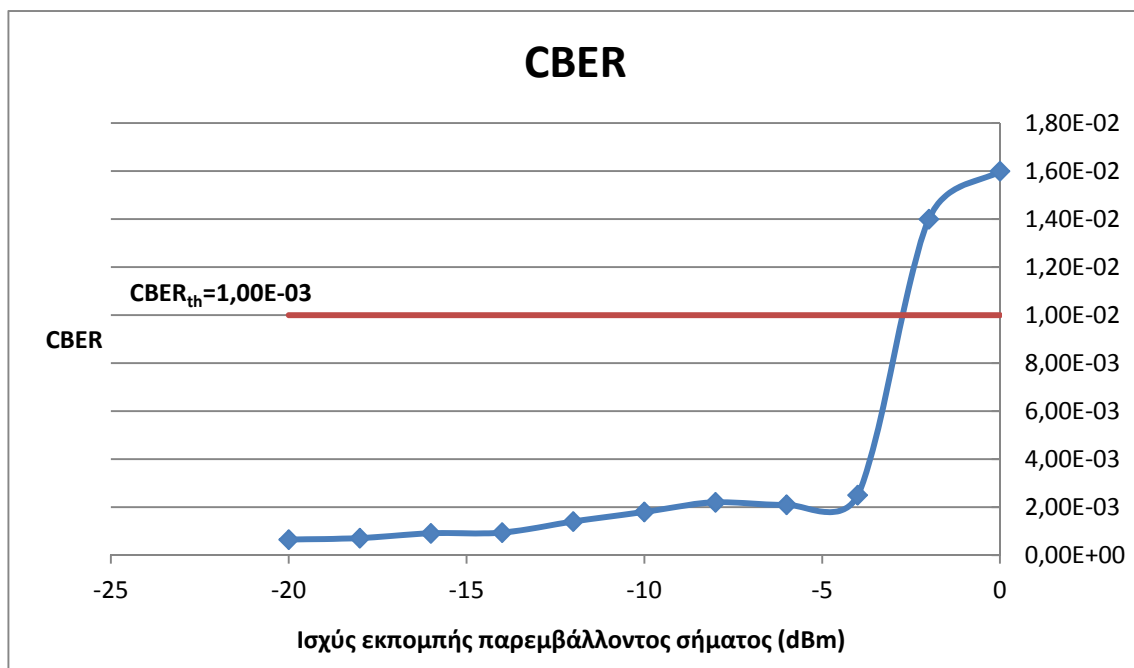
Σχήμα 3.34 SNIR υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



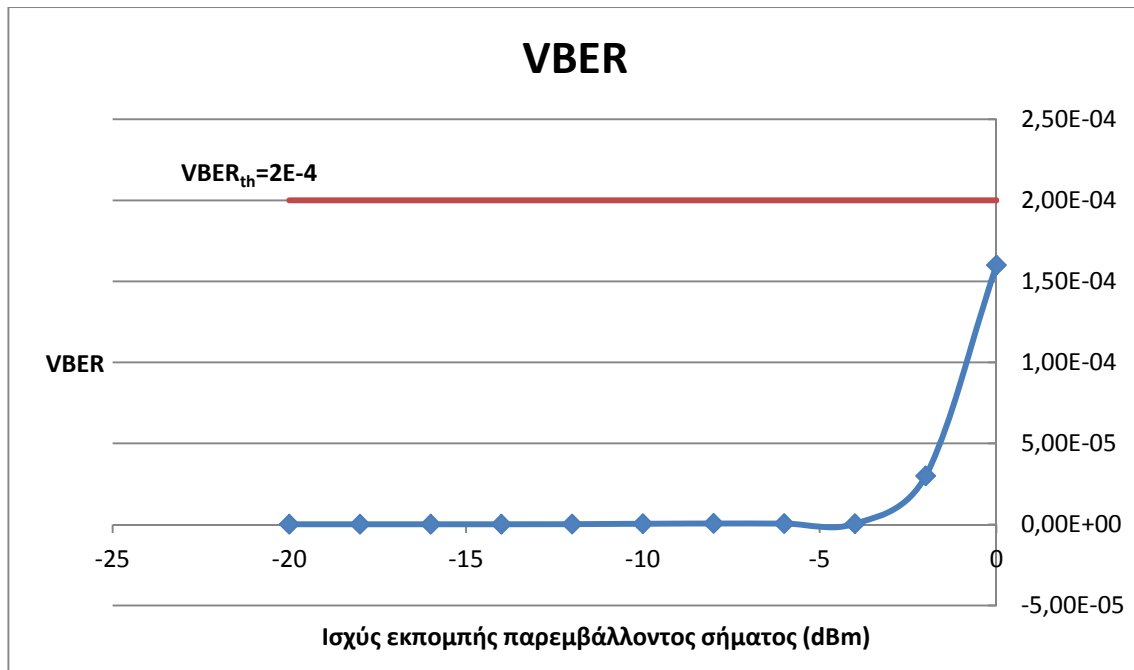
Σχήμα 3.35 Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



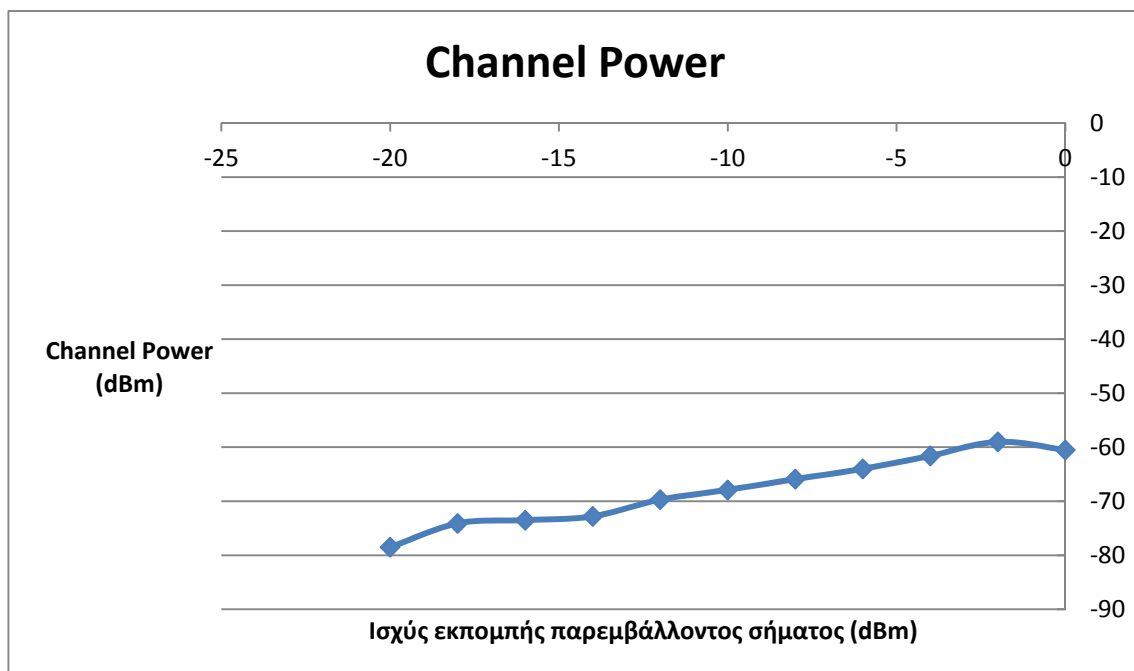
Σχήμα 3.36 MER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



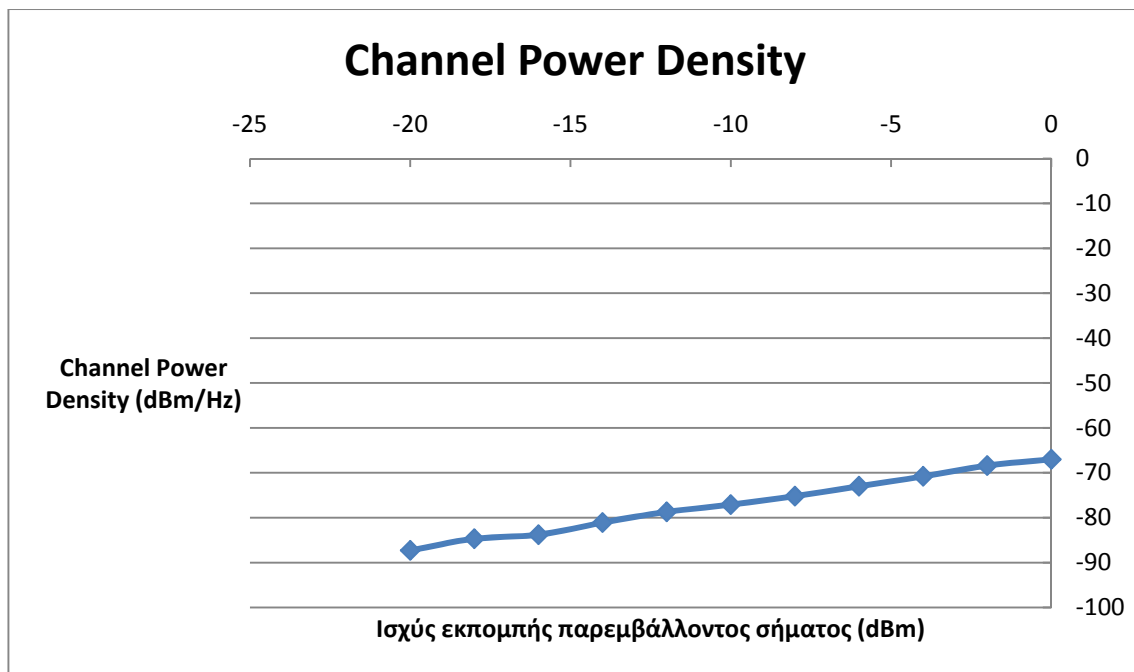
Σχήμα 3.37 CBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



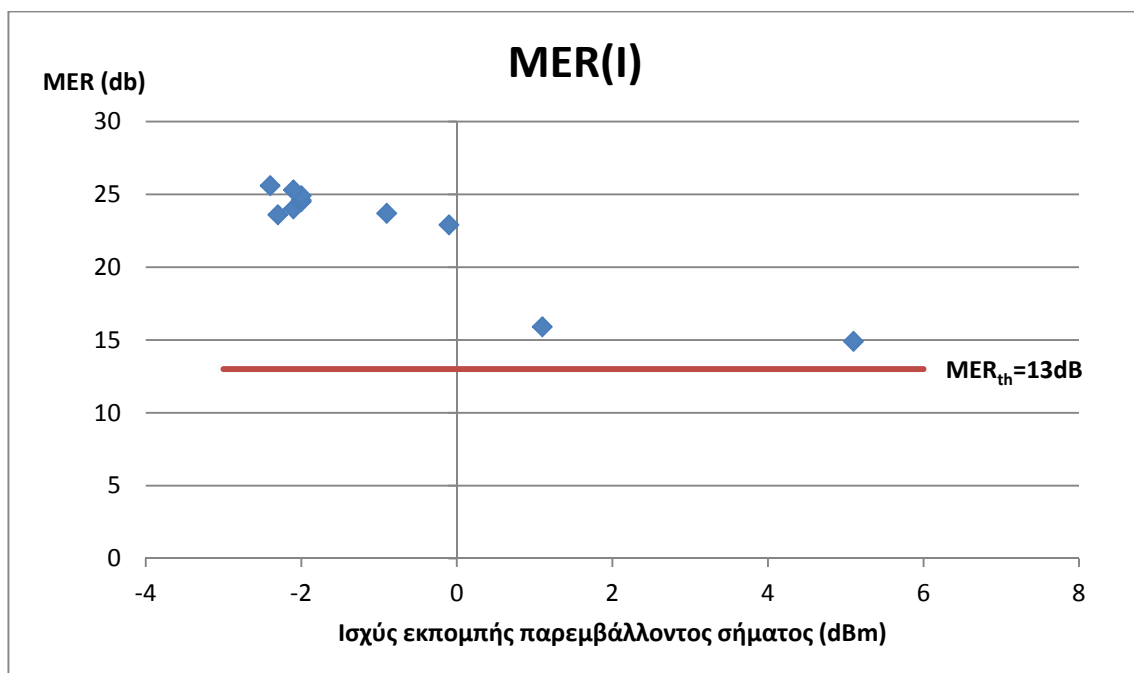
Σχήμα 3.38 VBER υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



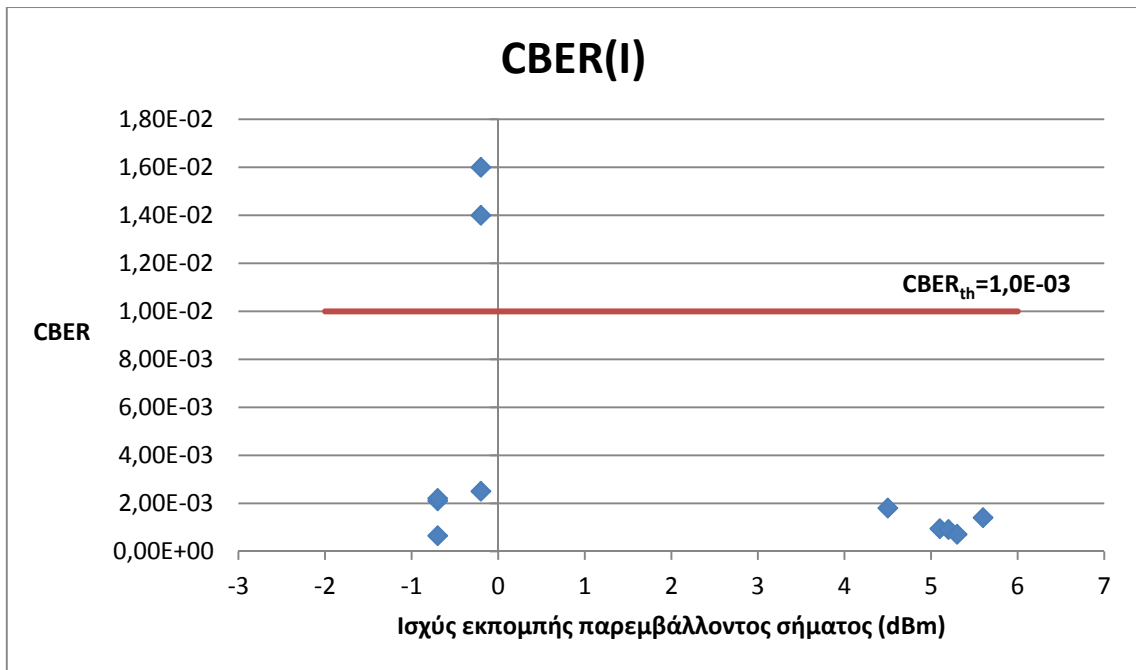
Σχήμα 3.39 Channel Power υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



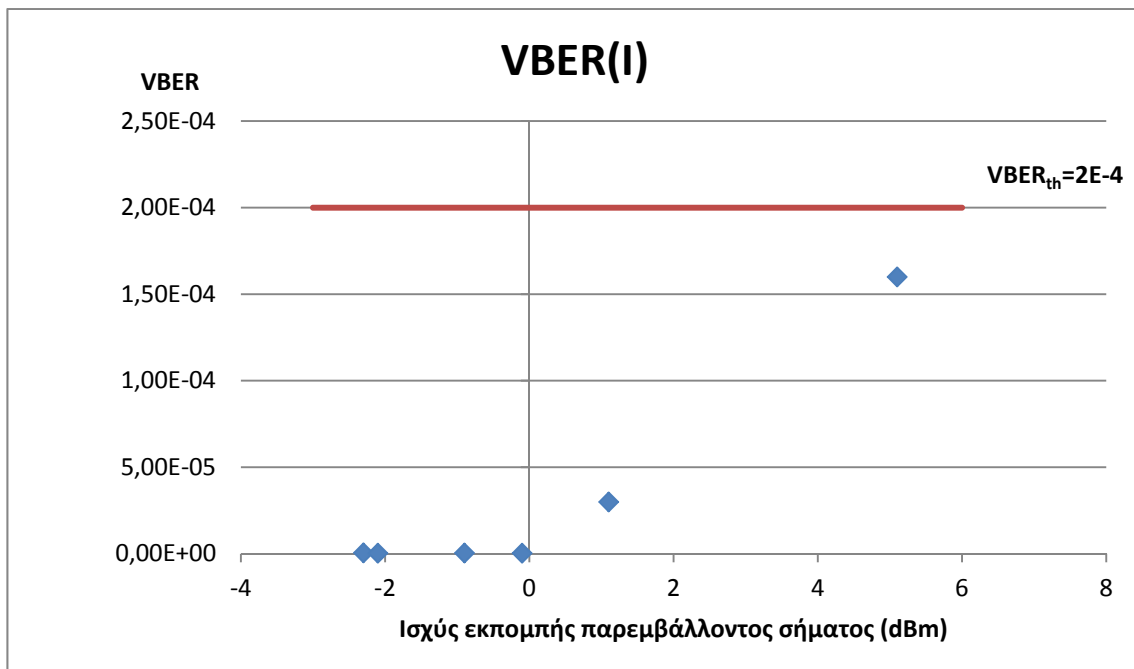
Σχήμα 3.40 Channel Power Density υπό την παρουσία παρεμβάλλοντος σήματος τύπου LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



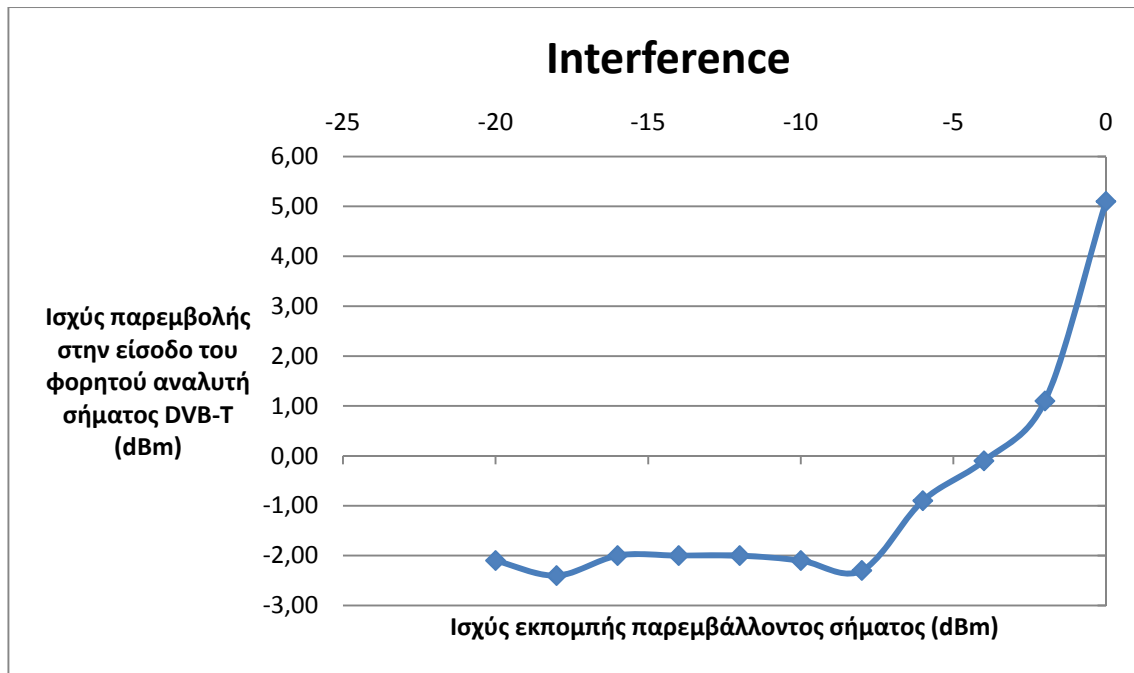
Σχήμα 3.41 MER συναρτήσεως της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.42 CBER συναρτήσει της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.43 VBER συναρτήσει της παρεμβολής για σήμα LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)



Σχήμα 3.44 Παρεμβολή συναρτήσει της ισχύος εκπομπής για σήμα παρεμβολής LTE (συχνότητα εκπομπής σταθερή)

3.7 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Κατά την πειραματική διαδικασία παρεμβάλαμε το τηλεοπτικό σήμα με δύο τύπους σημάτων. Στην πρώτη περίπτωση το σήμα παρεμβολής ήταν μονοχρωματικό, ενώ στην δεύτερη το σήμα παρεμβολής ήταν 4G LTE. Και για τα δύο είδη σημάτων το σήμα παρεμβολής ήταν μεταβλητό ως προς την συχνότητα και την ισχύ. Στην ενότητα αυτή αναφέρουμε κάποια συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παρουσιασθέντα διαγράμματα. Αρχικά αναφέρουμε ότι στην πλειονότητα των διαγραμμάτων φαίνονται και οι αντίστοιχες τιμές των κατωφλίων. Ειδικότερα στα διαγράμματα που δείχνουν την μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου φαίνονται τόσο ή απαιτούμενη (βάση QoS) τιμή όσο και η μετρούμενη τιμή δίχως την παρουσία παρεμβολής.

Στην περίπτωση **μονοχρωματικού τύπου σήματος όταν η ισχύς εκπομπής ήταν σταθερή**, παρατηρήσαμε μία **απότομη μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών στην κεντρική συχνότητα $f = 666 \text{ MHz}$** . Συγκεκριμένα, οι δείκτες *SNIR* και *MER* μειώθηκαν απότομα στην κεντρική συχνότητα ενώ οι δείκτες *Electric field*, *CBER*, *VBER*, *Channel Power*, *Channel Power Density* αυξήθηκαν απότομα στην κεντρική συχνότητα. Αναφέρουμε ότι οι δείκτες *Electric field*, *Channel Power*, *Channel Power Density* αυξάνονται επειδή η παρεμβολή δρα αθροιστικά στο τηλεοπτικό σήμα. Σύμφωνα με τα κατώφλια QoS που έχουν τεθεί από τον πάροχο επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης θα έπρεπε να διαπιστώσουμε παύση λειτουργίας της υπηρεσίας όταν η συχνότητα εκπομπής του μονοχρωματικού σήματος ήταν $f = 666 \text{ MHz}$ (Σχήμα 3.9), κάτι τέτοιο όμως δεν διαπιστώθηκε στην πράξη.

Στην περίπτωση του **μονοχρωματικού τύπου σήματος όταν η συχνότητα εκπομπής ήταν σταθερή** παρατηρήσαμε σχεδόν γραμμική εξάρτηση των μεγεθών *SNIR*, *Power*, *Channel Power*, *Channel Power Density*, *Interference* από την ισχύ παρεμβολής. Για ισχύ παρεμβολής μεγαλύτερη από -15 dBm σύμφωνα με το σχήμα 3.16 θα έπρεπε να διαπιστώσουμε παύση λειτουργίας της υπηρεσίας, κάτι τέτοιο όμως δεν διαπιστώθηκε στην πράξη.

Στην περίπτωση **σήματος τύπου LTE όταν η ισχύς εκπομπής ήταν σταθερή**, παρατηρήσαμε μία **βαθμιαία μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών γύρω από την κεντρική συχνότητα $f = 666 \text{ MHz}$** . Συγκεκριμένα, οι δείκτες *SNR* και *MER* μειώθηκαν βαθμιαία γύρω από την κεντρική συχνότητα ενώ οι δείκτες *Electric field*, *CBER*, *VBER*, *Channel Power*, *Channel Power Density* αυξήθηκαν βαθμιαία γύρω από την κεντρική συχνότητα. —Σύμφωνα με το σχήμα 3.27 η παρεμβολή δεν κατέστη δυνατό να οδηγήσει την τηλεοπτική υπηρεσία σε κατάρρευση.

Στην περίπτωση του σήματος τύπου LTE όταν η συχνότητα εκπομπής ήταν σταθερή παρατηρήσαμε σχεδόν γραμμική εξάρτηση των μεγεθών *SNIR*, *Power*, *Channel Power*, *Channel Power Density*, *Interference* από την ισχύ παρεμβολής. Επίσης παρατηρήθηκε λογαριθμική εξάρτηση των μεγεθών *MER*, *CBER*, *VBER* από την ισχύ παρεμβολής. Σύμφωνα με το σχήμα 3.34 η ισχύς παρεμβολής **δεν κατέστη δυνατό να οδηγήσει την τηλεοπτική υπηρεσία σε παύση λειτουργίας**. Από τα σχήματα 3.12, 3.13, 3.19, 3.20, 3.24, 3.25, 3.30, 3.31, 3.37, 3.38, 3.42, 3.43 φαίνεται η δραστική βελτίωση του ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος (θωράκιση) λόγω της προσθήκης της βαθμίδος Viterbi στην κωδικοποίηση του σήματος.

Παράρτημα Α Συμπληρωματικοί πίνακες⁴

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αντιστοιχία των καναλιών με την κεντρική συχνότητα με την οποία αντιστοιχίζονται.

| Αριθμός διαύλου | Κεντρική Συχνότητα (MHz) |
|-----------------|--------------------------|
| 21 | 474 |
| 22 | 482 |
| 23 | 490 |
| 24 | 498 |
| 25 | 506 |
| 26 | 514 |
| 27 | 522 |
| 28 | 530 |
| 29 | 538 |
| 30 | 546 |
| 31 | 554 |
| 32 | 562 |
| 33 | 570 |
| 34 | 578 |
| 35 | 586 |
| 36 | 594 |
| 37 | 602 |
| 38 | 610 |
| 39 | 618 |
| 40 | 626 |
| 41 | 634 |
| 42 | 642 |
| 43 | 650 |
| 44 | 658 |
| 45 | 666 |
| 46 | 674 |
| 47 | 682 |
| 48 | 690 |
| 49 | 698 |
| 50 | 706 |
| 51 | 714 |
| 52 | 722 |
| 53 | 730 |
| 54 | 738 |
| 55 | 746 |
| 56 | 754 |
| 57 | 762 |
| 58 | 770 |
| 59 | 778 |
| 60 | 786 |

Πίνακας Α.1 Αντίστοιχη διαύλων – συχνοτήτων

⁴ Πηγές Παραρτήματος

Συχνότητες καναλιών τηλεόρασης στην Αθήνα – Αττική, Satspot.gr

Παρακάτω παρουσιάζουμε τους αναμεταδότες της Αττικής (για τα κέντρα εκπομπής Υμηττός, Πάρνηθα, Αίγινα) καθώς και τους τηλεοπτικούς σταθμούς που εξυπηρετούν.

| Συχνότητες τηλεοπτικών σταθμών (ψηφιακοί και αναλογικοί) στην Αττική (satspot.gr) Κέντρα εκπομπής (Αττική) | | | | |
|---|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Κανάλι | Συχνότητα | Υμηττός | Πάρνηθα | Αίγινα |
| 21 | 474 MHz | DT DIGITAL 01 | DT DIGITAL 01 | DT DIGITAL 01 |
| 22 | 482 MHz | DIGEA 01 | DIGEA | DIGEA |
| 27 | 522 MHz | DIGEA | DIGEA | DIGEA |
| 28 | 530 MHz | DT DIGITAL 02 | DT DIGITAL 02 | DT DIGITAL 02 |
| 45 | 666 MHz | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 01 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 01 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 01 |
| 52 | 722 MHz | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 02 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 02 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 02 |
| 54 | 738 MHz | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 03 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 01 | MULTI ΑΤΤΙΚΙ 03 |
| 60 | 786 MHz | 4 ΠΕΙΡΑΤΙΚΑ | - | - |
| 68 | 850 MHz | 4 ΠΕΙΡΑΤΙΚΑ | - | - |

Πίνακας Α.2 Οι αναμεταδότες στην Αττική

| Ψηφιακά κανάλια/μπουκέτα στην Ελλάδα (satspot.gr) | |
|---|---|
| Μπουκέτο | Σταθμοί |
| DT DIGITAL 01 C 21 F 474 MHz | N1 N SPORTS N HD |
| DT DIGITAL 02 C 28 F 530 MHz | Vouli PIK BBC World DW TV5 |
| DIGEA 01 C 22 F 482 MHz | Alpha Antenna Macedonia TV |
| DIGEA 02 C 27 F 522 MHz | Mega TV SKAI STAR E |
| MULTIPLEX ΑΤΤΙΚΙ 01 C 45 F 666 MHz | ΑΤΤΙΚΑ EXTRA 3 HIGH TV NICKELODEON |
| MULTIPLEX ΑΤΤΙΚΙ 02 C 52 F 722 MHz | SMILE TV MAD TV MTV GREECE SPORT TV SUNNY Zoom |
| MULTIPLEX ΑΤΤΙΚΙ 03 C 54 F 738 MHz | C9 KONTRA BLUE SKY APT |

Πίνακας Α.3 Ψηφιακά κανάλια στην Αττική

Βιβλιογραφία

- 1) [Μελέτη παρεμβολής προτύπου DVB-T επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης με κινητές υπηρεσίες τέταρτης γενιάς \(4G\) LTE FDD](#), Ιωάννης Δ. Σταυρόπουλος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2011
- 2) [Ανάλυση και μέτρηση παρεμβολής στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση από κινητές υπηρεσίες \(LTE FDD, LTE TDD, CDMA 2000\)](#), Γεώργιος Δ. Μαμαρέλης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Ιούλιος 2010
- 3) [Η μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση: Τεχνικό Πλαίσιο Μετάβασης Ψηφιακό Μέρισμα](#), Παπασπάνος Νικόλαος, Διπλωματική εργασία, Αθήνα Οκτώβριος 2011
- 4) [Η μετάβαση στην ψηφιακή τηλεόραση, Μουσίτσας Χρήστος](#), Πτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη 2008
- 5) [2nd Generation Terrestrial](#), DVB Project Office, dvb.org
- 6) [Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer](#), Jim Zyren, jzyren@freescale.com, Dr. Wes McCoy, Technical Editor
- 7) [LTE: The Evolution of Mobile Broadband](#), David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall, Ericsson Research
- 8) [Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας σε κινητά OFDMA δίκτυα](#), Διπλωματική Εργασία, Γεώργιος Μ. Καβουργιάς, Πάτρα 2011
- 9) [Fractional Frequency Reuse and Interference Suppression for OFDMA Networks](#), Rizwan Ghaffar, Raymond Knopp, Eurecom
- 10) [Χάρτης συχνοτήτων](#), Digea
- 11) ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 2704, [Χάρτης Συχνοτήτων Επίγειας Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Τηλεοπτικού Σήματος](#), 5 Οκτωβρίου 2012
- 12) [UHF TV band spectrum and field-strength measurements before and after analogue switch-off](#), P. I. Lazaridis, S. Kasampalis, Z. D. Zaharis, J. Cosmas, A. Bizopoulos, P. Latkoski, L. Gavrilovska, O. Fratu, and R. Prasad.
- 13) ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1956, [Εκχώρηση φάσματος επίγειας ψηφιακής ευρυεκπομπής στη «ΝΕΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΡΑΔΙΟΦΩΝΙΑ, INTERNET ΚΑΙ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ Α.Ε.» \(NERIT A.E\)](#), 12 Αυγούστου 2013
- 14) [Συχνότητες καναλιών τηλεόρασης στην Αθήνα – Αττική](#), Satspot.gr
- 15) ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ, τεύχος Δεύτερο, Αρ. Φύλλου 1444, [Έγκριση Εθνικού Κανονισμού Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων \(ΕΚΚΖΣ\)](#), 2 Μαΐου 2012
- 16) [Promax TV Explorer II manual](#), Promax
- 17) [Αναλυτής φάσματος Anritsu MS2721A manual](#), Anritsu
- 18) [Γεννήτρια Rohde&Schwarz SMBV100A quick start guide](#), Rohde & Schwarz
- 19) [Κεραία BicoLOG 20300 datasheet](#), Aeronia
- 20) [Κεραία Schaffner CBL6141A datasheet & specifications](#), Test equipment connection
- 21) [Measurements on the performance of Dvb-T receivers in the presence of interference from the mobile service \(especially from lte\)](#), Marseille June 2010, Electronic Communications Committee (ECC)

22) [Η σωστή ερμηνεία των μετρήσεων MER CBER & VBER](#), Θανάσης Κυριακόπουλος, ΤΕΧΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ