



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη παροχής υπηρεσιών TCP / IP σε κινητό δέκτη
επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Α. Τσίρκας

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη παροχής υπηρεσιών TCP / IP σε κινητό δέκτη επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Α. Τσίρκας

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Δεκεμβρίου 2003.

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καμάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2003

Περίληψη

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας δίνει πλέον τη δυνατότητα στις τηλεπικοινωνίες και την ψηφιακή τηλεόραση – δύο διακριτούς τεχνολογικούς τομείς οι οποίοι μέχρι πρόσφατα ακολουθούσαν παράλληλη πορεία, κατέχοντας διαφορετική θέση ως προς την παροχή υπηρεσιών – να αλληλοσυμπληρωθούν και συνεργαζόμενοι σε αμφίδρομα δίκτυα να παρέχουν περισσότερες και ποιοτικά ανώτερες υπηρεσίες προς όφελος πάντα, του τελικού χρήστη.

Παράλληλα όμως, με την εξέλιξη της τεχνολογίας δημιουργήθηκε και μια καινούργια απαίτηση από τη μεριά του καταναλωτικού κοινού. Αυτή είναι η πραγματοποίηση μεταφοράς τηλεοπτικού σήματος αλλά και υπηρεσιών TCP / IP σε κινητό δέκτη μέσω αμφίδρομων συστημάτων επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T).

Ενώ έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες ως προς τη μεταφορά του τηλεοπτικού σήματος, η συμπεριφορά του αμφίδρομου δικτύου από τη μεριά των υπηρεσιών TCP / IP και ιδιαίτερα όταν το σήμα κατευθύνεται σε κινητό δέκτη, δεν έχει ακόμα εξερευνηθεί. Αυτό ακριβώς το κενό πεδίο, έρχεται να καλύψει η παρούσα διπλωματική εργασία, στα πλαίσια της οποίας, πιο συγκεκριμένα, έγιναν εκτενείς μετρήσεις ως προς τη συμπεριφορά του σήματος σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων που προκαλούνται από την κίνηση του δέκτη, για διάφορες παραμέτρους εκπομπής και λήψης όπως είναι η μέθοδος διαμόρφωσης και ο σηματοθορυβικός λόγος λήψης.

Λέξεις Κλειδιά

DVB-T, GPRS, TCP / IP, κινητός δέκτης, κινητές επικοινωνίες, αμφίδρομα δίκτυα, διαλείψεις, Rayleigh, μετρήσεις.

Abstract

The evolution of technology makes it now possible for telecommunications and digital television – two separate technological fields that until now, had been following parallel paths, owning a different place in service providing – to join forces and by co-operating in interactive systems to provide services superior in quantity and quality, as a benefit to the final user.

Along with the evolution of technology, a new demand from the consuming community has arisen. This is to provide both digital video and TCP / IP services to mobile users through interactive systems of terrestrial digital television broadcasting (DVB-T).

Whilst there have been extensive studies on the transmission of the video signal, the behavior of the interactive system from the TCP / IP services side and especially in mobile reception, has not yet been exploited. This field is this diploma thesis' primary target, throughout of which, in particular, there has been a complete set of measurements to reveal the behavior of the signal through a selective frequency fading channel caused by the mobile reception, as a function of various parameters of transmission and reception such as the method of modulation and the carrier to noise ratio on the receiver.

Key Words

DVB-T, GPRS, TCP / IP, mobile reception, mobile communications, interactive systems, fading, Rayleigh, measurements.

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή ΕΜΠ κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για την πολύ καλή συνεργασία και κατανόηση που υπήρχε μεταξύ μας καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής. Θερμές ευχαριστίες αξίζουν στον ερευνητή του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε "Δημόκριτος" κ. Αναστάσιο Κούρτη και τον επιβλέποντα υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Γαρδίκη για τη βοήθεια, την υλική υποδομή και την κάθε μορφής υποστήριξη που μου παρείχαν, καθώς επίσης και σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου για την κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και το πολύ φιλικό περιβάλλον και ιδιαίτερα στον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Ξυλούρη για την αμέριστη συμβολή και βοήθειά του.

Περιεχόμενα

ΜΕΡΟΣ Α

1. Εισαγωγή	- 19 -
2. Ψηφιακή τηλεόραση κατά τα πρότυπα DVB	- 21 -
2.1 Γενικά	- 21 -
2.2 DVB – ένα αποδεδειγμένο πρότυπο	- 21 -
2.3 Βελτιστοποιημένες λύσεις για διαφορετικές πλατφόρμες	- 22 -
2.4 DVB-MHP	- 23 -
2.5 Διαδικασία τυποποίησης του DVB	- 24 -
2.6 Τα πρότυπα του DVB σε όλο τον κόσμο	- 25 -
2.7 Το μέλλον των προτύπων DVB	- 26 -
3. Το πρότυπο DVB-T	- 29 -
3.1 Συνοπτική περιγραφή των σταδίων της διαμόρφωσης DVB-T	- 31 -
3.1.1 Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (randomization)	- 31 -
3.1.2 Εξωτερική κωδικοποίηση και συνελκτική διεμπλοκή	- 31 -
3.1.3 Εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή	- 32 -
3.1.4 Διαμόρφωση και μετάδοση	- 33 -
3.2 Ωφέλιμο bit rate	- 35 -
4. Μετάδοση δεδομένων IP πάνω από το κανάλι DVB-T	- 37 -
5. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου αμφίδρομης ψηφιακής τηλεόρασης	- 39 -
5.1 Αρχιτεκτονική του service provider	- 41 -
5.2 Το σύστημα του τελικού χρήστη	- 41 -
6. Διαλείψεις	- 43 -
6.1 Εισαγωγή	- 43 -
6.2 Προκαταρκτικές έννοιες	- 44 -
6.3 Βασικά στοιχεία των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων	- 46 -

6.3.1	Σταθερή Φάση	- 47 -
6.3.2	Pure Doppler	- 49 -
6.3.3	Διαλείψεις Rice	- 51 -
6.3.4	Διαλείψεις Rayleigh	- 53 -

ΜΕΡΟΣ Β

7.	Το ασύμμετρο δίκτυο της διπλωματικής εργασίας	- 59 -
7.1	Γενικά	- 59 -
7.2	Τοπολογία του δικτύου	- 60 -
7.3	Τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου	- 62 -
7.3.1	Server	- 62 -
7.3.2	IP/DVB-T Gateway	- 62 -
7.3.3	Fading Simulator	- 62 -
7.3.4	Ipricot IPR-S500	- 63 -
7.3.5	Client	- 64 -
7.3.6	Dummynet	- 64 -
7.3.7	Ethernet hub / Layer 3 switch	- 64 -
8.	Τελικές ρυθμίσεις του συστήματος	- 65 -
8.1	Downlink	- 65 -
8.1.1	Δημιουργία διαύλου με διαλείψεις	- 65 -
8.1.2	Εισαγωγή θορύβου στο δίαυλο	- 69 -
8.1.3	Ρυθμίσεις του διαμορφωτή	- 70 -
8.1.4	Πολυπλέκτης IP / MPEG-2 πακέτων	- 70 -
8.2	Uplink	- 71 -
8.2.1	Dummynet	- 71 -
9.	Μετρήσεις	- 73 -
9.1	Οι παράμετροι των μετρήσεων	- 73 -
9.2	Η μέθοδος των μετρήσεων	- 75 -
9.3	Η διεξαγωγή μιας ενιαίας μέτρησης	- 76 -
9.4	Οι τελικές μετρήσεις	- 83 -

9.4.1	Πίνακες	- 83 -
9.4.2	Διαγράμματα	- 87 -
9.4.2.1	Ομάδα διαγραμμάτων 1 – Το throughput συναρτήσει της ταχύτητας δέκτη και του CNR	- 87 -
9.4.2.2	Ομάδα διαγραμμάτων 2 - Η συμπεριφορά του throughput συναρτήσει της διαμόρφωσης, του Code Rate και του FFT mode	- 98 -
9.5	Μελέτη της συμπεριφοράς του throughput για μεγαλύτερες τιμές του CNR ..	- 103 -
10.	Επίλογος – Συμπεράσματα – Περαιτέρω έρευνα	- 109 -
11.	Βιβλιογραφία	- 111 -

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1	Μπλοκ διάγραμμα ενός διαμορφωτή DVB-T	- 29 -
Σχήμα 3.1.1.1	Τυχαιοποίηση των εισερχόμενων δεδομένων	- 30 -
Σχήμα 3.1.2.1	Μορφή των δεδομένων μετά την διαδικασία της προσαρμογής, τυχαιοποίησης, εξωτερικής κωδικοποίησης και διεμπλοκής	- 31 -
Σχήμα 3.1.3.1	Εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή	- 32 -
Σχήμα 2.1.4.1	Φάσμα του σήματος OFDM	- 33 -
Σχήμα 4.1	Ενσωμάτωση της MAC address στο section header	- 37 -
Σχήμα 5.1	Αρχιτεκτονική γενικού μοντέλου αμφίδρομων δικτύων DVB	- 39 -
Σχήμα 5.2.1	DVB-T δέκτης υπό μορφή PCI κάρτας	- 41 -
Σχήμα 6.2.1	Μορφές διαλείψεων και εξασθένηση διαύλου	- 43 -
Σχήμα 6.3.1.1	Ανακλάσεις	- 46 -
Σχήμα 6.3.1.2	Σταθερή Φάση	- 47 -
Σχήμα 6.3.2.1	Περίπτωση με σταθερή γωνία $\varphi = 90^\circ$	- 49 -
Σχήμα 6.3.2.2	Φαινόμενο Doppler	- 49 -
Σχήμα 6.3.3.1	Διαλείψεις Rice	- 50 -
Σχήμα 6.3.3.2	Φάσμα Rice	- 51 -
Σχήμα 6.3.3.3	Διαλείψεις Rice, Ισχύς συναρτήσεως χρόνου	- 52 -
Σχήμα 6.3.4.1	Rayleigh fading	- 53 -
Σχήμα 6.3.4.2	Φάσμα Rayleigh	- 54 -
Σχήμα 6.3.4.3	Διαλείψεις Rayleigh σε συνάρτηση με το χρόνο	- 54 -
Σχήμα 7.1.1	Το ασύμμετρο δίκτυο DVB-T / GPRS που θα προσομοιωθεί	- 58 -
Σχήμα 7.2.1	Προσομοίωση του ασύμμετρου δικτύου DVB-T / GPRS	- 59 -
Σχήμα 7.2.2	Η πολυπλεξία των δεδομένων IP και MPEG-2 και η δημιουργία του Transport Stream	- 60 -
Σχήμα 7.3.2.1	Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που φιλοξενεί το λογισμικό πολυπλεξίας	- 61 -
Σχήμα 7.3.3.1	Ο SFQ της ROHDE & SCHWARZ	- 62 -
Σχήμα 7.3.4.1	Ipricot IPR-S500	- 62 -
Σχήμα 8.1.1.1	Οι παράμετροι για το TU50	- 65 -
Σχήμα 8.1.1.2	Αρχικό φάσμα του σήματος	- 66 -
Σχήμα 8.1.1.3	Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 2 km/h	- 66 -

Σχήμα 8.1.1.4 Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 20 km/h	- 67 -
Σχήμα 8.1.1.5 Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 100 km/h	- 67 -
Σχήμα 8.1.2.1 Φάσμα του σήματος για CNR 10 dB	- 68 -
Σχήμα 8.1.2.2 Φάσμα του σήματος για CNR 30 dB	- 69 -
Σχήμα 8.1.4.1 Πολυπλεξία της υπηρεσίας IP 'Fading Sim' και του αρχείου video κατά το πρότυπο MPEG-2 'ts_2mbps' σε μία ενιαία έξοδο	- 70 -
Σχήμα 9.1.1 Ο δέκτης UBS PT 5765	- 73 -
Σχήμα 9.3.1 Κίνηση του δικτύου	- 77 -
Σχήμα 9.3.2 RTT συναρτήσει του χρόνου	- 81 -
Σχήμα 9.3.3 Το throughput συναρτήσει του χρόνου	- 81 -
Σχήμα 9.3.4 Congestion Window	- 82 -
Ομάδα διαγραμμάτων 1 – Το throughput συναρτήσει της ταχύτητας δέκτη και του CNR	- 87 -
Ομάδα διαγραμμάτων 2 – Η συμπεριφορά του throughput συναρτήσει της διαμόρφωσης, του Code Rate και του FFT mode	- 98 -
Μελέτη της συμπεριφοράς του throughput για μεγαλύτερες τιμές του CNR	- 104 -

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.2.1 Ωφέλιμο bitrate συναρτήσει του σχήματος διαμόρφωσης	- 34 -
Πίνακας Τελικών Μετρήσεων I	- 84 -
Πίνακας Τελικών Μετρήσεων II	- 85 -
Πίνακας 9.5.1 Throughput για μεγαλύτερες τιμές CNR	- 103 -

Μέρος Α

1. Εισαγωγή

Οι τηλεπικοινωνίες και η ψηφιακή τηλεόραση είναι δύο διακριτοί τεχνολογικοί τομείς οι οποίοι μέχρι πρόσφατα ακολουθούσαν παράλληλη πορεία, κατέχοντας διαφορετική θέση ως προς την παροχή υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Η ψηφιακή εκπομπή ευρείας κάλυψης (digital broadcasting) ασχολείται με μεταδόσεις από σημείο προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint) και στοχεύει στην διανομή ευρυζωνικών δεδομένων – συμπεριλαμβανομένης κινούμενης εικόνας και ήχου υψηλής ποιότητας – σε έναν μεγάλο αριθμό χρηστών. Αυτήν την φιλοσοφία ακολουθούν και τα συστήματα ψηφιακής τηλεόρασης που σταδιακά αναμένεται να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες αναλογικές τεχνολογίες.

Από την άλλη, τα σύγχρονα συστήματα ψηφιακών τηλεπικοινωνιών, κινητών και σταθερών, αναπτύσσονται κάτω από την φιλοσοφία της "ένα-προς-ένα" σύνδεσης, όπως είναι η προσωπική οπτικοακουστική επικοινωνία, και η ανταλλαγή δεδομένων peer-to-peer, συμπεριλαμβανομένης και της πρόσβασης στο Internet.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο διαφορετικών αυτών τύπων δικτύων μπορούν να αλληλοσυμπληρωθούν, προσφέροντας καινοτομικά αμφίδρομα δίκτυα που συνδυάζουν την αμφιδρομότητα (interactivity) με την παροχή ευρυζωνικών πολυμεσικών υπηρεσιών. Πάνω σε αυτήν την φιλοσοφία βασίζεται ακριβώς η ιδέα της αμφίδρομης εκπομπής (interactive broadcasting). Η αξία της σύγκλισης αυτής φαίνεται από το ενδιαφέρον που προσελκύουν παγκοσμίως οι ερευνητικές προσπάθειες που είναι εστιασμένες σε αυτήν την ιδέα.

Το δίκτυο που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία συνδυάζει την τεχνολογία της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DVB-T) με το ήδη υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας GPRS (General Packet Radio Service) για να προσφέρει στον τελικό χρήστη υπηρεσίες αμφίδρομης τηλεόρασης μαζί με υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες δεδομένων. Χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα DVB-T για το ευρυζωνικό downlink και χαμηλού ρυθμού κυψελωτή τεχνολογία για το uplink, εκμεταλλευόμαστε το βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων που παρέχουν υπηρεσίες πολυμέσων: ο όγκος των δεδομένων που προορίζεται

για τον τελικό χρήστη είναι πολύ μεγαλύτερος από την κίνηση που παράγει ο χρήστης (κυρίως αιτήσεις και επιβεβαιώσεις) και που στέλνεται πίσω στο δίκτυο μέσω του uplink.

Καθώς οι ρυθμοί της κοινωνίας και οι απαιτήσεις του καταναλωτικού συνόλου αυξάνουν, παρόλο που η τεχνολογία των αμφίδρομων δικτύων τηλεοπτικού σήματος και υπηρεσιών δεδομένων δεν έχει ολοκληρώσει τα στάδια της εξέλιξής της για την εξυπηρέτηση χρηστών σταθερών δικτύων, δημιουργήθηκε πρόωρα η ανάγκη για την ανάπτυξη αμφίδρομων δικτύων για την εξυπηρέτηση κινητών χρηστών. Η ανάγκη αυτή όμως, προϋποθέτει διαφορετική από αυτή των σταθερών χρηστών αντιμετώπιση, διότι με τους κινητούς χρήστες υπεισέρχονται νέες παράμετροι που μεταβάλλουν την απόδοση των δικτύων.

Το σήμα που ταξιδεύει από τον πομπό προς τον δέκτη του χρήστη, έχει πλέον να αντιμετωπίσει ένα δυσμενές γι'αυτό περιβάλλον διαλείψεων και φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης. Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό να εξερευνήσει τη συμπεριφορά της απόδοσης του αμφίδρομου δικτύου ως προς το περιβάλλον αυτό, όχι τόσο για την παροχή τηλεοπτικού σήματος για την οποία άλλωστε, ήδη έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες, αλλά περισσότερο για την παροχή υπηρεσιών δεδομένων η οποία αποτελεί ακόμα ανεξερεύνητο τομέα.

2. Ψηφιακή τηλεόραση κατά τα πρότυπα DVB

2.1 Γενικά

Η Ψηφιακή Τηλεοπτική Μετάδοση (Digital Video Broadcasting - DVB) καλύπτει όχι μόνο τη μετάδοση και τη διανομή του υλικού του τηλεοπτικού προγράμματος σε ψηφιακή μορφή μέσω διάφορων μέσων, αλλά και μια σειρά σχετικών χαρακτηριστικών λειτουργιών με σκοπό την εκμετάλλευση των ικανοτήτων της τεχνολογίας. Με βάση τη συμπίεση MPEG-2, το DVB αλλάζει τη βασική δυναμική της βιομηχανίας τηλεοπτικής μετάδοσης.

2.2 DVB – ένα αποδεδειγμένο πρότυπο

Η ψηφιακή τεχνολογία καταργεί πολλά από τα τεχνικά όρια που έχουν περιορίσει μέχρι τώρα την ανάπτυξη της βιομηχανίας μετάδοσης. Η ψηφιακή τεχνολογία αυξάνει τον αριθμό των απλών καναλιών εκπομπής που μπορούν να μεταδοθούν, την ποιότητα της λήψης και παρέχει στους θεατές ποιοτικά ανώτερη εικόνα μαζί με ήχο ποιότητας CD. Επιπλέον, ενσωματώνει ήχο, εικόνα και δεδομένα σε ένα ενιαίο μέσο και καθιστά διάφορες υπηρεσίες διαθέσιμες στο καταναλωτικό κοινό με χαμηλότερο κόστος.

Το DVB είναι ένα σύνολο προτύπων που έχει αναπτυχθεί για να φέρει την ψηφιακή τηλεόραση στο σπίτι εκμεταλλευόμενο τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας ολόκληρης σειράς υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των δορυφορικών, των καλωδιακών και των επίγειων. Λόγω της χρήσης των MPEG-2 πακέτων ως μεταφορέων δεδομένων, το DVB μπορεί να παραδώσει στο σπίτι σχεδόν οποιασδήποτε μορφής ψηφιακά δεδομένα, είτε αυτή είναι υψηλής ευκρίνειας τηλεοπτικό σήμα (High Definition TV - HDTV), είτε τηλεοπτικό σήμα προτύπου πολλαπλών καναλιών (PAL/NTSC ή SECAM) είτε ακόμα δεδομένα πολυμέσων ευρείας ζώνης και αμφίδρομων υπηρεσιών.

Τα πρότυπα του DVB είναι ανοικτά και διαλειτουργικά. Επειδή τα πρότυπα σχεδιάζονται όσο το δυνατόν με κοινοτοπία και βασίζονται στο γνωστό σύστημα κωδικοποίησης MPEG-

2, μπορούν να μεταφερθούν αβίαστα από κάποιο μέσο σε άλλο, κάτι το οποίο απαιτείται συχνά στο σημερινό σύνθετο περιβάλλον διανομής σήματος. Τα σήματα DVB μεταφέρονται εύκολα και ανέξοδα από το δορυφόρο στο καλώδιο και τελικά, από το καλώδιο προς κάποιο επίγειο προορισμό.

Η πρώτη ευρωπαϊκή εμπορική ψηφιακή τηλεοπτική υπηρεσία ξεκίνησε στη Γαλλία τον Απρίλιο του 1996. Εντούτοις, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, το 1998 ήταν το βασικό έτος κλειδί για μια σειρά από λόγους: κάποιες μεγάλες χώρες υιοθέτησαν τις ψηφιακές υπηρεσίες, η πρώτη ψηφιακή επίγεια υπηρεσία είχε προωθηθεί στη Μεγάλη Βρετανία και μια μεγάλη κίνηση για ψηφιοποίηση των καλωδιακών δικτύων είχε ξεκινήσει.

2.3 Βελτιστοποιημένες λύσεις για διαφορετικές πλατφόρμες

Τα δορυφορικά συστήματα, DVB-S, είναι τα παλαιότερα, πιο καθιερωμένα της οικογένειας των προτύπων DVB και διαμορφώνουν αδιαμφισβήτητα τον πυρήνα της επιτυχίας των DVB. Το σύστημα DVB-S είναι σχεδιασμένο να αντιμετωπίζει το πλήρες εύρος του φάσματος δορυφορικής αναμετάδοσης και οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το DVB-S διαπερνούν τις έξι κατοικούμενες ηπείρους. Η εικόνα, ο ήχος και άλλα δεδομένα ενθυλακώνονται στα καθορισμένου μήκους πακέτα μεταφοράς MPEG. Τα πακεταρισμένα δεδομένα αποτελούν το ωφέλιμο φορτίο, το οποίο μπορεί να φέρει οποιοδήποτε συνδυασμό MPEG-2 τηλεοπτικού και ακουστικού σήματος. Κατά συνέπεια οι φορείς παροχής υπηρεσιών είναι ελεύθεροι να παραδώσουν οτιδήποτε από πολυκαναλική τηλεόραση τυποποιημένης ευκρίνειας (multiple-channel Standard Definition Television - SDTV), τηλεόραση 16:9 ενισχυμένης ευκρίνειας (16:9 Widescreen Enhanced Definition Television - EDTV) ή μονού διαύλου HDTV έως υπηρεσίες μετάδοσης πολυμέσων, δικτύων μετάδοσης δεδομένων και εναέριου Internet.

Το καλωδιακό σύστημα DVB-C είναι βασισμένο στο DVB-S, αλλά το σχέδιο διαμόρφωσης είναι διαμόρφωση τετραγωνισμού πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation - QAM) αντί της διαμόρφωσης τετραγωνισμού μετατόπισης φάσης (Quadrature Phase Shift Keying - QPSK) που χρησιμοποιείται στο DVB-S. Το σύστημα είναι κεντραρισμένο σε 64QAM, αλλά επιτρέπει επίσης χαμηλότερου αλλά και υψηλότερου επιπέδου συστήματα. Σε κάθε

περίπτωση, υπάρχει μια αντίστροφη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας και της ποιότητας των δεδομένων. Σαν παράδειγμα της χωρητικότητας, ένα κανάλι 8 MHz που χρησιμοποιεί 64QAM μπορεί να φέρει χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου 38.5 Mbps που είναι η ίδια με τη μέση χωρητικότητα ενός αναμεταδότη 36 MHz.

Το σύστημα DVB-T προσφέρει ψηφιακή μετάδοση βασισμένη στις αρχές διαμόρφωσης πολλαπλών-φερόντων καλούμενη OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και QPSK/QAM. Η OFDM χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό φερόντων, τα οποία εξαπλώνουν την περιεχόμενη πληροφορία του σήματος. Χρησιμοποιημένη πολύ επιτυχώς στην Ψηφιακή Ραδιοφωνική Εκπομπή (Digital Audio Broadcasting - DAB), το σημαντικό πλεονέκτημα της OFDM είναι ότι τα καταφέρνει σε ένα πολύ ισχυρό περιβάλλον, που καθιστά δυνατή τη λειτουργία ενός επικαλυπτόμενου δικτύου σταθμών μετάδοσης μιας συχνότητας, και σε κατάσταση κινητού δέκτη.

Το σύστημα DVB διανομής σε πολλά σημεία (DVB Multipoint Distribution System) χρησιμοποιεί μικροκυματικές συχνότητες για την άμεση διανομή στα σπίτια των θεατών. Το DVB-MC είναι βασισμένο στο καλωδιακό σύστημα μετάδοσης DVB-C, και επομένως επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας κοινός δέκτης για καλωδιακή και αυτού του τύπου τη μικροκυματική μετάδοση. Το DVB-MC χρησιμοποιεί συχνότητες κάτω από 10 GHz. Το DVB-MS είναι βασισμένο στο δορυφορικό σύστημα μετάδοσης DVB-S. Τα σήματα DVB-MS μπορούν επομένως να παραληφθούν από DVB-S δορυφορικούς δέκτες, που απλά χρειάζεται να εξοπλιστούν με έναν μικρό μετατροπέα συχνότητας 'MMDS', ούτε καν ένα δορυφορικό πιάτο. Το DVB-MS χρησιμοποιεί συχνότητες άνω των 10 GHz.

2.4 DVB-MHP

Αναγνωρίζοντας την ανάγκη να εξετάσουν τη σύγκλιση των μέσων μετάδοσης, υπολογιστών και ηλεκτρονικών στο σπίτι, μερικά μέλη DVB έχουν αρχίσει να εξετάζουν τις επιπτώσεις που θα έχουν οι νέες ψηφιακές τεχνολογίες μετάδοσης στο σπίτι. Η ομάδα DVB Multimedia Home Platform (DVB-MHP) είναι το αποτέλεσμα. Στο σχηματισμό της ομάδας MHP συνετέλεσαν διάφορες ομάδες μεταξύ των οποίων και η Ευρωπαϊκή Ραδιοτηλεοπτική Ένωση (European Broadcasting Union - EBU) και η ευρωπαϊκή ένωση

των κατασκευαστών ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης (European Association of Consumer Electronics Manufacturers - EACEM).

Το DVB-MHP παρέχει μια ανοικτή λύση, επιτρέποντας σε πολλαπλούς φορείς παροχής υπηρεσιών να λειτουργήσουν μέσω ενός συμβατού οικονομικού δέκτη στο σπίτι. Επιτρέπει τη λειτουργία μιας ανοικτής αγοράς με πλήρη ανταγωνισμό σε όλα τα επίπεδα προς όφελος του καταναλωτή. Η λύση MHP καλύπτει ολόκληρο το σύνολο τεχνολογιών που είναι απαραίτητες για να εφαρμόσουν ψηφιακά διαλογικά πολυμέσα στο σπίτι, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων, τις κοινές γλώσσες API, τις διεπαφές και άλλα σχετικά. Το MHP περιλαμβάνει τους μετασχηματιστές, τους ενσωματωμένους δέκτες TV, τα εν οίκω ψηφιακά δίκτυα, τους προσωπικούς υπολογιστές, τους υπολογιστές δικτύων κ.λπ. Με άλλα λόγια, το MHP παρέχει τη σύγκλιση της ασύρματης μετάδοσης και του Διαδικτύου, επιτρέποντας σε όλους έτσι, τη συμμετοχή στην κοινωνία της πληροφορίας.

Οι προδιαγραφές του DVB-MHP εγκρίθηκαν από το σωματείο οδήγησης του DVB το Φεβρουάριο του 2000. Αυτό το πρότυπο έχει υιοθετηθεί από το Ινστιτούτο Ευρωπαϊκών Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunication Standards Institute – ETSI) τον Ιούλιο του 2000 και μπορεί να βρεθεί στην ιστοσελίδα του ETSI.

Περισσότερες από 40 εταιρείες και οργανισμοί είχαν συνδυάσει τις προσπάθειές τους για να εισαγάγουν υπηρεσίες και εξοπλισμό βασισμένα στο MHP το 2001. Αρχικά αυτό συνέβη στη Γερμανία και αργότερα επεκτάθηκε γρήγορα και σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες .

2.5 Διαδικασία τυποποίησης του DVB

Οι τεχνικές προδιαγραφές για το DVB αναπτύσσονται από το πρόγραμμα DVB (www.dvb.org). Μετά από την έγκριση από το σωματείο οδήγησης του προγράμματος DVB, οι προδιαγραφές DVB προσφέρονται για προτυποποίηση στο σχετικό σώμα προτύπων (ETSI ή CENELEC) μέσω της Τεχνικής Επιτροπής των EBU/ETSI/CENELEC (JTC Broadcast), του ITU-R, του ITU-T και του DAVIC (Digital Audio-Visual Council). Τα αντίγραφα των προτύπων είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του ETSI (www.etsi.org).

Το πρόγραμμα DVB έχει καθορίσει και έχει δημοσιεύσει τεχνικά πρότυπα, βασισμένα στο πρότυπο συμπίεσης εικόνας και ήχου MPEG-2 για ολόκληρη τη σειρά των μέσων τηλεοπτικής μετάδοσης. Αυτό άρχισε με το πλέον ώριμο δορυφορικό πρότυπο DVB-S και κινήθηκε για να καλύψει τις καλωδιακές, τις επίγειες, τις μικροκυματικές MDS και SMATV μεταδόσεις.

Αν και το DVB άρχισε σαν ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα, έχει διαδοθεί πλέον σε όλη την υδρόγειο, και, σαν αντίκρουσμα αυτού, τα μέλη του προγράμματος στοχεύουν τώρα στην επίτευξη παγκόσμιων προτύπων. Ο σύνδεσμος πραγματοποιείται τακτικά με το ITU-R και το ITU-T στην παγκόσμια τυποποίηση των συστημάτων που αναπτύσσονται στο πλαίσιο του προγράμματος του DVB. Το αποτέλεσμα είναι ένα περιεκτικό σύνολο διεθνών προτύπων που ενσωματώνουν τις προδιαγραφές του DVB. Ο εξοπλισμός του DVB και οι υπηρεσίες του πρακτικά πλέον χρησιμοποιούνται σε όλες τις χώρες του κόσμου.

2.6 Τα πρότυπα του DVB σε όλο τον κόσμο

Η τεχνική εξέλιξη επιταχύνει, και η διάρκεια ζωής των προϊόντων μικραίνει. Τα δημοσιευμένα τεχνικά πρότυπα του DVB έχουν ήδη γίνει αποδεκτά σε όλο τον κόσμο, η εργασία συνεχίζεται στο πρόγραμμα DVB καθώς επίσης και το ETSI συνεχίζει τις επεκτάσεις σε αυτά τα πρότυπα. Αυτά θα περιλαμβάνουν μια σειρά εκπληκτικών αμφίδρομων υπηρεσιών που θα επιτρέπουν στους θεατές να βιώσουν την τηλεόραση με απολύτως διαφορετικούς τρόπους, και να δουν τηλεοπτικές εικόνες υψηλότερης ευκρίνειας που θα απεικονίζονται σε μεγάλες, επίπεδες οθόνες.

Η Ευρώπη έχει την υψηλότερη πυκνότητα οικιών με τηλεοπτικό δέκτη στον κόσμο και οδηγεί την επέκταση της ψηφιακής τηλεόρασης μέσω του DVB δεδομένου ότι υπάρχουν καθιερωμένες ψηφιακές δορυφορικές και ψηφιακές επίγειες υπηρεσίες. Η Ευρώπη έχει υιοθετήσει το DVB για τη χρήση σε κάθε είδους πλατφόρμες.

Η ανάπτυξη της ψηφιακής τηλεόρασης στην Ανατολική Ευρώπη είναι αργή. Οι περισσότερες χώρες δεν έχουν προγραμματίσει ακόμα την επέκταση των ψηφιακών επίγειων υπηρεσιών.

Κοιτάζοντας πέρα από την Ευρώπη στο ψηφιακό επίγειο τηλεοπτικό περιβάλλον, η αγορά είναι πιο ανοιχτή. Η αγορά της Βόρειας Αμερικής ακολουθεί δικές της τεχνικές λύσεις για ψηφιακή τηλεόραση (τα πρότυπα ATSC). Στη Νότια Αμερική, όπου υπάρχει τεράστια δυνατότητα αγοράς, η μάχη δίνεται μεταξύ του DVB, του ιαπωνικού ανάλογου προς το DVB συστήματος (ISDB-T) και του ATSC. Στην Ασία, μια άλλη τεράστια αγορά, οι περιστάσεις ποικίλλουν από χώρα σε χώρα. Η Αυστραλία έχει υιοθετήσει το DVB-T ως μηχανισμό μετάδοσης HDTV, η Νέα Ζηλανδία έχει δεσμευθεί επίσης στο DVB-T. Η Ιαπωνία έχει τα δικά της πρότυπα, βασισμένα στο DVB. Η κατάσταση στις περισσότερες άλλες χώρες στις περιοχές αυτές παραμένει ανοικτή, αν και υπάρχει πολύ ενδιαφέρον για το DVB, το οποίο δοκιμάζεται μαζί με το ATSC. Η Κίνα έχει υιοθετήσει το δορυφορικό DVB (DVB-S) και οριστικοποιεί την υιοθέτηση του καλωδιακού DVB (DVB-C). Η Νότια Αφρική είναι η κύρια χώρα στην αφρικανική περιοχή όσον αφορά την ψηφιακή τηλεόραση, και τα δορυφορικά πρότυπα DVB χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή ραδιοτηλεοπτική αναμετάδοση σε όλη την Αφρική.

Σήμερα, το DVB είναι ένα πρότυπο που πραγματικά έχει εξαπλωθεί παγκοσμίως. Υπάρχουν πάνω από εκατοντάδες κατασκευαστών DVB στον κόσμο και οι υπηρεσίες DVB είναι διαθέσιμες σε περισσότερες από 50 χώρες στις 6 κατοικούμενες ηπείρους. Χιλιάδες προγράμματα μεταδίδονται μέσω της τεχνολογίας DVB. Ο αριθμός δεκτών DVB στον κόσμο φθάνει περίπου τα 20 εκατομμύρια.

2.7 Το μέλλον των προτύπων DVB

Αν και το μεγαλύτερο μέρος της βασικής εργασίας που περιλαμβάνεται στη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση έχει ολοκληρωθεί, πάντα προκύπτουν νέες ευκαιρίες ως αποτέλεσμα αυτής της μετάβασης. Για παράδειγμα, η JTC Broadcast έχει καταπιαστεί με τον καθορισμό των προδιαγραφών για το σύστημα αλληλεπίδρασης με άλλα δίκτυα συμπεριλαμβανομένων των τηλεοπτικών δικτύων, του παγκόσμιου συστήματος για κινητές επικοινωνίες (GSM), του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου (PSTN), του ISDN, του καλωδιακού και του δορυφορικού δικτύου.

Προσοχή έχει στραφεί επίσης, στους τρόπους με τους οποίους το σήμα μετάδοσης μπορεί να μεταφέρει νέους τύπους υπηρεσιών, ειδικότερα τις αμφίδρομες υπηρεσίες και αυτές που σχετίζονται με το Διαδίκτυο.

Κατ' αυτό τον τρόπο, η μετάδοση ακουστικού και ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος επεκτείνεται με την προσθήκη στις βασικές προδιαγραφές ώστε να επιτραπεί στους χρήστες να κάνουν πράγματα που δεν θεωρούνταν δυνατά όταν εισήχθη αρχικά η τεχνολογία.

3. Το πρότυπο DVB-T

Το πρότυπο DVB-T (*ETTS 300 744: Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T)*), όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζει τις προδιαγραφές για την επίγεια μετάδοση ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος. Αναπτύχθηκε, όπως και τα υπόλοιπα προαναφερθέντα standards, από το DVB Forum (www.dvb.org) και εγκρίθηκε από τον ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ως πανευρωπαϊκό πρότυπο το 1997. Το πρώτο επίγειο ψηφιακό πρόγραμμα ξεκίνησε στην Αγγλία έναν χρόνο αργότερα. Σήμερα, συστήματα DVB-T είναι σε χρήση στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τη Ρωσία, την Ανατολική Ευρώπη, την Ινδία, την Σιγκαπούρη και την Αυστραλία. Το σύστημα ATSC που αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι σαφώς τεχνολογικά υποδεέστερο, ενώ το ISDB-T της Ιαπωνίας βασίστηκε ουσιαστικά στη φιλοσοφία του DVB-T.

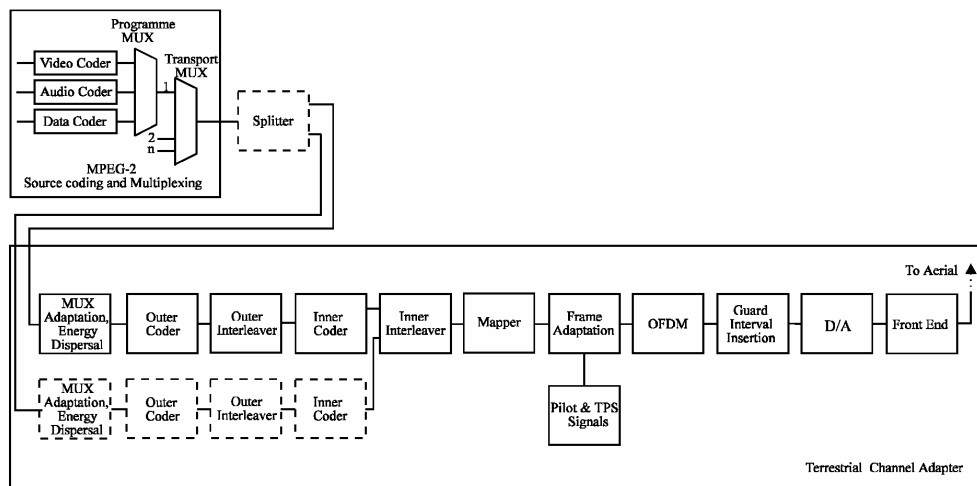
Καθώς το DVB-T από μόνο του ορίζει ένα σύστημα εκπομπής ευρείας κάλυψης (broadcasting) χωρίς αμφιδρομότητα και δεδομένου ότι η μορφή του σήματος βασικής ζώνης και ο αλγόριθμος συμπίεσης της εικόνας περιγράφεται στην προδιαγραφή MPEG-2, το πρότυπο DVB-T περιορίζεται στην περιγραφή των λειτουργιών του διαμορφωτή OFDM. Αυτός δέχεται από τον πολυπλέκτη το MPEG-2 Transport Stream που περιέχει πολυπλεγμένες της υπηρεσίες εικόνας, ήχου και δεδομένων υπό μορφή σήματος βασικής ζώνης, και παράγει το προς μετάδοση RF σήμα. Το τελευταίο έχει εύρος ζώνης 8MHz και είναι κεντραρισμένο σε ένα από τα κανάλια 21-69 της μάντας των UHF - δηλαδή όπως ακριβώς ένα αναλογικό τηλεοπτικό κανάλι.

Η λειτουργία του διαμορφωτή OFDM είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Το μπλοκ διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω δείχνει τις βασικές λειτουργίες της μετατροπής του σήματος βασικής ζώνης στο προς μετάδοση σήμα. Οι λειτουργίες αυτές, με τη σειρά που εφαρμόζονται στο MPEG-2 Transport Stream, είναι οι εξής:

- Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (randomization)
- Εξωτερική κωδικοποίηση (προστασία έναντι λαθών με κώδικα Reed-Solomon)
- Εξωτερική συνελκτική διεμπλοκή (convolutional interleaving)

- Εσωτερική κωδικοποίηση με διάτρητο συνελκτικό κώδικα (punctured convolutional code)
- Εσωτερική διεμπλοκή (inner interleaving) στον χρόνο και στη συχνότητα
- Αντιστοίχιση και διαμόρφωση των φερόντων
- Πολυπλεξία κατά OFDM με αντίστροφο ταχύ μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και διαμόρφωση του φέροντος IF
- Άνω μετατροπή (up-conversion) στην τελική RF συχνότητα.

Η τελευταία λειτουργία δεν υποστηρίζεται εγγενώς από αρκετούς διαμορφωτές, οπότε απαιτείται ένα εξωτερικό module για up-conversion.



Σχήμα 3.1 Μπλοκ διάγραμμα ενός διαμορφωτή DVB-T

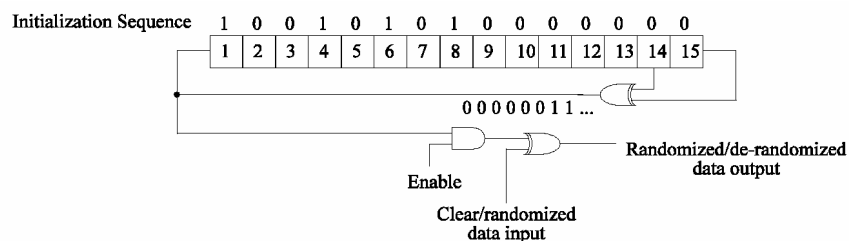
Οι μονάδες που σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές στο παραπάνω σχήμα αφορούν την επιλογή της ιεραρχικής διαμόρφωσης (hierarchical modulation) που υποστηρίζεται πλήρως από το πρότυπο DVB-T. Στην περίπτωση της ιεραρχικής διαμόρφωσης, το σήμα βασικής ζώνης προϋπάρχει διαιρεμένο σε δύο ρεύματα μεταφοράς (Transport Streams): ένα υψηλής προτεραιότητας (high priority) και ένα χαμηλής (low priority). Τα δύο σήματα διαμορφώνονται ταυτόχρονα σε ένα ιεραρχικό QAM σχήμα. Ως αποτέλεσμα, ένας δέκτης με κακές συνθήκες λήψης λαμβάνει μόνο το Transport Stream υψηλής προτεραιότητας, ενώ ένας με καλύτερες λαμβάνει και τα δύο. Η λειτουργία ιεραρχικής διαμόρφωσης παρέχει σημαντική ευελιξία στο σύστημα, ιδίως όταν συνοδευτεί από κλιμακωτή κωδικοποίηση της κινούμενης εικόνας κατά MPEG-2 (scalable MPEG-2 encoding). Δυστυχώς, η λειτουργία

αυτή υποστηρίζεται από λίγους διαμορφωτές και από ακόμη λιγότερους δέκτες και δεν εξετάζεται στην εργασία αυτή.

3.1 Συνοπτική περιγραφή των σταδίων της διαμόρφωσης DVB-T

3.1.1 Προσαρμογή MPEG-2 πακέτων και τυχαιοποίηση (randomization)

Το σήμα βασικής ζώνης που εισέρχεται στον διαμορφωτή είναι σταθερού ρυθμού (constant bit rate - CBR) και οργανωμένο σε πακέτα σταθερού μήκους των 188 bytes, σύμφωνα με το πρότυπο MPEG-2 Systems. Κάθε πακέτο ξεκινά με το byte συγχρονισμού, που είναι πάντα ίσο με 0x47. Προκειμένου να περιοριστεί το ενδεχόμενο να υπάρχουν μεγάλα διαστήματα χωρίς δυαδική μεταβολή (μακριές ακολουθίες "0" ή "1" - κάτι που συμβαίνει π.χ. σε πακέτα κενά περιεχομένου που χρησιμοποιούνται μόνο για stuffing), ακολουθείται μια διαδικασία τυχαιοποίησης. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1.1.1 Τυχαιοποίηση των εισερχόμενων δεδομένων

Το πολυώνυμο για την γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας είναι:

$$1 + X^{14} + X^{15}$$

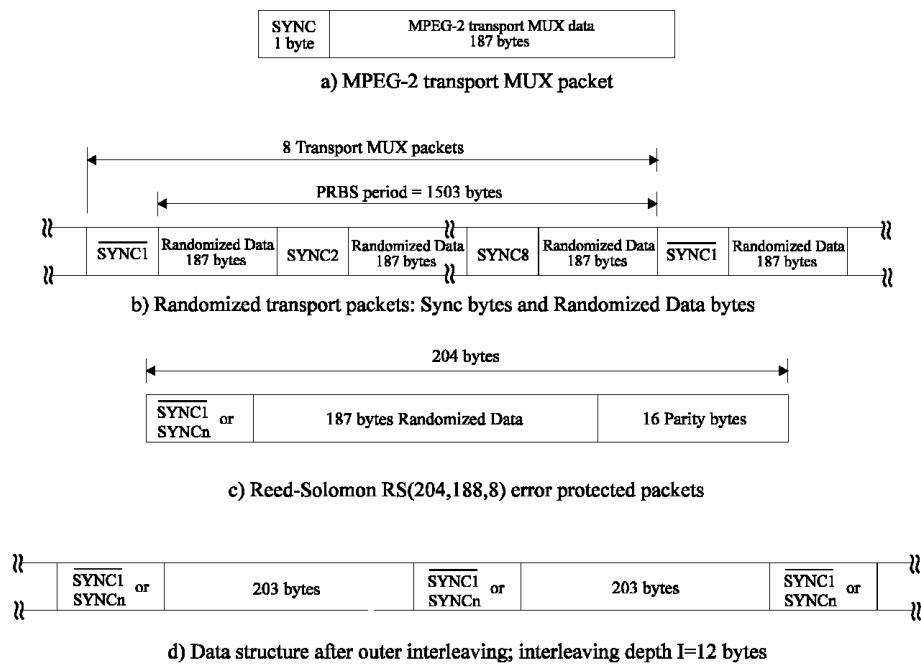
3.1.2 Εξωτερική κωδικοποίηση και συνελκτική διεμπλοκή

Μετά το στάδιο της τυχαιοποίησης ακολουθεί η εξωτερική κωδικοποίηση (outer coding). Ένας συντομευμένος κώδικας Reed-Solomon RS (204,188, t=8) που προκύπτει

από τον αρχικό συστηματικό κώδικα RS (255,239,t=8) εφαρμόζεται σε κάθε τυχαίο πακέτο των 188 bytes. Ο κώδικας Reed-Solomon αυξάνει το μήκος του πακέτου κατά 16 bytes, και επιτρέπει να διορθωθούν μέχρι και 8 λανθασμένα bytes σε τυχαίες θέσεις μέσα στο προστατευμένο πακέτο.

Μετά την κωδικοποίηση, τα προστατευμένα πακέτα υποβάλλονται σε μία συνελκτική διεμπλοκή (convolutional interleaving) με βάθος I=12. Η διαδικασία διεμπλοκής βασίζεται στη μέθοδο Forney.

Τα βήματα στη διαδικασία της προσαρμογής, τυχαιοποίησης, εξωτερικής κωδικοποίησης και διεμπλοκής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

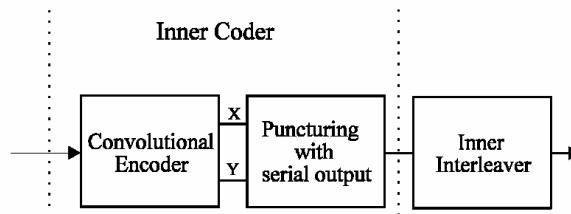


Σχήμα 3.1.2.1 Μορφή των δεδομένων μετά την διαδικασία της προσαρμογής, τυχαιοποίησης, εξωτερικής κωδικοποίησης και διεμπλοκής

3.1.3 Εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή

Το σύστημα επιτρέπει μια ευρεία επιλογή διάτρητων συνελκτικών κωδίκων (punctured convolutional codes), βασισμένων σε έναν μητρικό συνελκτικό κώδικα με ρυθμό 1/2. Τα πολώνυμα-γεννήτριες του μητρικού κώδικα είναι $G1 = 171_{OCT}$ για την

έξοδο X και $G2 = 133_{\text{OCT}}$ για την έξοδο Y . Επιπρόσθετα με τον μητρικό κώδικα, το σύστημα επιτρέπει διάτρητους κώδικες $2/3$, $3/4$, $5/6$ και $7/8$, εφαρμόζοντας συγκεκριμένα πρότυπα διάτρησης (puncturing patterns) στον μητρικό κώδικα.



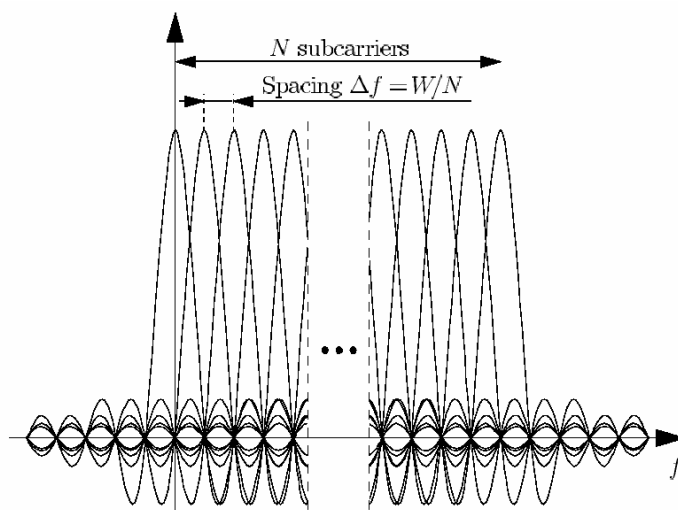
Σχήμα 3.1.3.1 Εσωτερική κωδικοποίηση και διεμπλοκή

Η έξοδος του εσωτερικού κωδικοποιητή υφίσταται διεμπλοκή (interleaving) τόσο σε επίπεδο bits όσο και σε επίπεδο συμβόλων. Η ακριβής αντιστοιχία των bits εισόδου στα τελικά διαμορφωμένα σύμβολα εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται. Η διαδικασία της εσωτερικής κωδικοποίησης και διεμπλοκής είναι αρκετά πολύπλοκη και η περιγραφή της ξεφεύγει από τον σκοπό αυτής της εργασίας.

3.1.4 Διαμόρφωση και μετάδοση

Η διαδικασία της εσωτερική διεμπλοκής παράγει μια ακολουθία από bits ήδη οργανωμένη σε σύμβολα QAM. Όπως προαναφέρθηκε, τα δυνατά σχήματα διαμόρφωσης είναι: QPSK (2 bits/symbol), 16QAM (4 bits/symbol) και 64QAM (6 bits/symbol). Τα constellation maps για κάθε τύπο διαμόρφωσης περιγράφονται αναλυτικά στο πρότυπο DVB-T.

Τα σύμβολα ομαδοποιούνται και μεταδίδονται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας πολυπλεξία OFDM. Κάθε σύμβολο OFDM αποτελείται από ένα σύνολο 6817 ("8k mode") ή 1705 ("2k mode") φερόντων και μεταδίδεται με διάρκεια $T_S=896\mu\text{sec}$ και $T_S=224\mu\text{sec}$ αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών φερόντων είναι $\Delta f=1116\text{Hz}$ και $\Delta f=4464\text{Hz}$ για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας αντίστοιχα. Η ορθογωνιότητα μεταξύ των φερόντων (εξ' ης και ο χαρακτηρισμός "orthogonal") εξασφαλίζεται από το γεγονός ότι $\Delta f=1/T_S$ πάντα. Με τη συνθήκη αυτή, η διάταξη των φερόντων αποκτά την εξής μορφή:



Σχήμα 2.1.4.1 Φάσμα του σήματος OFDM

Το συνολικό εύρος ζώνης του σήματος DVB-T ανέρχεται στα 7.61MHz.

Το κάθε σύμβολο OFDM αποτελείται από δύο μέρη: ένα ωφέλιμο τμήμα με διάρκεια T_U και ένα διάστημα φρούρησης (guard interval), με διάρκεια D . Το διάστημα φρούρησης αποτελείται από μια κυκλική επανάληψη του ωφέλιμου τμήματος, και εισάγεται πριν από αυτό. 68 διαδοχικά σύμβολα OFDM αποτελούν ένα πλαίσιο OFDM (OFDM frame), ενώ τέσσερα διαδοχικά πλαίσια αποτελούν ένα υπερ-πλαίσιο (OFDM super-frame).

Μέσα σε κάθε σύμβολο OFDM, οι πληροφορίες που μεταφέρονται από τα 6817 φέροντα μπορεί να είναι είτε δεδομένα είτε πληροφορίες συγχρονισμού και γενικώς δεδομένα χρήσιμα για την καλή λειτουργία του δέκτη. Τα φέροντα που δεν φέρουν πληροφορία διακρίνονται σε:

- Διεσπαρμένα φέροντα-πιλότοι (pilot carriers). Αυτά εκπέμπουν εκ περιτροπής ένα δεδομένο σήμα, το οποίο γνωρίζει ο δέκτης. Μετρώντας την ισχύ των φερόντων αυτών, ο δέκτης μπορεί ανά πάσα στιγμή να σχηματίσει μια εκτίμηση της απόκρισης συχνότητας (frequency response) του καναλιού.
- Σταθερά φέροντα-πιλότοι. Αυτά κατέχουν σταθερή θέση μέσα στο σύμβολο.
- Φέροντα σηματοδότησης παραμέτρων μετάδοσης (Transmission Parameter Signalling carriers). Αυτά κατέχουν επίσης σταθερή θέση μέσα στα σύμβολο, και πληροφορούν το δέκτη για τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση (ρυθμός

κωδικοποίησης, διάρκεια διαστήματος φρούρησης, τύπος διαμόρφωσης), ούτως ώστε ο δέκτης να μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα.

3.2 Ωφέλιμο bit rate

Η τιμή που τελικά ενδιαφέρει τον μέσο χρήστη μιας πλατφόρμας DVB-T είναι το ωφέλιμο bit rate που μπορεί να μεταφερθεί από το σήμα DVB-T, δηλαδή ο ρυθμός του MPEG-2 Transport Stream που μεταδίδεται. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από τη διάρκεια του διαστήματος φρούρησης, τον ρυθμό κωδικοποίησης και τον τύπο της διαμόρφωσης, όπως φαίνεται και στην ακόλουθο πίνακα (τιμές σε Mbps).

Modulation	Code rate	Guard interval			
		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 2.2.1 Ωφέλιμο bitrate συναρτήσει του σχήματος διαμόρφωσης

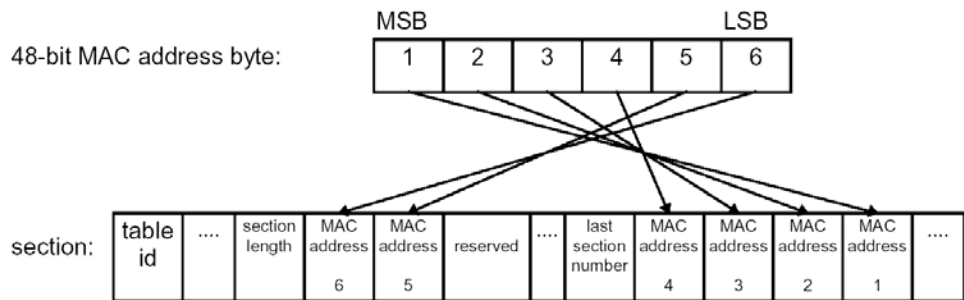
Ο συνδυασμός των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν βρίσκεται στην επιλογή του χρήστη. Γενικά πάντως ισχύει ότι όσο αυξάνει το bit rate, τόσο πιο ευάλωτο γίνεται το σήμα σε φαινόμενα διαλείψεων και πολυδιαδρομικής μετάδοσης (multipath).

4. Μετάδοση δεδομένων IP πάνω από το κανάλι DVB-T

Έχοντας εξασφαλίσει καλές συνθήκες μετάδοσης για το MPEG-2 Transport Stream πάνω από το κανάλι DVB-T, απομένει να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο τα πακέτα IP θα ενθυλακώνονται (encapsulate) πάνω στα MPEG-2 transport packets. Τα τελευταία έχουν σταθερό μήκος 188 bytes, εκ των οποίων τα 4 είναι η επικεφαλίδα (header). Προκειμένου λοιπόν τα IP πακέτα αφενός να ενθυλακωθούν στο ρεύμα μεταφοράς και αφετέρου να διακρίνονται σαφώς από τα πακέτα που μεταφέρουν τα προγράμματα ψηφιακής τηλεόρασης, πρέπει να υιοθετηθεί μια διαδικασία που να εκτελεί λειτουργίες αντιστοίχισης (mapping), προσαρμογής (adaptation) και κατακερματισμού (segmentation). Οι λειτουργίες αυτές ορίζονται από το πρότυπο ETSI EN 301 192 (*Digital Video Broadcasting (DVB); DVB specification for data broadcasting*). Το πρότυπο αυτό ορίζει τέσσερις διαφορετικές φιλοσοφίες ενθυλάκωσης:

- Διοχέτευση δεδομένων (data riping). Στη μέθοδο αυτή, τα δεδομένα των IP πακέτων ενσωματώνονται απευθείας ως φορτίο (payload) στα MPEG-2 transport packets.
- Ροή δεδομένων (data streaming). Η μέθοδος αυτή είναι πιο κατάλληλη για υπηρεσίες streaming over DVB. Το data stream διαμορφώνεται σε ένα συμβατό MPEG-2 Elementary Stream, το οποίο με τη σειρά του οργανώνεται σε πακέτα, κατά τη δομή του PES (Packetized Elementary Stream). Τέλος, τα πακέτα PES κατακερματίζονται και διανέμονται στο φορτίο των MPEG-2 transport packets.
- Ενθυλάκωση πολλαπλών πρωτοκόλλων (Multiprotocol encapsulation). Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε για να μεταφέρονται πακέτα διάφορων πρωτοκόλλων (π.χ. TCP/IP) πάνω από το κανάλι DVB. Τα πακέτα πληροφορίας ενσωματώνονται σε data sections, όπως αυτά ορίζονται στο πρότυπο MPEG-2 DSM-CC (ISO/IEC 18318-6). Με τη σειρά τους, τα data sections είναι πλήρως συμβατά με τη δομή private_section που ορίζεται στο MPEG-2 Systems (ISO/IEC 13818-1) και ενσωματώνονται απευθείας στο Transport Stream όπως ορίζει η παραπάνω προδιαγραφή. Από την πλευρά του χρήστη, τα πακέτα που προορίζονται γι' αυτόν διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα δεδομένα του Transport Stream με κριτήριο αφ'ενός

το πεδίο MAC (που αποθηκεύεται στα αντίστοιχα πεδία του section header, όπως δείχνει το σχήμα) και αφ' ετέρου με τη διεύθυνση IP, αν πρόκειται για πακέτα IP. Η τεχνική του Multiprotocol encapsulation είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 4.1 Ενσωμάτωση της MAC address στο section header

- Περιοδική εκπομπή δεδομένων (data carousel). Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη για μετάδοση δεδομένων χωρίς αμφιδρομότητα (interaction). Τα προς αποστολή δεδομένα - που αφορούν κυρίως μεγάλες ομάδες χρηστών παρά μεμονωμένους χρήστες- οργανώνονται σε ομάδες (groups) και εκπέμπονται κυκλικά ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να είναι προσπελάσιμα από τον καθένα.

5. Αρχιτεκτονική ενός δικτύου αμφίδρομης ψηφιακής τηλεόρασης

Αν η παροχή υπηρεσιών δεδομένων πάνω από μια πλατφόρμα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης περιοριστεί σε εφαρμογές multicasting, όπου τα δεδομένα εκπέμπονται περιοδικά με προορισμό μια μεγάλη ομάδα χρηστών (κατ' αναλογία του teletext της αναλογικής τηλεόρασης ή του RDS του ραδιοφώνου), τότε μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές σαν το data carousel ή το multicast data streaming της προηγούμενης παραγράφου. Έτσι, ο τελικός χρήστης μπορεί μέσω ενός κατάλληλου δέκτη και χωρίς επιπλέον εξοπλισμό να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες δεδομένων ευρείας ζώνης.

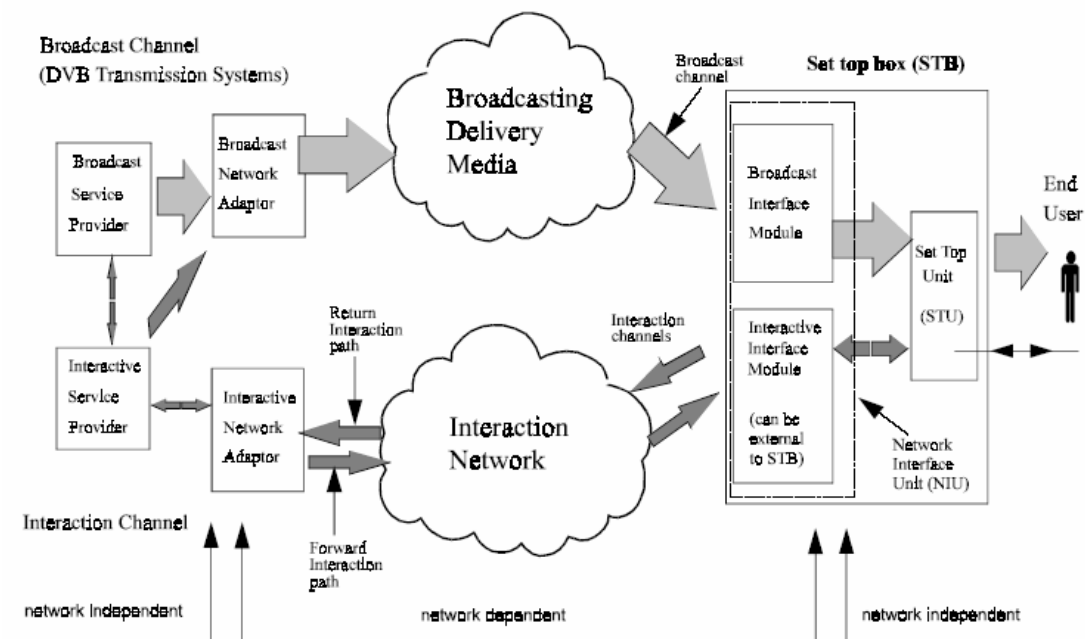
Αν όμως η υπηρεσία δεδομένων απαιτεί αμφίδρομότητα (π.χ. επικοινωνία χρήστη με χρήστη ή απλή πρόσβαση στο Internet) τότε, δεδομένου ότι το σύστημα DVB-T δεν προβλέπει κανάλι επιστροφής (uplink), είναι απαραίτητη η χρήση ενός ξεχωριστού δικτύου που θα μπορεί να υποστηρίξει IP κίνηση και που θα χρησιμοποιηθεί για αυτόν ακριβώς τον σκοπό.

Μέχρι τώρα, η τεχνική IP over DVB περιοριζόταν μόνο στο configuration του δορυφορικού DVB-S σε συνδυασμό με ένα απλό PSTN κανάλι επιστροφής. Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα:

- χρειάζεται ειδικό εξοπλισμό και εγκατάσταση για δορυφορική λήψη
- οι φτωχές επιδόσεις του τηλεφωνικού καναλιού περιορίζουν το ρυθμό του downlink σε αμφίδρομες ζεύξεις
- ο χρήστης πρέπει να ξεκινήσει μια διαδικασία σύνδεσης από την πλευρά του PSTN (dialup) κάθε φορά που θέλει να έχει πρόσβαση στο δίκτυο
- η μεγάλη καθυστέρηση που εισάγουν τόσο τα τηλεφωνικά modems όσο και η δορυφορική ζεύξη δημιουργούν έναν πολύ μεγάλο χρόνο ανακύκλωσης (round-trip delay time) που περιορίζει σημαντικά τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.

Αντιθέτως, η υλοποίηση ενός δικτύου ψηφιακής τηλεόρασης βασισμένου στην επίγεια τεχνολογία DVB-T επιτρέπει εύκολη και αξιόπιστη λήψη του ψηφιακού σήματος μέσω μιας απλής κεραίας UHF, εσωτερικής ή εξωτερικής. Επιπλέον, η τεχνολογία των ασυρμάτων δικτύων προσφέρει μόνιμη σύνδεση στο δίκτυο επιστροφής, παρέχοντας τη δυνατότητα της πρόσβασης οποιαδήποτε στιγμή (anytime access). Έτσι, το uplink μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για πρόσβαση στο Internet, αλλά και για αποστολή δεδομένων IP στον service provider (τηλεοπτικός σταθμός), υλοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα πλήρες δίκτυο πραγματικά αμφίδρομης (truly interactive) τηλεόρασης.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου αυτού φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5.1 Αρχιτεκτονική γενικού μοντέλου αμφίδρομων δικτύων DVB

Η χρήση της πλατφόρμας DVB-T για το downlink προσφέρει μία εκτεταμένη περιοχή κάλυψης (macrocell) εντός της οποίας βρίσκονται οι υπολογιστές των χρηστών. Το κανάλι επιστροφής μπορεί να στηρίζεται σε διάφορα συστήματα όπως κυψελωτό δίκτυο ασύρματου δικτύου δεδομένων (Wireless LAN – WLAN), απλό ενσύρματο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN), ψηφιακό τηλεφωνικό δίκτυο (ISDN) ή δίκτυο κινητής τηλεφωνίας GSM ή GPRS – το τελευταίο θα χρησιμοποιήσουμε και στο αμφίδρομο δίκτυο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

5.1 Αρχιτεκτονική του service provider

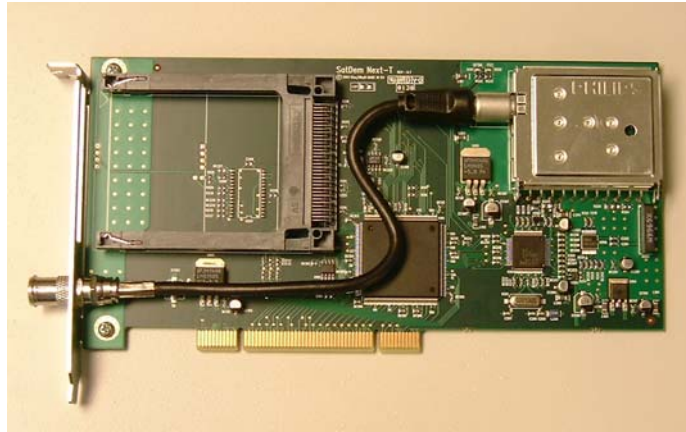
Ο "πυρήνας" της πλατφόρμας εκπομπής, που βρίσκεται υπό τον έλεγχο του service provider, αποτελείται από τον πολυπλέκτη MPEG-2, τον πομπό DVB-T και το τοπικό δίκτυο IP. Ένας σταθμός βάσης (Base Station - BS) του δικτύου που χρησιμοποιείται για το κανάλι επιστροφής, συλλέγει τα πακέτα των χρηστών που περιέχουν κυρίως αιτήσεις και επιβεβαιώσεις και τα στέλνει στον δρομολογητή του συστήματος (IP Routing Gateway). Αυτός δρομολογεί τα πακέτα στο τοπικό δίκτυο ενώ ταυτόχρονα απαγορεύει την αντίστροφη ροή κίνησης, καθιστώντας έτσι το κανάλι επιστροφής χρησιμοποιήσιμο αυστηρά για το uplink και όχι για διανομή πληροφορίας. Τα δεδομένα που στέλνονται στο δίκτυο του service provider από τους χρήστες και προορίζονται για το Internet, στέλνονται στο διαδίκτυο μέσω ενός proxy server.

Τα πακέτα IP που προορίζονται για τους τελικούς χρήστες και προέρχονται είτε από τοπικούς servers είτε από το Internet, συλλέγονται από τον IP to DVB Gateway, που είναι ενσωματωμένος στον πολυπλέκτη MPEG-2. Το ειδικό αυτό software αναγνωρίζει τα πακέτα που προορίζονται για τους χρήστες διαβάζοντας τη διεύθυνση προορισμού τους, τα φιλτράρει ανάλογα με τις ρυθμίσεις που έχει θέσει ο διαχειριστής του συστήματος, και τέλος τα ενσωματώνει στο DVB-compliant MPEG-2 Transport Stream χρησιμοποιώντας την τεχνική του multi-protocol encapsulation. Τα προσαρμοσμένα πακέτα προωθούνται στον πυρήνα πολυπλεξίας (multiplexing kernel) που πολυπλέκει την IP κίνηση με προγράμματα ψηφιακής τηλεόρασης, είτε ζωντανά (live) είτε αποθηκευμένα (pre-recorded) και παράγει το τελικό Transport Stream, το οποίο είναι σταθερού ρυθμού. Το τελευταίο οδηγείται στην είσοδο του διαμορφωτή OFDM, το οποίο το μετατρέπει στο προς μετάδοση RF σήμα. Τέλος, το σήμα ενισχύεται από έναν γραμμικό ενισχυτή (η γραμμικότητα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εκπομπή ενός σήματος OFDM) και εκπέμπεται σε ένα κανάλι εντός της μπάντας των UHF.

5.2 Το σύστημα του τελικού χρήστη

Στην πλευρά του τελικού χρήστη, μια τυπική κεραία UHF και ένας κοινός (γραμμικός) ενισχυτής χρησιμοποιείται για τη λήψη του ψηφιακού σήματος. Πρόκειται για

τον ίδιο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται και για την αναλογική λήψη. Εκείνο που απαιτείται είναι ένας ψηφιακός δέκτης DVB-T, ο οποίος μπορεί να παρέχεται σε μορφή PCI κάρτας και μπορεί να ενσωματωθεί σε οποιονδήποτε υπολογιστή.



Σχήμα 5.2.1 DVB-T δέκτης υπό μορφή PCI κάρτας

Η κάρτα αυτή συλλέγει το RF σήμα από την κεραία και μέσω ειδικού λογισμικού επιτρέπει εύκολη πρόσβαση σε προγράμματα τηλεόρασης και υπηρεσίες IP που έχουν ενθυλακωθεί μέσα στο MPEG-2 Transport Stream. Η κάρτα ρυθμίζεται να εξάγει μόνο τα πακέτα που φέρουν την MAC διεύθυνσή της και να επανασυναρμολογήσει τα IP datagrams, τα οποία με τη σειρά τους παραδίδονται στη στοίβα TCP/IP του υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

Όσον αφορά το uplink, ανάλογα με το δίκτυο και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση του καναλιού επιστροφής, ο χρήστης συνδέεται με την αντίστοιχη υπηρεσία δεδομένων η οποία αναλαμβάνει να μεταδώσει τις αιτήσεις και τις επιβεβαιώσεις του στον παροχέα υπηρεσιών, ο οποίος βέβαια είναι συνδεδεμένος με την ίδια υπηρεσία δεδομένων μέσω του ίδιου δικτύου.

6. Διαλείψεις

Στην περίπτωση που το αμφίδρομο δίκτυο ψηφιακής τηλεόρασης απευθύνεται σε κινητούς χρήστες, μόνο και μόνο λόγω της μετακίνησης των χρηστών δημιουργούνται νέες παράμετροι και παράγοντες που επιβαρύνουν την απόδοση του δικτύου, τους οποίους θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει. Οι κυριότεροι από αυτούς τους παράγοντες είναι οι διαλείψεις και τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης.

6.1 Εισαγωγή

Οι διαλείψεις είναι γνωστές από τη βραχυκυματική μετάδοση, όπου το επίπεδο ισχύος του λαμβανόμενου πεδίου μπορεί να ποικίλει έντονα λόγω των ατμοσφαιρικών διαταραχών.

Στην αναλογική τηλεόραση, ο όρος "διάλειψη" είναι ουσιαστικά άγνωστος, περισσότερο γίνεται λόγος για "σκιές κεραιών" ή "εικόνες ειδώλων". Οι διαλείψεις είναι δευτερεύουσας σημασίας δεδομένου ότι μπορούν να αντιμετωπιστούν σχεδόν εξολοκλήρου μέσω της κατευθυντικότητας και του ακριβούς προσανατολισμού της κεραίας Yagi για τη σταθερή λήψη τηλεοπτικού σήματος στο σπίτι. Παρόλα αυτά, τα διάφορα φαινόμενα διαλείψεων μπορούν να παρατηρηθούν στην αναλογική καλωδιακή τηλεόραση, παραδείγματος χάριν σε μια ομάδα διαμερισμάτων που συνδέεται με το καλωδιακό δίκτυο με μια ή περισσότερες υποδοχές κεραιών σε κάθε διαμέρισμα. Εάν οι υποδοχές δεν τερματιστούν ανάλογα, προκύπτουν ανακλάσεις με σταθερό επίπεδο ισχύος και φάση που μπορεί να προκαλέσουν εξασθένηση αρκετών dB σε ακριβώς υπολογίσιμα σημεία στο καλώδιο.

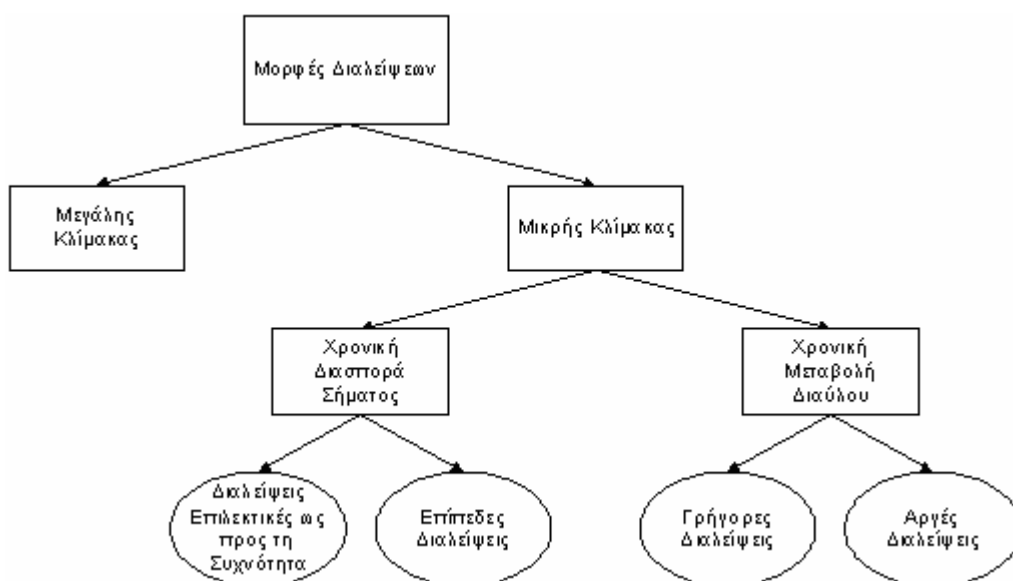
Εκτός από την αναλογική τηλεόραση και η λήψη δορυφορικού τηλεοπτικού σήματος μπορεί να εξασθενήσει από διαλείψεις. Γνωστά φαινόμενα είναι το τρεμόπαιγμα (flickering) της λαμβανόμενης εικόνας που προκαλείται από τα αεροπλάνα ή μια πτώση στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος που προκαλείται από μία επερχόμενη καταιγίδα.

Όλες οι παραπάνω καταστάσεις λήψης έχουν το εξής κοινό: ο δέκτης είναι σταθερός και υπάρχει πάντα άμεση γραμμή οπτικής επαφής με τον πομπό του τηλεοπτικού σήματος (line of sight – LOS).

Εξετάζοντας τις διαλείψεις από τη μεριά του DVB, οι επιρροές στην καλωδιακή (DVB-C) και τη δορυφορική (DVB-S) λήψη είναι παρόμοιες με αυτές στην αναλογική λήψη μιας και η μετάδοση χαρακτηρίζεται από σταθερό δέκτη. Το DVB-T όμως, καλύπτει τη μετάδοση τόσο για σταθερό όσο και για φορητό και κινητό δέκτη, πράγμα που οξύνει την επιρροή των διαλείψεων.

6.2 Προκαταρκτικές έννοιες

Σε ένα σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, τα σήματα μπορεί να ταξιδέψουν μέσω πολλαπλών διαδρομών μεταξύ πομπού και δέκτη. Αυτό το φαινόμενο που καλείται πολυδιαδρομική διάδοση, έχει ως αποτέλεσμα ο δέκτης του σήματος να παρατηρεί αλλαγές στο πλάτος, τη φάση και τη γωνία άφιξης του εκπεμπόμενου σήματος. Αυτές οι αλλαγές που συνιστούν το φαινόμενο γνωστό ως πολυδιαδρομικές διαλείψεις, χαρακτηρίζονται από δύο κύριες μορφές: μεγάλης κλίμακας και μικρής κλίμακας διαλείψεις. Επιπλέον αυτές οι μορφές προκαλούν συγκεκριμένους τύπους εξασθένησης του σήματος. Το Σχήμα 6.2.1 παρουσιάζει τους τύπους διαλείψεων και τις σχετικές εξασθενήσεις τους.



Σχήμα 6.2.1 Μορφές διαλείψεων και εξασθένηση διαύλου

Η πρώτη μορφή διαλείψεων, *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας*, αναφέρεται στην απώλεια διαδρομής που προκαλείται όταν το σήμα ταξιδεύει πάνω από μεγάλες περιοχές. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας χαρακτηρίζουν τις απώλειες λόγω των αρκετά μεγάλων φυσικών αντικειμένων στην πορεία του σήματος όπως είναι οι λόφοι ή τα δάση. Η απώλεια διαδρομής χαρακτηρίζεται από μια μέση απώλεια (λόγω της απόστασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη και των χαρακτηριστικών περιβάλλοντος διάδοσης) και μια διακύμανση γύρω από τη μέση απώλεια.

Από την άλλη, οι *διαλείψεις μικρής κλίμακας*, χαρακτηρίζουν τα αποτελέσματα των μικρών αλλαγών στο διάστημα μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να προκληθούν από την κινητικότητα του πομπού, του δέκτη ή των ενδιάμεσων αντικειμένων στην πορεία του σήματος. Οι μικρής κλίμακας αλλαγές οδηγούν σε ιδιαίτερες διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης των σημάτων. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας είναι επίσης γνωστές ως *διαλείψεις Rayleigh*, δεδομένου ότι η διακύμανση της περιβάλλουσας του σήματος είναι κατανομημένη κατά Rayleigh όταν δεν υπάρχει κύρια διαδρομή μεταξύ του πομπού και του δέκτη (γραμμή οπτικής επαφής, non line of sight – NLOS). Όταν υπάρχει κύρια διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη, δηλαδή γραμμή οπτικής επαφής ή ισχυρή συνιστώσα κατοπτρικής ανάκλασης από συγκεκριμένη γωνία, οι διακυμάνσεις περιγράφονται στατιστικά από την κατανομή Rice, οπότε και το φαινόμενο αναφέρεται ως διαλείψεις Rice.

Το Σχήμα 6.2.1 παρουσιάζει δύο μορφές διαλείψεων μικρής κλίμακας. Η πρώτη, *διασπορά σήματος*, αναφέρεται στη χρονική διασπορά του σήματος. Η διασπορά έχει ως αποτέλεσμα οι ψηφιακοί παλμοί που εκπέμπονται στο σήμα να διαπλατυνθούν στο πεδίο του χρόνου. Η δεύτερη μορφή, *μεταβολή διαύλου*, απεικονίζει τη χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά του καναλιού που οφείλεται στη σχετική κινητικότητα μεταξύ του πομπού και του δέκτη ή των αντικειμένων στην πορεία του σήματος. Και οι δύο μορφές μπορούν να χαρακτηριστούν στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας από τους τύπους εξασθένησης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.1, οι τύποι εξασθένησης των μορφών διασποράς είναι οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις (frequency selective fading) και οι επίπεδες - ως προς τη συχνότητα - διαλείψεις (flat fading). Από την άποψη του πεδίου του χρόνου, οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις εμφανίζονται όταν το μέγιστο της διασποράς

ενός συμβόλου είναι μεγαλύτερο από τη διάρκεια του συμβόλου. Συνεπώς, ένα άλλο όνομα για αυτήν την εξασθένηση είναι "διασυμβολική παρεμβολή" (intersymbol interference). Από την άποψη του πεδίου της συχνότητας, οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις εμφανίζονται όταν οι φασματικές συνιστώσες ενός σήματος επηρεάζονται κατά διαφορετικό τρόπο από το δίαυλο. Ειδικότερα, οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις εμφανίζονται όταν το συνεκτικό εύρος ζώνης του καναλιού (το εύρος ζώνης του καναλιού στο οποίο όλες οι συνιστώσες υπόκεινται στο ίδιο επίπεδο εξασθένησης) είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του σήματος. Όταν δεν πληρούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις για τις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις, οι διαλείψεις αναφέρονται ως επίπεδες. Σε αυτήν την περίπτωση τα χαρακτηριστικά του διαύλου είναι περίπου ίδια για όλες τις συχνότητες.

Το Σχήμα 6.2.1 παρουσιάζει επίσης, τύπους υποβάθμισης των μορφών χρονικής μεταβολής του καναλιού. Αυτοί είναι οι γρήγορες διαλείψεις (fast fading) και οι αργές διαλείψεις (slow fading). Από την άποψη του πεδίου του χρόνου, οι γρήγορες διαλείψεις αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία ο χρόνος συνοχής του καναλιού (μια αναμενόμενη χρονική διάρκεια κατά την οποία η απόκριση του καναλιού είναι αμετάβλητη) είναι μικρότερος από τη διάρκεια συμβόλων.

Πρίν την περιγραφή των γρήγορων διαλείψεων στο πεδίο της συχνότητας είναι απαραίτητο να εισαχθεί η έννοια της συχνότητας Doppler. Η συχνότητα (f_m) Doppler χαρακτηρίζει τη μέγιστη ολίσθηση συχνότητας Doppler των σημάτων σε ένα κινητό περιβάλλον. Αυτό υπολογίζεται ως εξής: $f_m = v / \lambda$. Όπου 'v' είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη και 'λ' είναι το μήκος κύματος του διαδιδόμενου σήματος. Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατόν να δειχθεί ότι στο πεδίο της συχνότητας, οι γρήγορες διαλείψεις εμφανίζονται όταν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρότερο από τη μέγιστη ολίσθηση Doppler.

6.3 Βασικά στοιχεία των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων

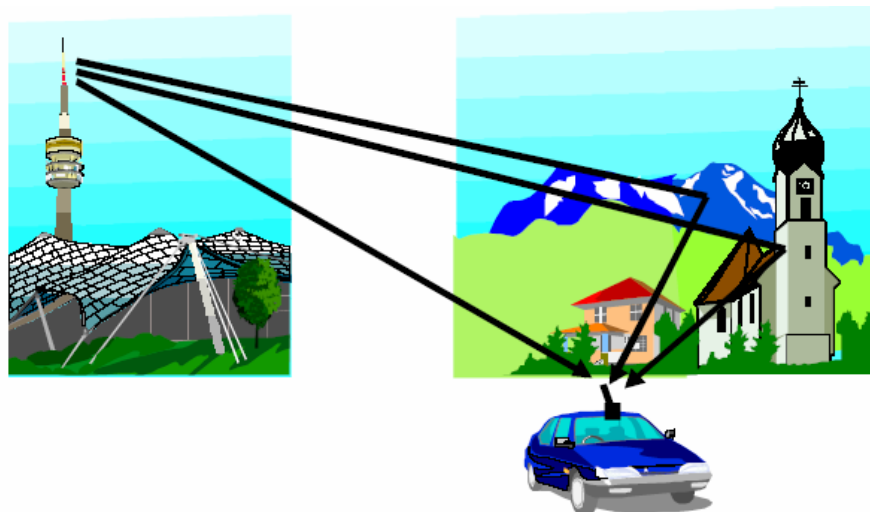
Έχοντας παρουσιάσει κάποιες προκαταρκτικές έννοιες για τις διαλείψεις, μπορούμε να περάσουμε σε μια περαιτέρω ανάλυση των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων που είναι ο κύριος λόγος εξασθένησης του σήματος του DVB-T στην περίπτωση κινητού δέκτη.

6.3.1 Σταθερή Φάση

Το πρώτο βασικό στοιχείο των διαλείψεων είναι η ανάκλαση. Οι ανακλάσεις και οι αντηχήσεις δημιουργούνται από όλα τα εμπόδια στην πορεία διάδοσης των κυμάτων. Οι αντηχήσεις περιγράφονται από το ποσοστό ανάκλασης και τη μετατόπιση φάσης, τα οποία εξαρτώνται από το υλικό του εμποδίου πάνω στο οποίο ανακλάται το σήμα.

Για παράδειγμα:

Η ανάκλαση ενός κύματος σε μια μεταλλική επιφάνεια ενός αεροπλάνου δεν θα έχει ως αποτέλεσμα απώλεια ισχύος αλλά τη μετατόπιση της φάσης του κατά 180° . Αντίθετα, η ανάκλαση στον τοίχο ενός κτιρίου, θα έχει ως αποτέλεσμα μια μεγάλη απώλεια ισχύος του σήματος και μια απροσδιόριστη μετατόπιση της φάσης του.



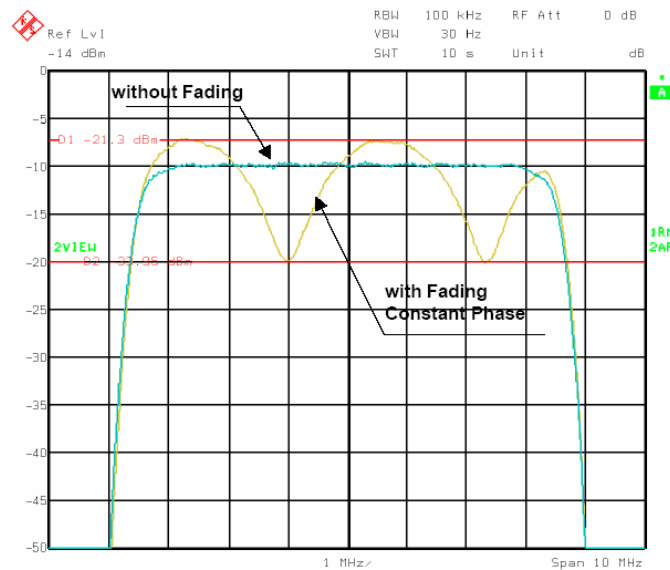
Σχήμα 6.3.1.1 Ανακλάσεις

Οι καθοριστικές παράμετροι είναι:

- απώλεια διαδρομής (dB),
- καθυστέρηση σε σχέση με την άμεση οδό (ns),
- φάση (deg).

Αυτός ο τύπος διαλείψεων αναφέρεται ως "διαλείψεις σταθερής φάσης". Εξετάζοντας ένα φέρον του σήματος COFDM, τα αποτελέσματα στο λαμβανόμενο σήμα μπορούν να φανούν μόνο από το πλάτος που προκύπτει. Η εξέταση του πλήρους φάσματος ενός σήματος DVB,

εντούτοις, αποκαλύπτει κοιλάδες στο φάσμα ανάλογα με τον αριθμό των διαδρομών με απώλεια, την καθυστέρηση και τη φάση.



Σχήμα 6.3.1.2 Σταθερή Φάση

Η μπλε γραμμή στο Σχήμα 6.3.1.2 παρουσιάζει το αρχικό φάσμα χωρίς εξασθένηση, ενώ η κίτρινη γραμμή αντιπροσωπεύει το φάσμα για διαλείψεις με σταθερή φάση που προκαλούνται από μια δεύτερη διαδρομή.

Οι κοιλάδες στο φάσμα εμφανίζονται κατά διαστήματα $\Delta\varphi$, τα οποία αντιστοιχούν αμοιβαία στην καθυστέρηση της διαδρομής ($\Delta\varphi = 1/\text{καθυστέρηση}$).

Το βάθος L σε dB των κοιλάδων λαμβάνεται ως εξής:

$$(1) : L = 20 \cdot \left[\log \left(10^{\frac{|L1-L2|}{20}} - 1 \right) - \log \left(10^{\frac{|L1-L2|}{20}} + 1 \right) \right] dB$$

όπου :

L = βάθος των κοιλιών

$L1$ = απώλεια διαδρομής 1

$L2$ = απώλεια διαδρομής 2

$L1 \neq L2$. Εάν $L1 = L2$, τότε το βάθος $L = \infty$

Με περισσότερες από 2 διαδρομές, ο υπολογισμός του βάθους είναι πολύ σύνθετος.

Η φάση ανάκλασης καθορίζει πού εμφανίζονται εξασθενήσεις στο φάσμα.

Ένας προσαρμοζόμενος ισοσταθμιστής (equalizer - επίσης αποκαλούμενος ως εκτιμητής διαύλου) στο δέκτη αντισταθμίζει τις φασματικές κοιλάδες μέσα στη δυναμική περιοχή του για να εξασφαλίσει ανεπηρέαστη αποδιαμόρφωση ακόμη και για πολυδιαδρομική λήψη.

Η φάση του φέροντος καθορίζει περαιτέρω την περιστροφή του αποδιαμορφωμένου σχήματος διαμόρφωσης (constellation).

6.3.2 Pure Doppler

Το δεύτερο βασικό στοιχείο είναι το φαινόμενο Doppler, δηλ. η ολίσθηση της συχνότητας ως αποτέλεσμα της μετακίνησης του δέκτη σε σχέση με τον πομπό του σήματος DVB-T.

Η ολίσθηση συχνότητας Δf_D που προκαλείται από το φαινόμενο Doppler λαμβάνεται με τη βοήθεια του ακόλουθου τύπου:

$$(2) : \Delta f_{Doppler} = v \cdot \frac{f}{c} \cdot \cos(\phi)$$

όπου

v = η ταχύτητα του κινούμενου δέκτη

f = η συχνότητα του φέροντος του πομπού

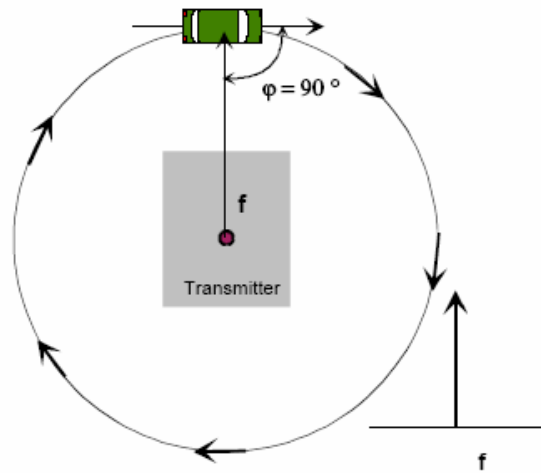
c = η ταχύτητα του φωτός (300.000 km/s)

ϕ = η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του κινούμενου δέκτη και της ευθείας που συνδέει δέκτη και πομπό $0 < \phi < \pi$.

Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις:

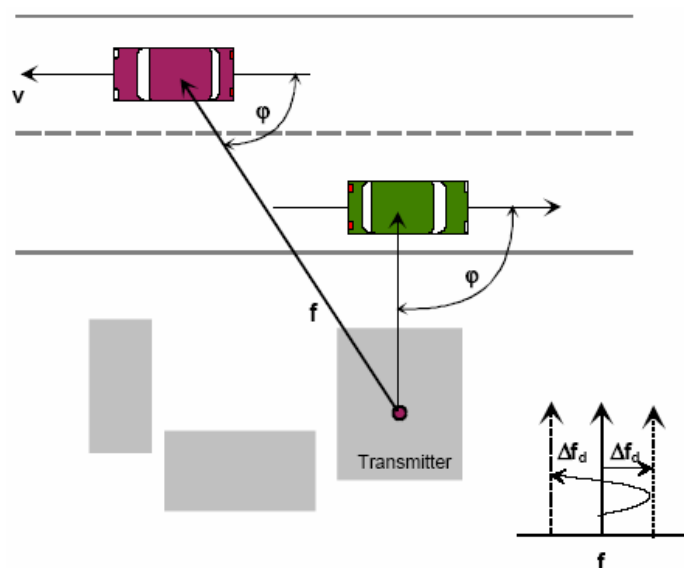
1. Ο δέκτης κινείται προς τον πομπό: $\phi = 0^\circ$, δηλ. $\cos\phi = 1$: η συχνότητα διάδοσης αυξάνεται κατά Δf_D .

2. Ο δέκτης απομακρύνεται από τον πομπό: $\varphi = 180^\circ$, δηλ. $\cos\varphi = -1$: η συχνότητα διάδοσης ελαττώνεται κατά Δf_D .
3. Ο δέκτης κινείται κυκλικά περί του πομπού: $\varphi = 90^\circ$, δηλ. $\cos\varphi = 0$: η συχνότητα διάδοσης παραμένει αμετάβλητη, δηλ. $\Delta f_D = 0$.



Σχήμα 6.3.2.1 Περίπτωση με σταθερή γωνία $\varphi = 90^\circ$

Εάν ο δέκτης κατευθύνεται προς τον πομπό από μια μεγάλη απόσταση, τον προσπεράσει και στη συνέχεια απομακρυνθεί από αυτόν, τότε η συχνότητα του φέροντος ολισθαίνει κατά Doppler και λαμβάνει τελική τιμή στο διάστημα: $f - \Delta f_D \leq f \leq f + \Delta f_D$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.2.2. Η ολίσθηση από f σε $f + \Delta f_D$ πραγματοποιείται όταν ο δέκτης κατευθύνεται προς τον πομπό.



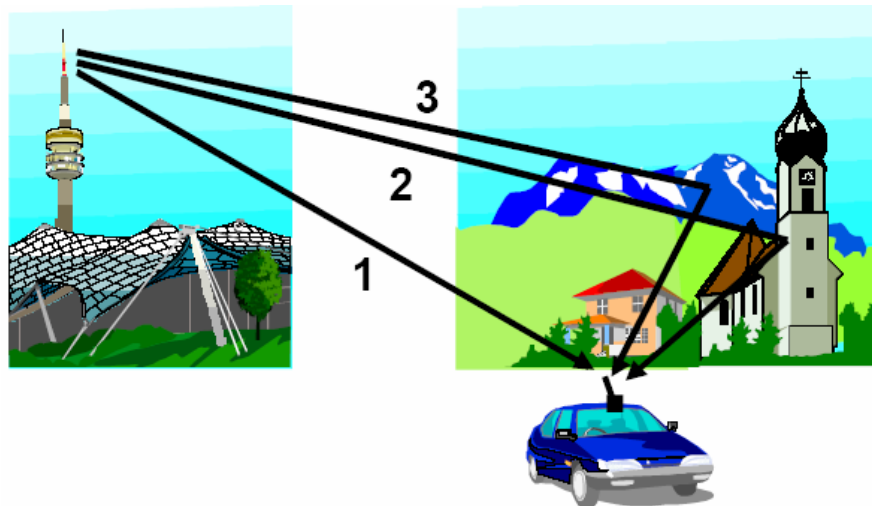
Σχήμα 6.3.2.2 Φαινόμενο Doppler

Από τη σχέση (2), μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα:

Η ολίσθηση Doppler $\Delta f_{\text{Doppler}}$ είναι ευθέως ανάλογη προς τη συχνότητα φέροντος f του πομπού. Όσο χαμηλότερη είναι λοιπόν, η συχνότητα f , τόσο μικρότερο θα είναι και το φαινόμενο Doppler στο DVB-T, αφού το offset του φέροντος OFDM παραμένει σταθερό.

6.3.3 Διαλείψεις Rice

Το τρίτο βασικό στοιχείο είναι οι διαλείψεις Rice. Οι διαλείψεις Rice προκαλούνται από αντηχήσεις ολισθημένες κατά Doppler που ακολουθούν κατανομή Gauss, αλλά επιπλέον υπάρχει πάντα μια άμεση διαδρομή του σήματος από τον πομπό Tx στο δέκτη Rx.

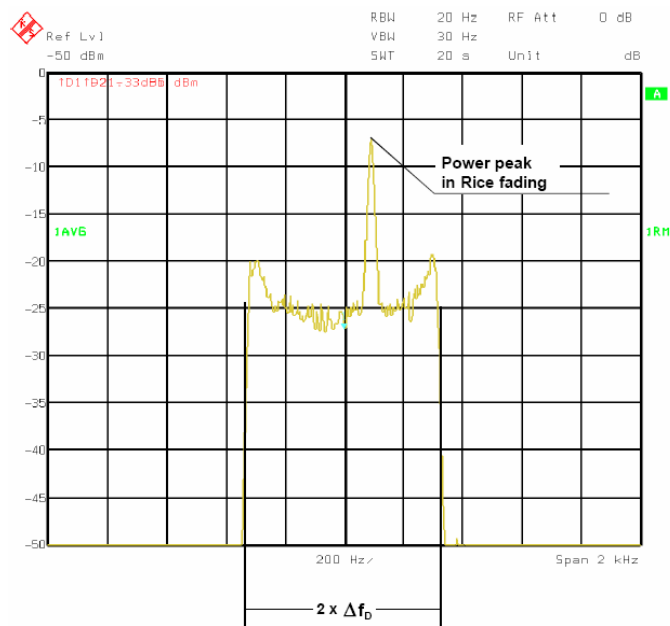


Σχήμα 6.3.3.1 Διαλείψεις Rice

Η άμεση διαδρομή 1 μεταξύ πομπού-δέκτη ωθεί σημαντικά το επίπεδο ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Αυτή η διαδρομή μπορεί στην περίπτωση κινητού δέκτη να επηρεαστεί μόνο από το φαινόμενο Doppler. Εκτός από την άμεση διαδρομή, λαμβάνονται και πολλές αντηχήσεις. Εφόσον οι αντηχήσεις φθάνουν από διαφορετικές κατευθύνσεις, η γωνία φ για τον υπολογισμό της ολίσθησης Doppler δεν είναι σταθερή για κινητό δέκτη. Επομένως, το φάσμα των διαλείψεων Rice λαμβάνεται ως εξής:

Η γωνία με τη χαμηλότερη πιθανότητα είναι $\varphi = 90^\circ$, για το λόγο ότι ο δέκτης πολύ σπάνια εκτελεί κυκλική κίνηση γύρω από τον πομπό. Συνεπώς, το χαμηλότερο επίπεδο βρίσκεται στη συχνότητα f .

Τα υψηλά επίπεδα λαμβάνονται στις συχνότητες $f \pm \Delta f$ δεδομένου ότι είναι πιο πιθανό ο δέκτης να κινείται με κατεύθυνση προς ($\varphi = 0^\circ$) ή από ($\varphi = 180^\circ$) τον πομπό για μεγάλες χρονικές περιόδους. Μεταξύ αυτών των δύο γωνιών, η κατανομή του επιπέδου ισχύος έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Προκύπτει από τις ολισθημένες κατά Doppler αντηχήσεις που παράγονται από την τυχαία ανάκλαση στα περιβάλλοντα κτίρια, βουνά και άλλα φυσικά και τεχνητά εμπόδια. Η καμπύλη του επιπέδου ισχύος αντιπροσωπεύει το άθροισμα όλων αυτών των αντηχήσεων.



Σχήμα 6.3.3.2 Φάσμα Rice

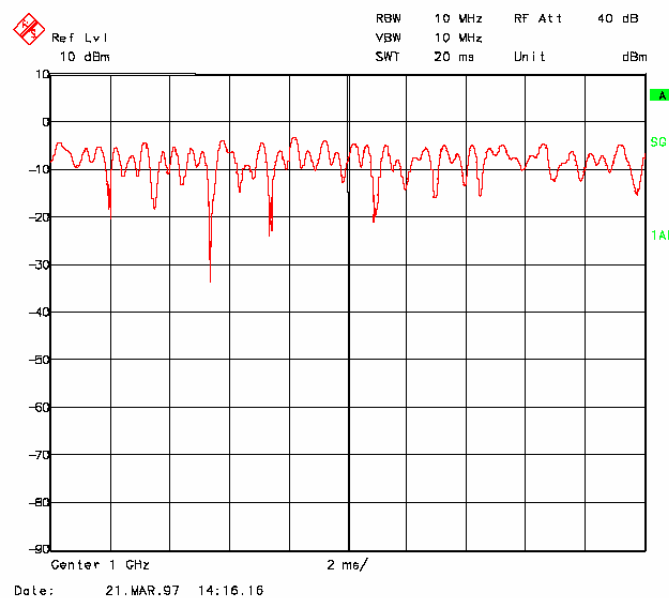
Το ίδιο φάσμα λαμβάνεται εάν το όχημα κινείται γύρω από τον πομπό και αλλάζει την κατεύθυνσή του τυχαία. Το φασματικό εύρος ζώνης προκύπτει από τη μέγιστη ολίσθηση Doppler των αντηχήσεων, ενώ η αιχμή ισχύος (power peak) από τη μετατόπιση Doppler στην άμεση διαδρομή. Η μέγιστη ολίσθηση Doppler των αντηχήσεων και η ολίσθηση της αιχμής Rice δεν συσχετίζονται η μια με την άλλη, δεδομένου ότι οι γωνίες φ των διαδρομών λήψης μετά βίας συμπίπτουν.

Ανάλογα με την κατεύθυνση του κινούμενου δέκτη σε σχέση με τον πομπό, η αιχμή του επιπέδου ισχύος ολισθαίνει προς τις υψηλότερες ή χαμηλότερες συχνότητες ως αποτέλεσμα του φαινομένου Doppler.

Οι σχετικές για τις διαλείψεις Rice παράμετροι είναι:

- Οι παράμετροι του φαινομένου Doppler
- Οι παράμετροι των αντηγήσεων, απώλεια διαδρομής και καθυστέρηση
- Πρόσθετες παράμετροι για την κύρια συνιστώσα:
 - Ο λόγος ισχύος (dB), που καθορίζει το ύψος της αιχμής ισχύος
 - Ο λόγος συχνότητας, που καθορίζει τη σχετική ως προς τη Δf_D ολίσθηση

Η λαμβανόμενη ισχύς ως συνάρτηση του χρόνου παρουσιάζει εμβυθίσεις που προκύπτουν από την υπέρθεση όλων των αντηγήσεων με διαφορετικά επίπεδα ισχύος και φάσεις αλλά και της ισχυρής συνιστώσας.



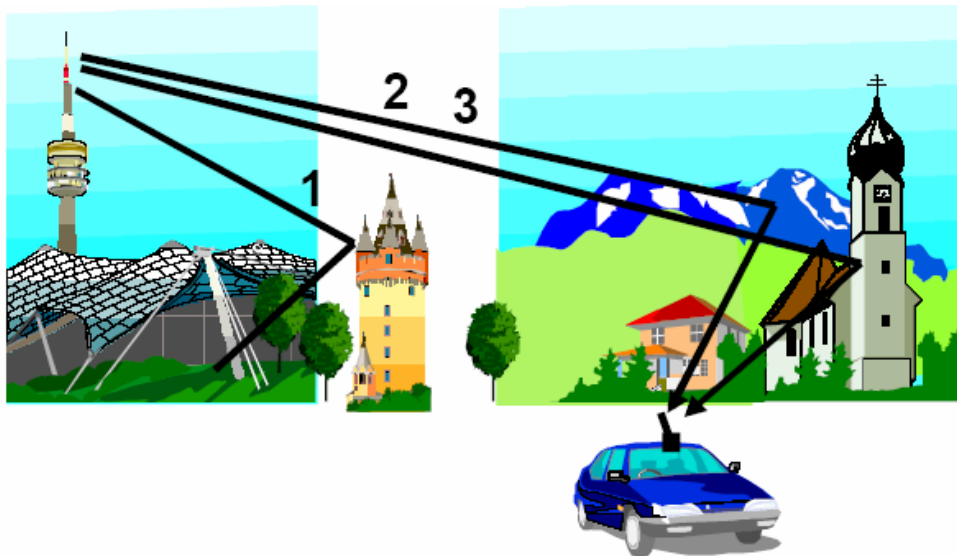
Σχήμα 6.3.3.3 Διαλείψεις Rice, Ισχύς συναρτήσει χρόνου

Οι εμβυθίσεις έχουν ένα μέγιστο βάθος 25dB, το οποίο δεν είναι πολύ μεγάλο, επειδή η ισχυρή συνιστώσα πάντα συμβάλλει σημαντικά στη λαμβανόμενη ισχύ.

6.3.4 Διαλείψεις Rayleigh

Το τέταρτο βασικό στοιχείο είναι οι διαλείψεις Rayleigh. Οι διαλείψεις Rayleigh, όπως και οι διαλείψεις Rice, προκαλούνται από αντηγήσεις ολισθημένες κατά Doppler με

μια γκαουσιανή κατανομή, μόνο που σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή πομπού και δέκτη (non line of sight – NLOS).

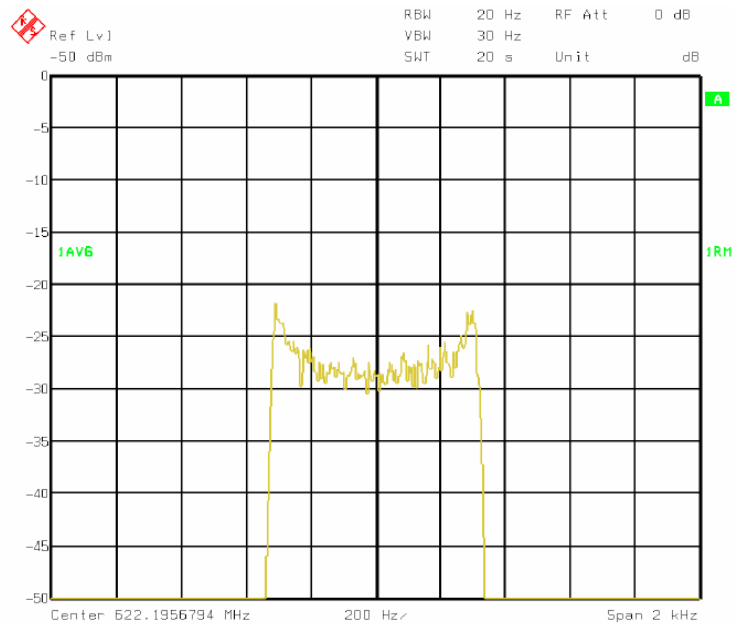


Σχήμα 6.3.4.1 Rayleigh fading

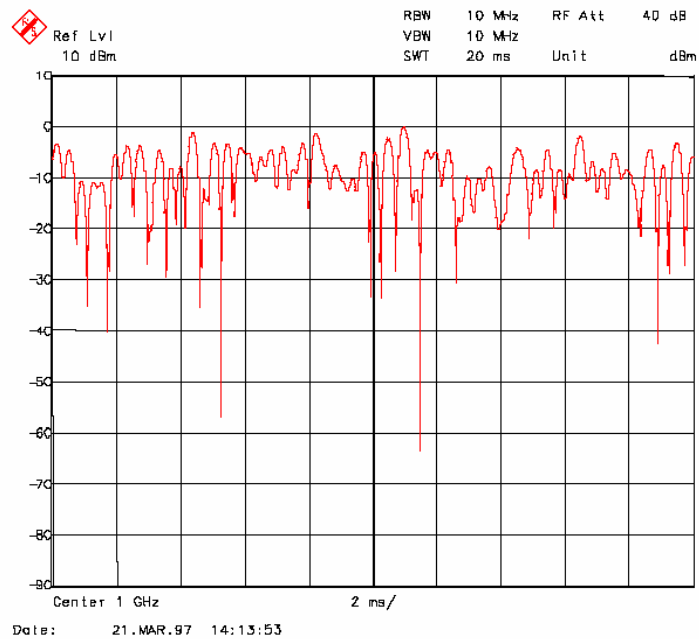
Οι σχετικές παράμετροι για τις διαλείψεις Rayleigh είναι:

- Παράμετροι του φαινομένου Doppler δηλαδή:
 - v = η ταχύτητα του κινητού
 - f = η συχνότητα φέροντος του πομπού
 - φ = η γωνία μεταξύ της δευτερεύουσας διαδρομής του σήματος και της κύριας, $0 < \varphi < \pi$.
- Παράμετροι αντηχίσεων:
 - απώλειες διαδρομής
 - καθυστέρηση

Η λαμβανόμενη ισχύς σε συνάρτηση με το χρόνο παρουσιάζει βυθίσματα που προκαλούνται σε αυτήν την περίπτωση μόνο από την υπέρθεση όλων των αντηχίσεων με διαφορετικά πλάτη και φάσεις στην κεραία λήψης.



Σχήμα 6.3.4.2 Φάσμα Rayleigh



Σχήμα 6.3.4.3 Διαλείψεις Rayleigh σε συνάρτηση με το χρόνο

Τα βυθίσματα έχουν ένα βάθος 60dB και παραπάνω επειδή η ισχυρή συνιστώσα προερχόμενη από την άμεση οπτική επαφή δέκτη-πομπού (που υπάρχει στις διαλείψεις Rice) εδώ λείπει.

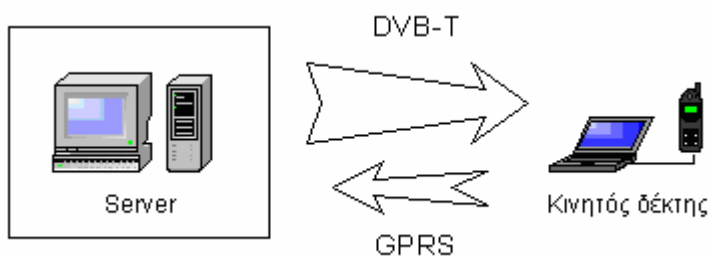
Μέρος Β

7. Το ασύμμετρο δίκτυο της διπλωματικής εργασίας

7.1 Γενικά

Παρόλο που κατά καιρούς έχουν διεκπεραιωθεί κάποια project (VALIDATE, MOTIVATE) για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του καναλιού DVB-T σε σταθερούς και κινητούς χρήστες, γεγονός αποτελεί ότι δεν έχει γίνει κάποια αξιολογή αποτίμηση της συμπεριφοράς του δικτύου από τη μεριά των υπηρεσιών TCP / IP και ιδιαίτερα όταν το σήμα μεταδίδεται σε περιβάλλον επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων που δημιουργείται στην περίπτωση κινητού ως προς τον πομπό δέκτη. Αυτό ακριβώς το πεδίο έρχεται να καλύψει η παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώνοντας ένα ασύμμετρο δίκτυο κατά τα πρότυπα που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Το σύστημα που θα υλοποιήσουμε, είναι ένα ασύμμετρο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με ένα κύριο κανάλι εκπομπής δεδομένων DVB-T και ένα δευτερεύον κανάλι επιστροφής GPRS. Και τα δύο κανάλια είναι μονόδρομα, ο συνδυασμός τους όμως, με το πρώτο να χρησιμοποιείται ως downlink και το δεύτερο ως uplink, καθιστά την επικοινωνία μεταξύ server και client αμφίδρομη.



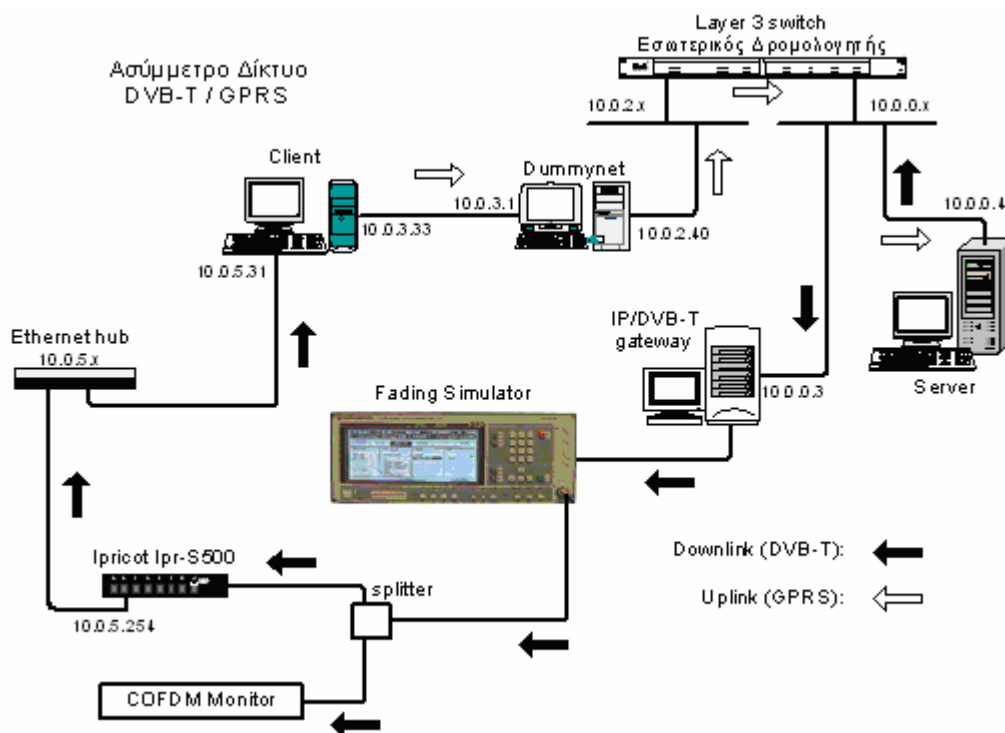
Σχήμα 7.1.1 Το ασύμμετρο δίκτυο DVB-T / GPRS που θα προσομοιωθεί

Το περιβάλλον των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων στο κανάλι DVB-T λόγω του κινητού δέκτη εξομοιώνεται από ένα ειδικό μηχάνημα το οποίο προσφέρει ποικιλία ρυθμίσεων και επιλογών για τη μοντελοποίηση του περιβάλλοντος αυτού. Επίσης, το κανάλι επιστροφής GPRS προσομοιώνεται από ένα τοπικό ενσύρματο δίκτυο του οποίου η καθυστέρηση έχει επιλεγεί έτσι ώστε να αντιστοιχεί με αυτή για το πρότυπο GPRS. Η

επιλογή αυτή έγινε με σκοπό την ανεξαρτητοποίηση από τους περιορισμούς του GPRS για τις μετρήσεις καθώς και την αποφυγή του υψηλού κόστους.

7.2 Τοπολογία του δικτύου

Η πλήρης τοπολογία του δικτύου που θα χρησιμοποιήσουμε, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

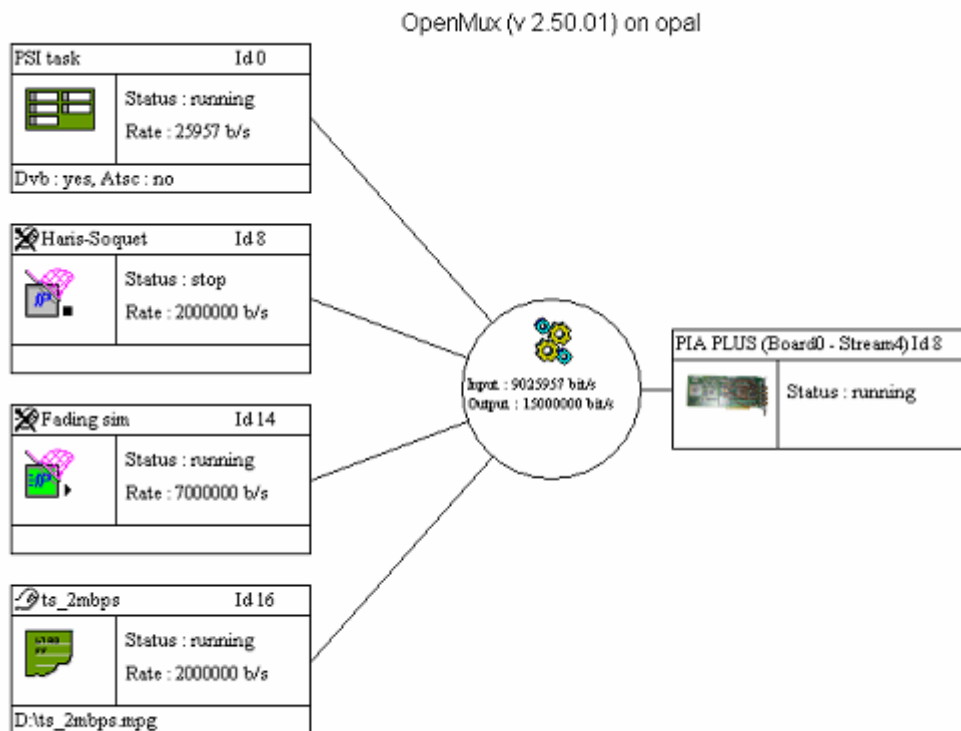


Σχήμα 7.2.1 Προσομοίωση του ασύμμετρου δικτύου DVB-T / GPRS

Η επικοινωνία καθίσταται μεταξύ Server και Client και όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι αμφίδρομη.

Ο server είναι ο εξυπηρετητής υπηρεσιών TCP / IP ο οποίος ύστερα από request του πελάτη (Client) αποστέλλει προς αυτόν δεδομένα σε μορφή πακέτων IP. Τα πακέτα αυτά περνούν μέσω του τοπικού δικτύου 10.0.0.x και του εσωτερικού δρομολογητή και

δρομολογούνται προς τον **IP to DVB Gateway** που είναι ενσωματωμένος με τον πολυπλέκτη MPEG-2.



Σχήμα 7.2.2 Η πολυπλεξία των δεδομένων IP και MPEG-2 και η δημιουργία του Transport Stream

Το τελικό Transport Stream που παράγει ο πολυπλέκτης, οδηγείται στον **Fading Simulator** ο οποίος αναλαμβάνει να εξομοιώσει το περιβάλλον των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων και αφού επεξεργαστεί και διαμορφώσει το σήμα βασικής ζώνης σύμφωνα με τις προδιαγραφές DVB-T στη συχνότητα των 602MHz (κανάλι 37 των UHF), το παραμορφώνει σύμφωνα με τις παραμέτρους εξασθένησης και τέλος το κατευθύνει προς τον δέκτη σήματος DVB-T **Ipricot Ipr-S500**. Ο δέκτης αφού αποδιαμορφώσει και αποκωδικοποιήσει το σήμα, στη συνέχεια το στέλνει στον πελάτη (**client**) με τον οποίο συνδέεται μέσω του τοπικού δικτύου 10.0.5.x.

Η αμφίδρομη επικοινωνία ολοκληρώνεται με τον πελάτη να στέλνει και αυτός πακέτα IP τα οποία φθάνουν στον εξυπηρετητή μέσω του εσωτερικού δρομολογητή που φαίνεται στο σχήμα, αφού πρώτα υποστούν μια καθυστέρηση μέσω του εργαλείου **Dumynet**.

7.3 Τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου

7.3.1 Server

Από μεριάς υλικού είναι ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής εφοδιασμένος με δύο επεξεργαστές Pentium II 233MHz, μνήμη 128MB RAM, τρεις σκληρούς δίσκους Ultra Wide SCSI χωρητικότητας 8GB ο καθένας και δύο κάρτες δικτύου 10/100. Από μεριάς λογισμικού, έχει εγκατεστημένο το λειτουργικό σύστημα Debian Linux v. 3.0r1 Woody με πυρήνα 2.4.18.

7.3.2 IP/DVB-T Gateway

Το λογισμικό IP to DVB Gateway είναι εγκατεστημένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή με λειτουργικό περιβάλλον Microsoft Windows NT 4.00.1381 ο οποίος από μεριάς υλικού είναι εφοδιασμένος με έναν επεξεργαστή Pentium III 933MHz, μνήμη 128MB RAM και δύο κάρτες δικτύου 10/100 η μία εκ των οποίων χρησιμοποιείται για data και η άλλη για management.



Σχήμα 7.3.2.1 Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που φιλοξενεί το λογισμικό πολυπλεξίας

7.3.3 Fading Simulator

Τον Fading Simulator της συνδεσμολογίας αποτελεί το μοντέλο TV Test Transmitter SFQ B10 της εταιρείας ROHDE & SCHWARZ το οποίο έχει τη δυνατότητα

εξομοίωσης περιβάλλοντος διαλείψεων με πολλές διαθέσιμες παραμέτρους για ρύθμιση ώστε να επιτευχθεί το ακριβώς απαιτούμενο περιβάλλον.



Σχήμα 7.3.3.1 Ο SFQ της ROHDE & SCHWARZ

Εκτός από Fading Simulation, ο Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz εκτελεί στην συνδεσμολογία μας και χρέη διαμορφωτή.

7.3.4 Ipricot IPR-S500

Ο Ipricot IPR-S500 είναι ένας δέκτης σήματος DVB-T. Το σήμα αυτό αφού το αποδιαμορφώσει, το αποκωδικοποιεί και στη συνέχεια το δρομολογεί στον client μέσω τοπικού δικτύου.



Σχήμα 7.3.4.1 Ipricot IPR-S500

7.3.5 Client

Τον πελάτη αποτελεί ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής με εγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP Professional με Service Pack 1 ο οποίος είναι εφοδιασμένος με επεξεργαστή AMD Athlon XP 2400+ 2.00GHz, μνήμη 512MB RAM και δύο κάρτες δικτύου 10/100.

7.3.6. Dummynet

Το dummynet είναι ένα ευπροσάρμοστο εργαλείο σχεδιασμένο για τη μελέτη της απόδοσης πρωτόκολλων δικτύου, το οποίο όμως τελικώς, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του εύρους ζώνης καναλιών. Αυτός είναι ο σκοπός για τον οποίο το χρησιμοποιούμε κι εμείς στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Εξομοιώνει σειρές αναμονής και περιορισμούς του εύρους ζώνης, καθυστερήσεις, απώλειες πακέτων, και πολυδιαδρομικά φαινόμενα. Εφαρμόζει επίσης μια παραλλαγή του Weighted Fair Queueing (WF2Q+). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τερματικούς σταθμούς χρήστη, ή σε μηχανήματα με FreeBSD που ενεργούν ως δρομολογητές ή γέφυρες.

Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε την standalone version του dummynet (η οποία προσφέρει περιβάλλον FreeBSD v. 3.4 stable /i386 Rev. 0.7 από το FDD χωρίς να χρειάζεται να εγκατασταθεί ολόκληρο το λειτουργικό σύστημα), σε έναν υπολογιστή ο οποίος ως προς το υλικό είναι εφοδιασμένος με έναν επεξεργαστή Pentium 120MHz, μνήμη 32MB RAM και δύο κάρτες δικτύου 10/100.

7.3.7 Ethernet hub / Layer 3 switch

Να προσθέσουμε ότι το Ethernet hub και ο εσωτερικός δρομολογητής (Layer 3 switch) υποστηρίζουν ταχύτητες δικτύου 100Mbps που δεν περιορίζουν το throughput του συστήματος.

8. Τελικές ρυθμίσεις του συστήματος

8.1 Downlink

8.1.1 Δημιουργία διαύλου με διαλείψεις

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στο σύστημα στο οποίο θα πάρουμε μετρήσεις, ο δέκτης (client) είναι σταθερός και το περιβάλλον με τις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις που θα επιβαρύνουν το σήμα, θα εξομοιωθεί από τον Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz. Έμμεσα δηλαδή, θα εξομοιωθεί η κίνηση του δέκτη.

Θεωρούμε λοιπόν, στο σύστημά μας κινητό δέκτη ο οποίος περιφέρεται σε κατοικημένη περιοχή με συγκεκριμένη σταθερή ταχύτητα. Μεταξύ του δέκτη και του πομπού δεν υπάρχει οπτική επαφή ή κάποια ισχυρή συνιστώσα του σήματος. Το σήμα δηλαδή, φθάνει στο δέκτη μέσω πολυδιαδρομικής διάδοσης κατά την οποία διάφορες συνιστώσες Rayleigh του σήματος ανακλώνται σε υποτιθέμενα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια και αφού υποστούν διαφορετική εξασθένηση ισχύος και χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους, υπερτίθενται και συμβάλλουν θετικά ή καταστροφικά στην τελική συνισταμένη που καταλήγει στην κεραία του δέκτη. Το αποτέλεσμα δηλαδή, είναι το σήμα να υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh.

Το παραπάνω περιβάλλον, εξομοιώνεται ικανοποιητικά από το μοντέλο Regular TU50 – Typical Urban 50 km/h (αναφερόμενο και ως TU6 – Typical Urban με 6 συνιστώσες Rayleigh). Το προφίλ αυτό, δημιουργήθηκε από την ομάδα εργασίας COST 207 για να προσομοιώσει χαρακτηριστικά την επίγεια διάδοση κυμάτων σε ένα αστικό περιβάλλον. Χρησιμοποιεί έξι διαφορετικές συνιστώσες σήματος με διαφορετικά δεδομένα για την κάθε μία, εξομοιώνοντας έτσι δέκτη με ταχύτητα 50 km/h που επιτρέπεται συνήθως στις αστικές περιοχές. Αυτό το προφίλ, που βάζει σε μέση δοκιμασία τον αποδιαμορφωτή του δέκτη, αναφέρεται ότι, εάν οι δέκτες μπορούν να το χειριστούν χωρίς προβλήματα, τότε η λήψη σε ένα αστικό περιβάλλον γενικά (σχεδόν) εξασφαλίζεται.

Οι βασικές παράμετροι των συνιστωσών Rayleigh του TU50 φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

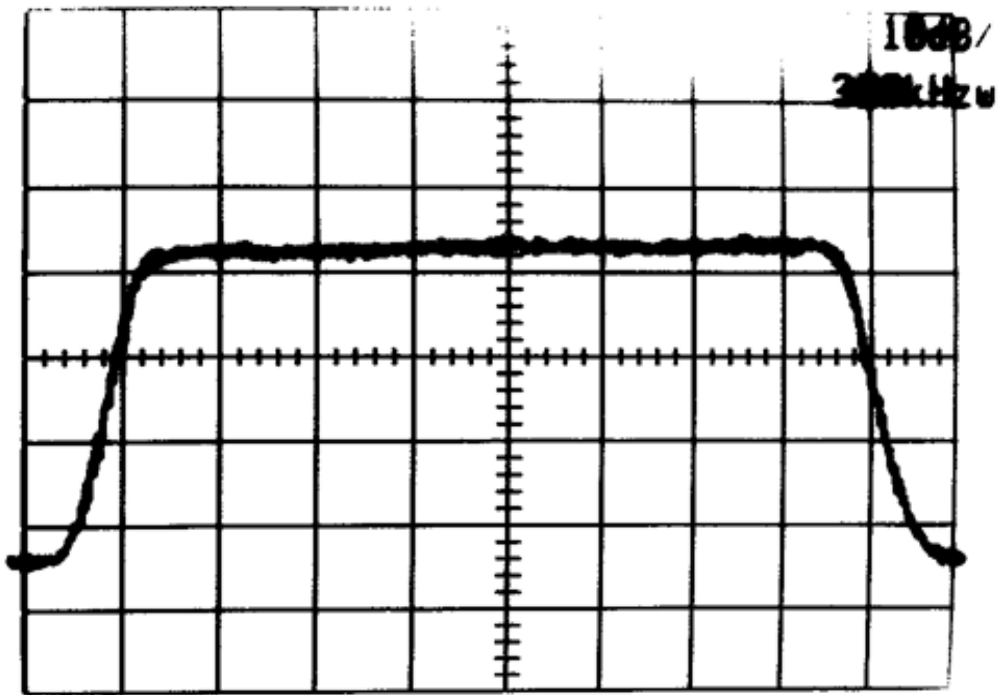
SETUP						
HARDWARE	INFO FIRMWARE	TIME/DATE CLOCK	COMMUNICATION	PRESET	CHANNEL TABLE	FADING PARAMETER SERVICE
ALEX50						
PATH STATE	ON	ON	ON	ON	ON	ON
PROFILE	RAYLEIGH	RAYLEIGH	RAYLEIGH	RAYLEIGH	RAYLEIGH	RAYLEIGH
PATH LOSS	3.0 dB	0.0 dB	2.0 dB	6.0 dB	8.0 dB	10.0 dB
DELAY	0.00 μs	0.20 μs	0.50 μs	1.60 μs	2.30 μs	5.00 μs
SPEED [km/h]	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
DOPPLER FREQUENCY	27.89 Hz	27.89 Hz	27.89 Hz	27.89 Hz	27.89 Hz	27.89 Hz
PHASE	0.0 DEG	0.0 DEG	0.0 DEG	0.0 DEG	0.0 DEG	0.0 DEG
DISCRETE COMPONENT	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
POWER RATIO	0.0 dB	0.0 dB	0.0 dB	0.0 dB	0.0 dB	0.0 dB
FREQUENCY RATIO	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
ACTIVE SET: ALEX100		/ OFF		F2=ALL EQUAL		F4=PG DOWN

Σχήμα 8.1.1.1 Οι παράμετροι για το TU50

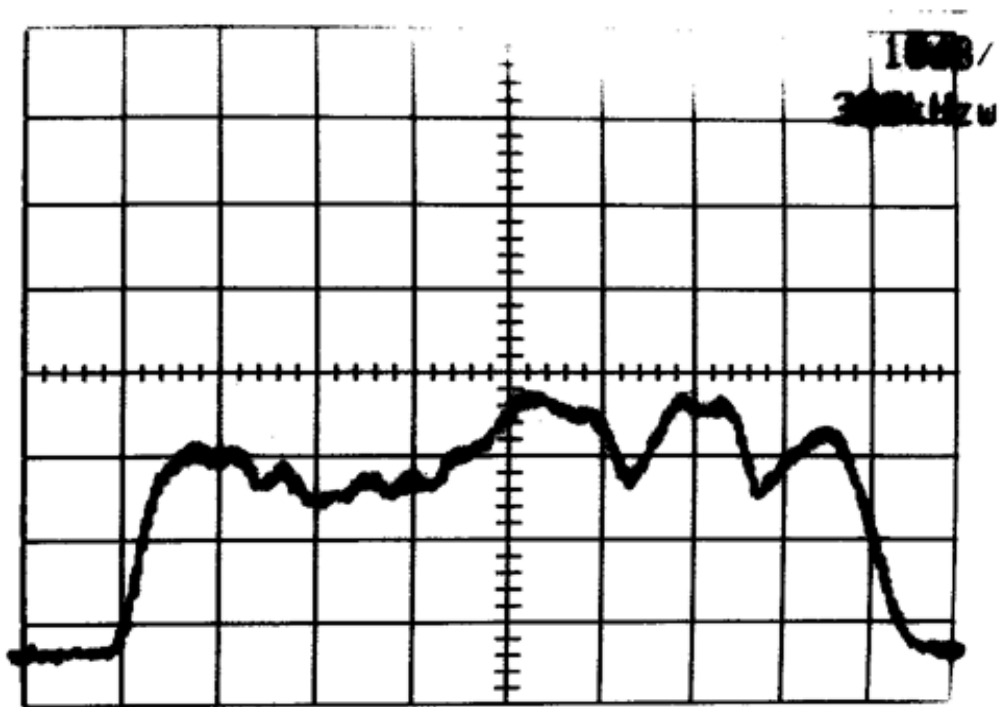
Εμείς βέβαια, δεν θα αρκεστούμε μόνο σε αυτό το προφίλ περιβάλλοντος αλλά χρησιμοποιώντας το ως βάση, θα δημιουργήσουμε ακόμα τρία προφίλ για ταχύτητες δέκτη 2, 20 και 100 km/h τα οποία για ευκολία θα αναφέρουμε αυθαίρετα κατά το πρότυπο TU50 στην παρούσα διπλωματική εργασία ως TU2, TU20 και TU100 αντίστοιχα, αφού έχουν τις βασικότερες παραμέτρους ίδιες με το TU50 και απλά διαφοροποιούνται ως προς την ταχύτητα του κινούμενου δέκτη. Τα προφίλ αυτά τα δημιουργήσαμε θέλοντας να καλύψουμε τρεις ακόμα βασικούς υποτιθέμενους δέκτες στην αστική κοινωνία:

- Τον πεζό άνθρωπο που κινείται με 2 km/h
- Το όχημα που βρίσκεται σε κατάσταση μέσης συμφόρησης της οδικής κυκλοφορίας και κινείται με μια μέση ταχύτητα 20 km/h
- Το όχημα που κινείται σε αυτοκινητόδρομο ελαττωμένης κίνησης με την οριακή ταχύτητα των 100 km/h.

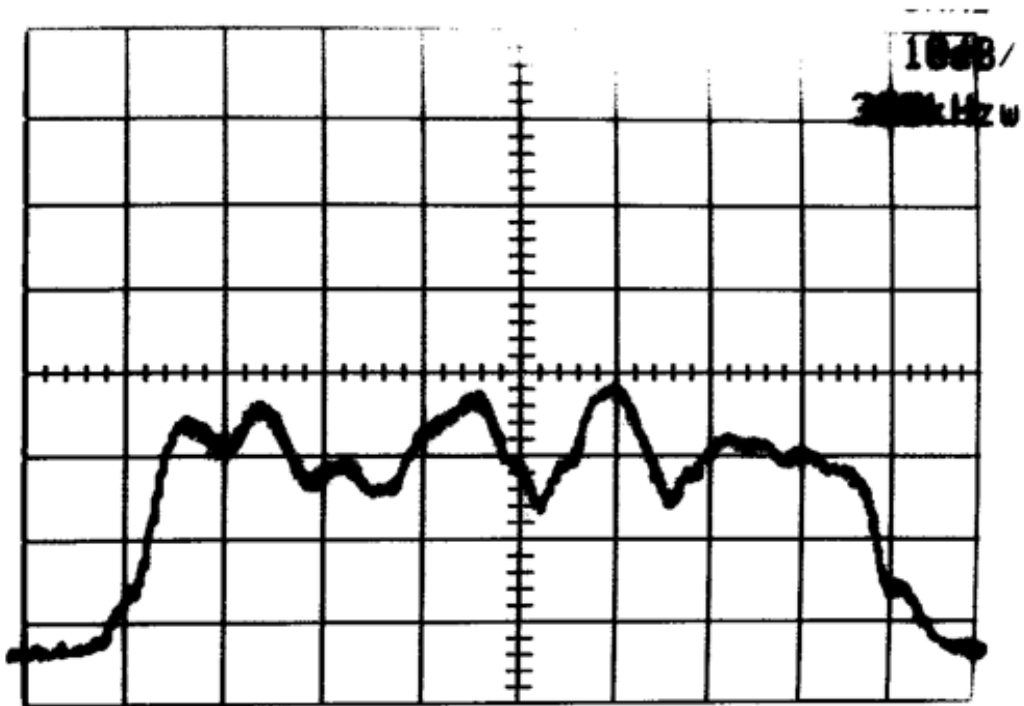
Για να δούμε ποιοτικά τις επιπτώσεις των παραπάνω προφίλ περιβάλλοντος διαλείψεων στο φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος παραθέτουμε τις παρακάτω εικόνες που πήραμε από τον αναλυτή φάσματος για κάθε μία από τις τρεις ταχύτητες, καθώς επίσης και την εικόνα του αρχικού φάσματος του σήματος για μια πιο άμεση σύγκριση:



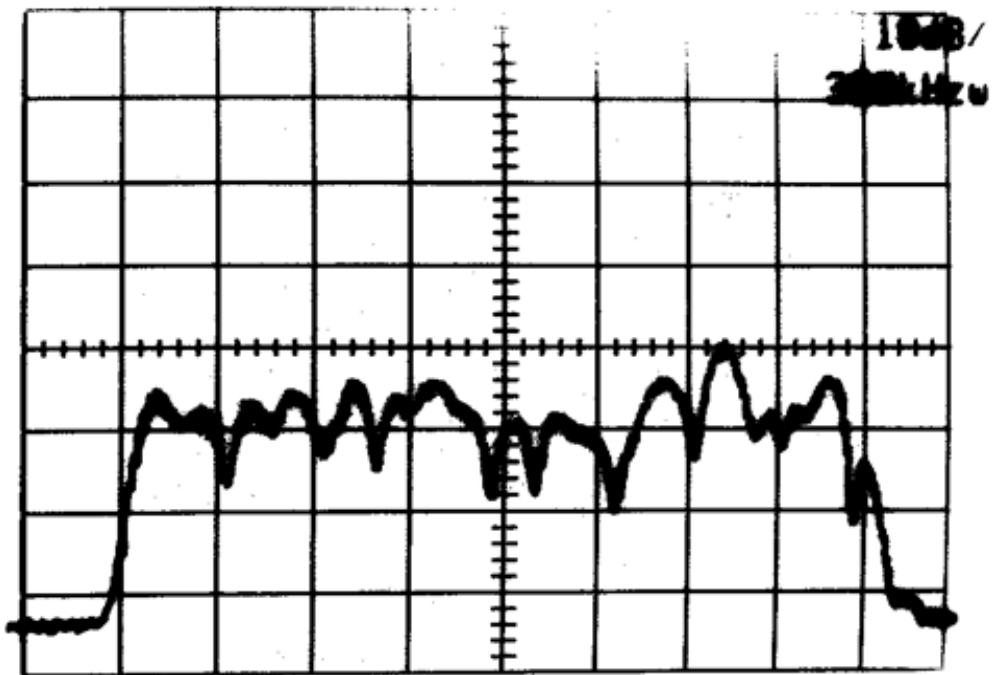
Σχήμα 8.1.1.2 Αρχικό φάσμα του σήματος



Σχήμα 8.1.1.3 Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 2 km/h



Σχήμα 8.1.1.4 Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 20 km/h



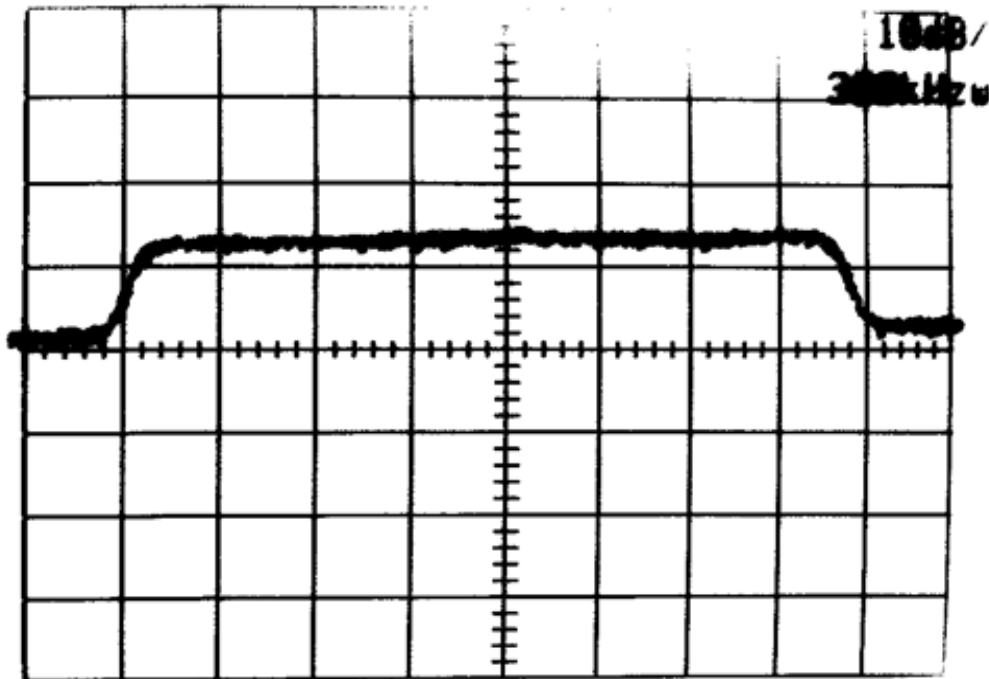
Σχήμα 8.1.1.5 Φάσμα του σήματος για ταχύτητα δέκτη 100 km/h

Από τις παραπάνω εικόνες είναι προφανές ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητού δέκτη τόσο περισσότερο διαφοροποιείται η συμπεριφορά του διαύλου ως προς τη συχνότητα με αποτέλεσμα οι φασματικές συνιστώσες του σήματος να υφίστανται διαφορετική εξασθένηση.

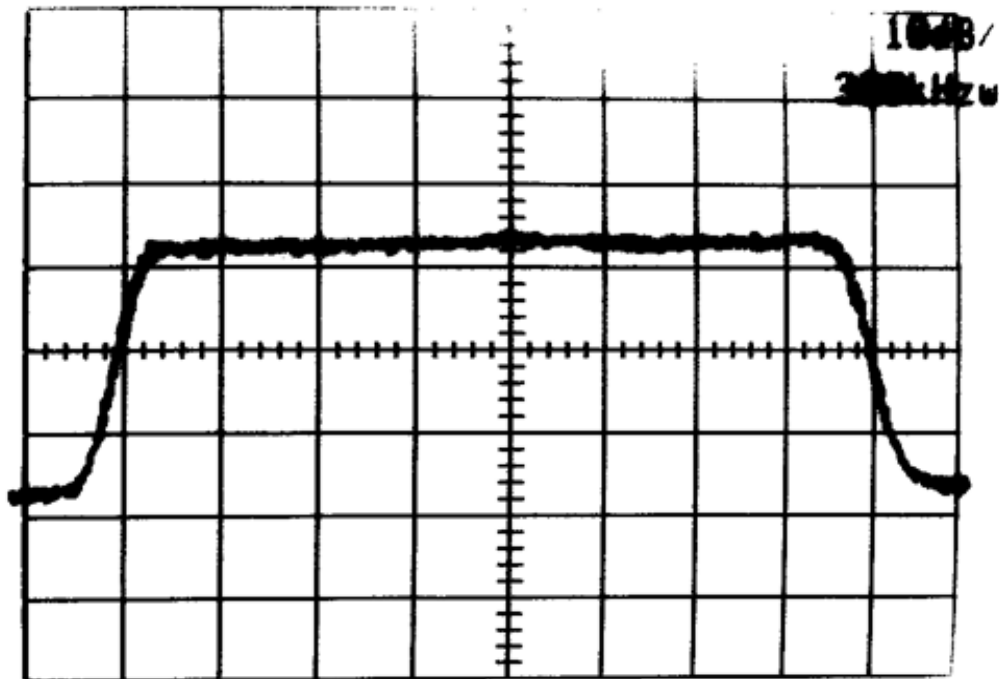
8.1.2 Εισαγωγή θορύβου στο δίαυλο

Εκτός από τις διαλείψεις κρίνεται σκόπιμη η εισαγωγή θορύβου στο κανάλι εκπομπής ώστε να εξομοιώσουμε κατά το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες. Έτσι, μέσα από τις επιλογές του Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz εισάγουμε θόρυβο στον δίαυλο και ρυθμίζουμε το λόγο CNR ο οποίος φθάνει τελικά στο δέκτη, που άλλωστε αποτελεί πρακτικής σημασίας μετρήσιμη παράμετρο σε κανονικές συνθήκες και η οποία καθιστά τις μετρήσεις πιο εύκολα χρησιμοποιήσιμες.

Για να φανεί καλύτερα η επίπτωση της εισαγωγής θορύβου στο σήμα παρατίθενται παρακάτω δύο σχήματα από τον αναλυτή φάσματος για διαφορετική ρύθμιση του CNR:



Σχήμα 8.1.2.1 Φάσμα του σήματος για CNR 10 dB



Σχήμα 8.1.2.2 Φάσμα του σήματος για CNR 30 dB

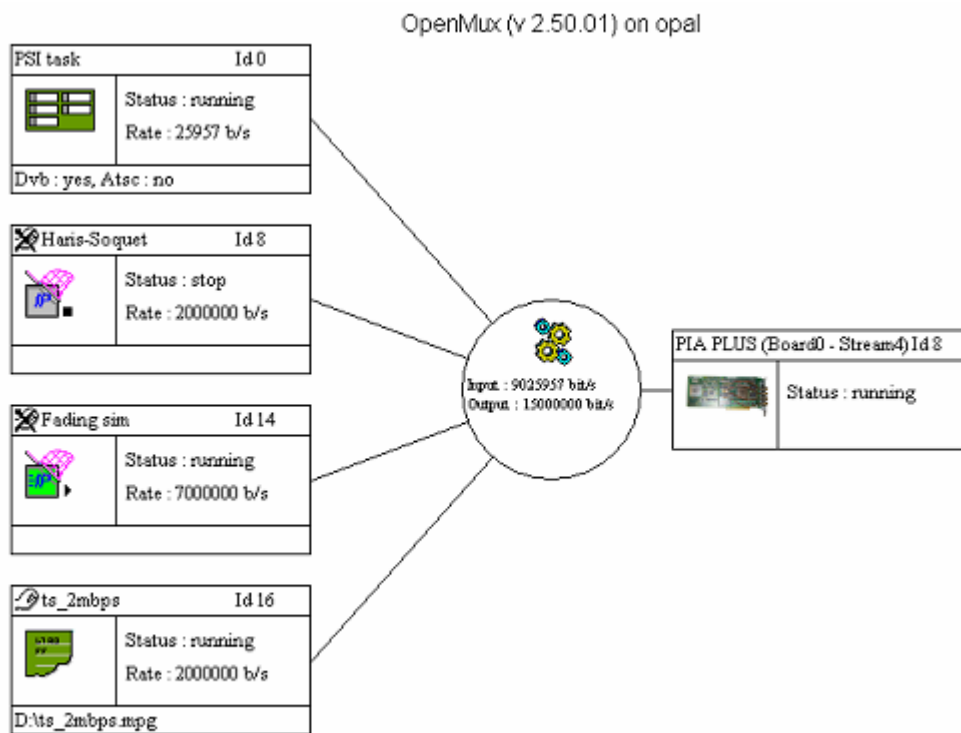
8.1.3 Ρυθμίσεις του διαμορφωτή

Στα πλαίσια του διαμορφωτή, επιλέγουμε διάφορες μεθόδους διαμόρφωσης και διαμορφώνουμε το φέρον στα 602 MHz (κανάλι 37 των UHF) με το σήμα βασικής ζώνης. Στη συνέχεια αφού ρυθμίσουμε το επίπεδο ισχύος του RF σήματος στα -30dBm το εκπέμπουμε προς το δέκτη.

8.1.4 Πολυπλέκτης IP / MPEG-2 πακέτων

Πριν από το σύνολο των κύριων μετρήσεων, έγιναν κάποιες προκαταρκτικές μετρήσεις στις οποίες ο πολυπλέκτης είχε ως είσοδο μόνο IP πακέτα ('fading sim' βλ. σχ. παρακάτω). Αυτό φάνηκε να επηρεάζει τον Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz ο οποίος σε ιδανικές συνθήκες εκπομπής, δηλαδή χωρίς θόρυβο ή διαλείψεις, παρουσίαζε μεταβαλλόμενη χρονική καθυστέρηση της τάξης των 150ms στο

Round Trip Time του συνολικού δικτύου και συνεπώς θα κλόνιζε την αξιοπιστία των μετρήσεων. Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίστηκε επιτυχώς από την προσθήκη ενός stream MPEG-2 πακέτων ('ts_2mbps' βλ. σχ. παρακάτω) στην είσοδο του πολυπλέκτη που είχε ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της προστιθέμενης στο δίκτυο καθυστέρησης του Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz.



Σχήμα 8.1.4.1 Πολυπλεξία της υπηρεσίας IP 'Fading Sim' και του αρχείου video κατά το πρότυπο MPEG-2 'ts_2mbps' σε μία ενιαία έξοδο

8.2 Uplink

8.2.1 Dummynet

Ύστερα από τη σταθεροποίηση της υπεισερχόμενης καθυστέρησης του όλου συστήματος στη συνδεσμολογία σε ιδανική κατάσταση εκπομπής, δηλαδή χωρίς θόρυβο ή διαλείψεις, η μέση τιμή της υπολογίστηκε περίπου στα 50ms, οπότε για την ακριβέστερη εξομοίωση του προτύπου GPRS, με τη βοήθεια του εργαλείου Dummynet εισαγάγαμε στο

κανάλι επιστροφής μια καθυστέρηση 800ms (τυπική για ένα GPRS link) ώστε να επιτύχουμε μια μέση χρονική καθυστέρηση των IP δεδομένων της τάξης των 850ms.

Επίσης, πάλι με τη βοήθεια του Dummynet δημιουργήσαμε μια μονόδρομη σωλήνωση για το κανάλι επιστροφής μεταξύ του πελάτη και του εξυπηρετητή, όπως άλλωστε ισχύει και στο πραγματικό ασύμμετρο σύστημα που προσπαθούμε να προσομοιώσουμε, ώστε το κανάλι επιστροφής να χρησιμοποιείται αυστηρά για uplink και όχι για διανομή πληροφορίας.

Οι ακριβείς εντολές για τις παραπάνω ρυθμίσεις είναι οι εξής:

```
#> ifconfig ed2 10.0.3.1 netmask 255.255.255.0
#> ifconfig ed3 10.0.2.40 netmask 255.255.255.0
#> sysctl -w net.inet.ip.forwarding=1
#> ipfw add pipe 1 ip from 10.0.3.33 to 10.0.0.4 in
#> ipfw pipe 1 config delay 800ms
```


9. Μετρήσεις

9.1 Οι παράμετροι των μετρήσεων

Ο σκοπός των πειραματικών μετρήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσουμε από τη μεριά του εξυπηρετητή ποιες είναι οι κατάλληλες ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στις παραμέτρους της διαμόρφωσης του προς αποστολή σήματος ώστε να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα της λήψης.

Μετά από κάποιες προκαταρκτικές μετρήσεις, έγινε προφανές ότι οι βασικότερες παράμετροι της διαμόρφωσης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της απόδοσης του δικτύου είναι το FFT mode της COFDM, το σχήμα διαμόρφωσης και το Code Rate. Βεβαίως, δεν είναι δυνατόν στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας να καλυφθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των διαφόρων τιμών των παραπάνω παραμέτρων, διότι ο όγκος των απαιτούμενων μετρήσεων θα ήταν τεράστιος. Ωστόσο, λήφθηκαν μετρήσεις για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των βασικότερων μορφών αυτών των παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- Για το FFT mode της COFDM:
 - 2k
 - 8k.

- Για τη μέθοδο διαμόρφωσης:
 - QPSK
 - 16QAM
 - 64QAM

- Για το Code Rate:
 - 1/2
 - 2/3
 - 3/4

Εκτός όμως, από τη μεριά του εξυπηρετητή, θέλαμε να εξετάσουμε την απόδοση του δικτύου και από τη μεριά του πελάτη-δέκτη. Έτσι, εκτός από την ταχύτητα κίνησης του δέκτη όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, εξετάζουμε και την παράμετρο του λαμβανόμενου CNR προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο ακόμα μια λειτουργικότητα των μετρήσεων: ο χρήστης του ασύμμετρου δικτύου, γνωρίζοντας την ταχύτητά του και μετρώντας το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη του, βρίσκεται αυτόματα σε θέση να έχει μια εκτίμηση του ρυθμού δεδομένων τον οποίο μπορεί να περιμένει υπό τις παρούσες συνθήκες. Γνωρίζοντας τη συμπεριφορά της ρυθμαπόδοσης σε συνάρτηση με αυτές τις παραμέτρους, ο χρήστης μπορεί να αναζητήσει για το ρυθμό δεδομένων που απαιτεί, τις κατάλληλες συνθήκες που θα του τον εξασφαλίσουν, δηλαδή την ταχύτητα κίνησής του και τον λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο.

Και εδώ όπως και προηγουμένως, θα πάρουμε μετρήσεις για το συνδυασμό των κυριότερων τιμών των παραπάνω παραμέτρων που είναι:

- Για την ταχύτητα του δέκτη:
 - 2 km/h
 - 20 km/h
 - 50 km/h
 - 100 km/h

Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για την επιλογή των τιμών για το λαμβανόμενο CNR ήταν η εξής:

Στην όλη συνδεσμολογία προσθέσαμε έναν ακόμη διαθέσιμο δέκτη/αποδιαμορφωτή, το μοντέλο PT 5765 της εταιρείας UBS, ο οποίος μέσω ενός splitter λάμβανε ακριβώς το ίδιο σήμα με τον Ipricot IPR-S500, όπως έχουμε δείξει στο Σχήμα 7.2.1.



Σχήμα 9.1.1 Ο δέκτης UBS PT 5765

Η ιδιαιτερότητα αυτού του δέκτη είναι ότι κάνει realtime επεξεργασία του BER, παρουσιάζει δηλαδή άμεσα το στιγμιαίο pre Viterbi BER καθώς και το post Viterbi BER

κατά την αποκωδικοποίηση του σήματος. Έτσι, η τακτική επιλογής των τιμών του CNR στον Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz ήταν η εξής: Αναζητούσαμε το κατώφλι του CNR για το οποίο ο post Viterbi BER έπαιρνε τιμή της τάξης του 10^{-7} και στη συνέχεια παίρναμε μετρήσεις για ακόμα 4 τιμές του CNR προς τα κάτω ανα διάστημα 2 dB. Έτσι, για παράδειγμα αν παρατηρούσαμε ότι ο post Viterbi BER ήταν της τάξης του 10^{-7} για ρύθμιση CNR 20dB στον Fading Simulator Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz παίρναμε μετρήσεις για τιμές του CNR : 20, 18, 16, 14 και 12 dB.

Προσθέτοντας αυτές τις δύο τελευταίες παραμέτρους που προσδιορίζονται άμεσα από το χρήστη των υπηρεσιών του ασύμμετρου δικτύου, καταλήγουμε σε ένα σύνολο (FFT mode * Modulation * Code Rate * TU * CNR = 2 * 3 * 3 * 4 * 5 =) 360 συνδυασμών των τιμών των παραμέτρων.

9.2 Η μέθοδος των μετρήσεων

Για να μετρήσουμε την απόδοση του δικτύου δεν καταφύγαμε στη λύση του διαδικτύου λόγω περιορισμού του bandwidth, αλλά χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα Iperf version 1.7.0. Το Iperf είναι ένα εργαλείο του οποίου κύριος σκοπός είναι να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση συνδέσεων TCP. Η πιο βασική παράμετρος βελτιστοποίησης της σύνδεσης TCP είναι το μέγεθος παραθύρου TCP (TCP Window Size) το οποίο ελέγχει πόσα δεδομένα είναι δυνατόν να μεταφέρονται από σημείο σε σημείο. Για παράδειγμα, αν είναι πολύ μικρό τότε αφήνει ανεκμετάλλευτο ένα μεγάλο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης με αποτέλεσμα την ελάττωση της απόδοσης του δικτύου. Η θεωρητική τιμή για το βέλτιστο μέγεθος παραθύρου TCP δίνεται από το γινόμενο του διαθέσιμου εύρους ζώνης επί την καθυστέρηση ή αλλιώς από το γινόμενο:

$$\text{TCP Window Size} = \text{Bottleneck Bandwidth} * \text{Round Trip Time}$$

Έχοντας πάρει ένα σύνολο προκαταρκτικών μετρήσεων για διάφορες τιμές του μεγέθους του παραθύρου TCP παρατηρήσαμε ότι η αλλαγή του δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συγκεκριμένου δικτύου που χρησιμοποιούμε στα πλαίσια αυτής της

διπλωματικής εργασίας. Έτσι, ρυθμίζοντας το μέγεθος παραθύρου στην ικανοποιητική τιμή των 512000 byte και κρατώντας το σταθερό χρησιμοποιούμε το εργαλείο Iperf για να υπολογίσουμε τη μέγιστη απόδοση του δικτύου με την αντίστροφη μέθοδο ως εξής:

$$\text{Bandwidth} = \frac{\text{TCP Window Size (512kB)}}{\text{Round Trip Time}}$$

9.3 Η διεξαγωγή μιας ενιαίας μέτρησης

Έχοντας περιγράψει τη μέθοδο με την οποία διεξάγονται οι μετρήσεις καθώς επίσης και τις παραμέτρους που μεταβάλλονται για την τελική μέτρηση του throughput του ασύμμετρου δικτύου, είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε τη διεξαγωγή μιας ενιαίας μέτρησης για μια πιο μικροσκοπική άποψη του ζητήματος.

Κατά την τυχαία αυτή μέτρηση, οι τιμές των παραμέτρων ήταν:

- 2k για το FFT mode
- QPSK για τη μέθοδο διαμόρφωσης
- 2/3 για το Code Rate
- TU20 για το περιβάλλον διαλείψεων
- 21 dB για το CNR

Έτσι, αφού κάνουμε τις παραπάνω ρυθμίσεις για τη διαμόρφωση, τις διαλείψεις και το θόρυβο στον Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz εκτελούμε το πρόγραμμα Iperf στον client και τον server.

Επειδή το ζητούμενο είναι η ρυθμιζόμενη του καναλιού εκπομπής DVB-T (downlink) το οποίο μεταφέρει τα κυρίως δεδομένα και όχι του καναλιού επιστροφής GPRS (uplink) το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά απλών request ή acknowledgement που άλλωστε οι απαιτήσεις τους σε bandwidth είναι μικρές, το Iperf εκτελείται σε εφαρμογή server στον

client, δηλαδή τον υπολογιστή του τελικού χρήστη, και σε μορφή client στον server, δηλαδή τον εξυπηρετητή των υπηρεσιών TCP / IP.

Έτσι, από τη μεριά του χρήστη έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

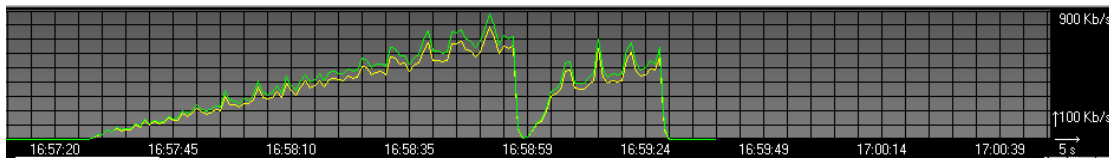
```
C:\Program Files\iperf>iperf -s
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 512.00 KByte
-----
[1912] local 10.0.3.33 port 5001 connected with 10.0.0.4 port 1111
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[1912] 0.0-120.5 sec  5.06 MBytes  352 Kbits/sec
```

ενώ από τη μεριά του εξυπηρετητή:

```
-----
Client connecting to 10.0.3.33, TCP port 5001
TCP window size: 512.00 KByte
-----
[ 5] local 10.0.0.4 port 1111 connected with 10.0.3.33 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 5] 0.0-10.0 sec   80.0 KBytes  65.5 Kbits/sec
[ 5] 10.0-20.0 sec  168 KBytes  138 Kbits/sec
[ 5] 20.0-30.0 sec  248 KBytes  203 Kbits/sec
[ 5] 30.0-40.0 sec  344 KBytes  282 Kbits/sec
[ 5] 40.0-50.0 sec  456 KBytes  374 Kbits/sec
[ 5] 50.0-60.0 sec  528 KBytes  433 Kbits/sec
[ 5] 60.0-70.0 sec  624 KBytes  511 Kbits/sec
[ 5] 70.0-80.0 sec  720 KBytes  590 Kbits/sec
[ 5] 80.0-90.0 sec  744 KBytes  609 Kbits/sec
[ 5] 90.0-100.0 sec 184 KBytes  151 Kbits/sec
[ 5] 100.0-110.0 sec 488 KBytes  400 Kbits/sec
[ 5] 110.0-120.0 sec 592 KBytes  485 Kbits/sec
[ 5] 0.0-121.4 sec  5.06 MBytes  350 Kbits/sec
```

Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι η μέση τιμή του throughput που επιτεύχθηκε σε αυτή τη μέτρηση ήταν 352 Kbits/sec. Παρόλα αυτά, από τα επιμέρους διαστήματα που παίρνει τις μετρήσεις του ρυθμού δεδομένων (bitrate) το Iperf, μπορεί να δει κανείς ότι παρουσιάζονται μεγάλες αυξομειώσεις οι οποίες βέβαια οφείλονται στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω των διαλείψεων που επιβαρύνουν το σύστημα.

Τα παραπάνω είναι πιο εύκολο να φανούν από την ακόλουθη γραφική παράσταση του software του IP to DVB Gateway, που αποτυπώνει την κίνηση στο δίκτυο των πακέτων IP:



Σχήμα 9.3.1 Κίνηση του δικτύου

από όπου φαίνεται καθαρά η μεταβλητότητα στον ρυθμό δεδομένων.

Κατά την εκτέλεση κάθε μέτρησης εκτός του bitrate και της γραφικής του παράστασης, καταγράφεται στον server με την παραμικρή λεπτομέρεια και η συνολική κίνηση των πακέτων IP μέσω της εντολής `tcpdump`.

Έτσι, για την παραπάνω μέτρηση, εκτελώντας στον server την εντολή:

```
tcpdump -i eth1 -w 2k_qpsk_23_1
```

καταγράφουμε πλήρως την κίνηση του δικτύου μέσω του interface `eth1` (το οποίο δεν είναι άλλο από την κάρτα δικτύου που φέρνει τον server σε επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω του εσωτερικού δρομολογητή) στο dump file `2k_qpsk_23_1`. Το αρχείο αυτό μετά μπορούμε να το ανοίξουμε με την εντολή `tcptrace` η οποία επεξεργάζεται όλα τα δεδομένα που περιέχονται μέσα σε αυτό και να μας παρουσιάσει χρήσιμα στατιστικά στοιχεία. Εκτελούμε λοιπόν, την εντολή:

```
tcptrace -l 2k_qpsk_23_1
```

και παίρνουμε τα ακόλουθα δεδομένα:

```
1 arg remaining, starting with '2k_qpsk_23_020_1'  
Ostermann's tcptrace -- version 6.4.2 -- Sat May 3, 2003  
  
5678 packets seen, 5660 TCP packets traced  
elapsed wallclock time: 0:00:00.177089, 32062 pkts/sec analyzed  
trace file elapsed time: 0:02:21.366994  
TCP connection info:  
1 TCP connection traced:  
TCP connection 1:  
    host a:    10.0.0.4:1111
```

```

host b:      10.0.3.33:5001
complete conn: yes
first packet: Thu Dec  4 17:55:28.709248 2003
last packet:  Thu Dec  4 17:57:30.951515 2003
elapsed time: 0:02:02.242267
total packets: 5660
filename:    2k_qpsk_23_020_1
a->b:
total packets:      3725
ack pkts sent:      3724
pure acks sent:     2
sack pkts sent:     0
max sack blks/ack: 0
unique bytes sent:  5308440
actual data pkts:   3722
actual data bytes:  5379688
rexmt data pkts:    50
rexmt data bytes:   71248
zwnd probe pkts:    0
zwnd probe bytes:   0
outoforder pkts:   0
pushed data pkts:   198
SYN/FIN pkts sent: 1/1
req 1323 ws/ts:     Y/Y
adv wind scale:     0
req sack:           Y
sacks sent:         0
urgent data pkts:   0 pkts
urgent data bytes:  0 bytes
mss requested:      1460 bytes
max segm size:      1448 bytes
min segm size:      24 bytes
avg segm size:      1445 bytes
max win adv:        5840 bytes
min win adv:        5840 bytes
zero win adv:       0 times
avg win adv:        5840 bytes
initial window:     1472 bytes
initial window:     2 pkts
ttl stream length:  5308440 bytes
missed data:        0 bytes
truncated data:     5268034 bytes
truncated packets:  3721 pkts
data xmit time:     120.502 secs
idletime max:       1110.0 ms
throughput:         43426 Bps

b->a:
total packets:      1935
ack pkts sent:      1935
pure acks sent:     1933
sack pkts sent:     0
max sack blks/ack: 0
unique bytes sent:  0
actual data pkts:   0
actual data bytes:  0
rexmt data pkts:    0
rexmt data bytes:   0
zwnd probe pkts:    0
zwnd probe bytes:   0
outoforder pkts:   0
pushed data pkts:   0
SYN/FIN pkts sent: 1/1
req 1323 ws/ts:     Y/Y
adv wind scale:     3
req sack:           Y
sacks sent:         0
urgent data pkts:   0 pkts
urgent data bytes:  0 bytes
mss requested:      1460 bytes
max segm size:      0 bytes
min segm size:      0 bytes
avg segm size:      0 bytes
max win adv:        512000 bytes
min win adv:        510552 bytes
zero win adv:       0 times
avg win adv:        511642 bytes
initial window:     0 bytes
initial window:     0 pkts
ttl stream length:  0 bytes
missed data:        0 bytes
truncated data:     0 bytes
truncated packets:  0 pkts
data xmit time:     0.000 secs
idletime max:       2160.9 ms
throughput:         0 Bps

```

Απ' ότι βλέπουμε, το παραπάνω αρχείο μας παρέχει στατιστικά στοιχεία τόσο για το downlink (a->b) όσο και για το uplink (b->a). Εμείς βέβαια ενδιαφερόμαστε για τη συμπεριφορά του downlink (a->b) δηλαδή τα δεδομένα που βρίσκονται στην αριστερή στήλη και όχι τόσο για αυτά στην δεξιά που αναφέρονται στο uplink και περιλαμβάνουν μόνο αιτήσεις και επιβεβαιώσεις για τα κυρίως πακέτα που διαδίδονται μέσω του downlink.

Τα πιο σημαντικά από τα παραπάνω στατιστικά στοιχεία είναι ο συνολικός αριθμός πακέτων (total packets 3725), τα μοναδικά-διαφορετικά μεταξύ τους bytes που εστάλησαν (unique bytes sent 5308440), ο συνολικός αριθμός των πακέτων και των bytes που εστάλησαν (actual data packets 3722, actual data bytes 5379688), ο αριθμός των επαναμεταδοθέντων πακέτων και bytes (rexmt data packets 50, rexmt data bytes 71248), η κλίμακα του παραθύρου TCP (adv wind scale 3), η ρύθμιση για το maximum segment size (mss requested 1460 bytes) και ο ρυθμός δεδομένων (throughput 43426 Bps).

Έτσι, για παράδειγμα από τα παραπάνω στοιχεία μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι κατά τη μετάδοσή μας είχαμε:

- ποσοστό απώλειας πακέτων (packet loss):

$$\frac{\text{rexmt data packets}}{\text{actual data packets}} = \frac{50}{3722} = 1,34\%$$

- ποσοστό απώλειας bytes (byte loss):

$$\frac{\text{rexmt data bytes}}{\text{actual data bytes}} = \frac{71248}{5379688} = 1,32\%$$

(βλέπουμε ότι το packet loss είναι περίπου το ίδιο με το byte loss όπως ακριβώς έπρεπε να συμβαίνει)

- μέγεθος του παραθύρου του TCP (TCP Window Size) του δέκτη:

$$64000 \text{ bytes} * 2^3 = 512000 \text{ bytes}$$

(όπως ακριβώς το είχαμε ρυθμίσει)

- Maximum Transfer Unit (MTU):

$$\text{mss} + \text{IP headers} = 1460 + 40 = 1500 \text{ bytes}$$

- και throughput:

$$43426 \text{ Bps} = \frac{43426 \cdot 8}{1024} = 339,3 \text{ kbps}$$

(που είναι περίπου ίδια με τη μέτρηση που μας έχει δώσει το Iperf).

Εκτός από τα στατιστικά αυτά στοιχεία, μπορούμε και πάλι με τη βοήθεια της εντολής `tcptrace` αλλά αυτή τη φορά με παράμετρο `-G` να επεξεργαστούμε τα δεδομένα του dump file `2k_qpsk_23_1` και να κατασκευάσουμε μια σειρά από γραφήματα `.xpl` τα οποία μας δίνουν μια καλύτερη άποψη για το ιστορικό των πακέτων IP που κινήθηκαν στο δίκτυό μας. Εκτελώντας λοιπόν την εντολή:

```
tcptrace -G -A80 -y -zxy 2k_qpsk_23_1
```

κατασκευάζονται τα παρακάτω αρχεία-γραφήματα:

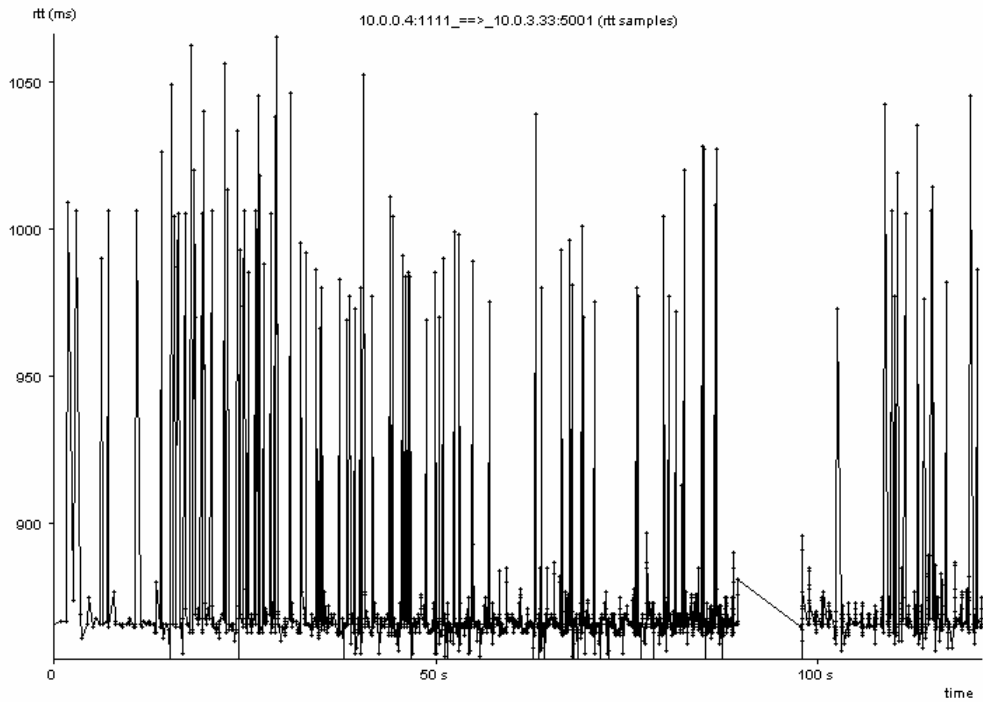
```
a_b_tline.xpl  
a2b_owin.xpl  
a2b_rtt.xpl  
a2b_tput.xpl  
a2b_tsg.xpl  
b2a_owin.xpl  
b2a_rtt.xpl  
b2a_tput.xpl  
b2a_tsg.xpl
```

Και εδώ όπως και με τα στατιστικά στοιχεία προηγουμένως, μας ενδιαφέρουν περισσότερο τα στοιχεία `a->b` (`a2b`) που αφορούν το `downlink` και όχι τα αρχεία `b->a` (`b2a`) που αφορούν το `uplink`.

Τα αρχεία-γραφήματα αυτά τελικά, μπορούμε να δούμε με την εντολή:

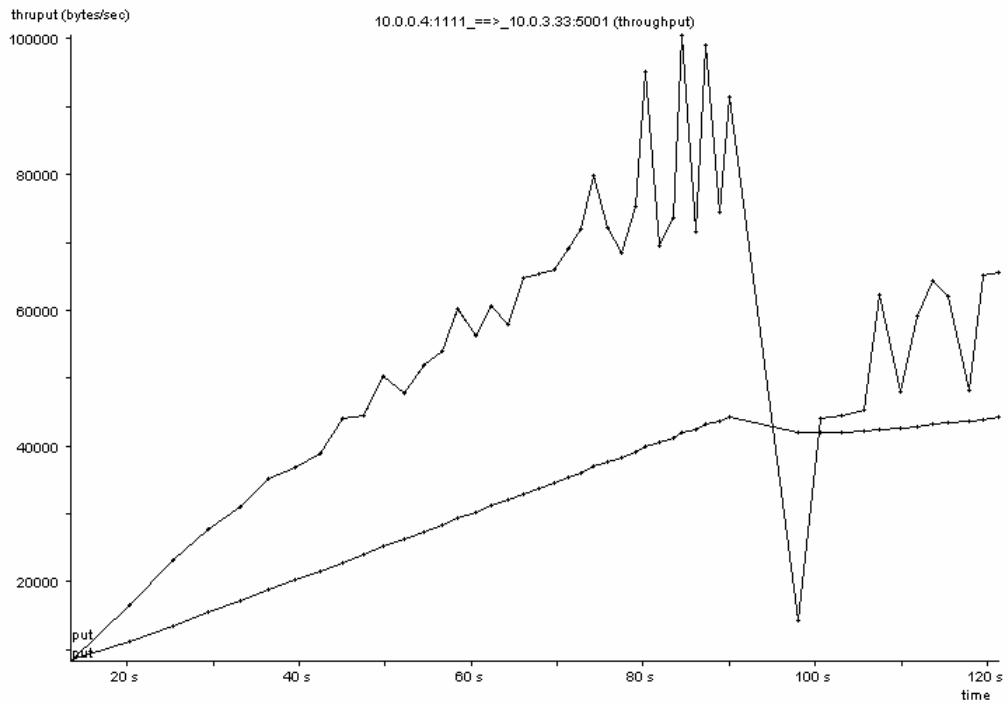
```
xplot a2b- .xpl
```

Για παράδειγμα παρακάτω βλέπουμε το γράφημα του Round Trip Time (RTT) σε συνάρτηση με το χρόνο απ' όπου παρατηρούμε ότι διατηρεί σταθερή μέση τιμή και ίση με την καθυστέρηση του δικτύου που έχουμε ρυθμίσει με το `dummynet`:



Σχήμα 9.3.2 RTT συναρτήσει του χρόνου

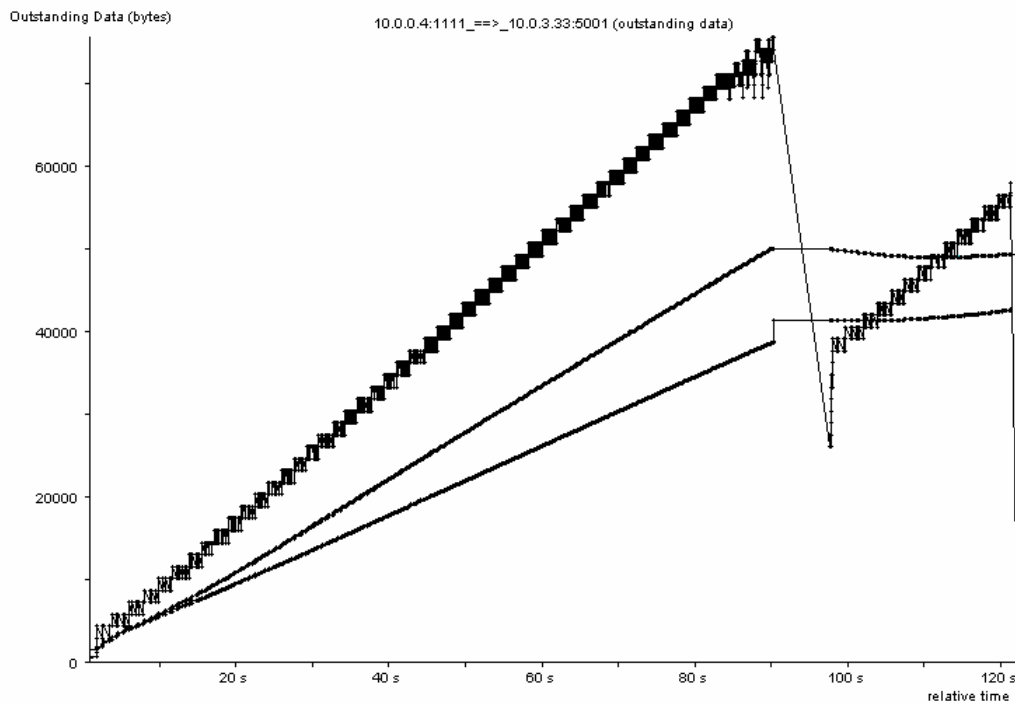
Εδώ βλέπουμε το throughput συναρτήσει του χρόνου καθώς επίσης και τη μέση τιμή του:



Σχήμα 9.3.3 Το throughput συναρτήσει του χρόνου

Συγκρίνοντας το παραπάνω γράφημα με αυτό του Σχήματος 9.3.1 παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν εμφανείς ομοιότητες.

Τέλος, στο παρακάτω γράφημα βλέπουμε την εξέλιξη των ενεπιβεβαίωτων πληροφοριών (outstanding data) στο δίκτυο, που αποτελεί μια καλή προσέγγιση του παραθύρου συμφόρησης (congestion window) του server το οποίο γεμίζει λόγω των ανεπιβεβαίωτων πακέτων με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα να αδειάσει κατά το ήμισυ ακολουθώντας στη συνέχεια την ίδια διαδικασία:



Σχήμα 9.3.4 Congestion Window

9.4 Οι τελικές μετρήσεις

9.4.1 Πίνακες

Έχοντας παρουσιάσει τις μετρούμενες παραμέτρους και τη μεθοδολογία των μετρήσεων καθώς επίσης και τα δεδομένα που μας παρέχονται από κάθε μέτρηση

ξεχωριστά και τα συμπεράσματα στα οποία μπορούμε να καταλήξουμε μελετώντας αυτά τα δεδομένα (μικροσκοπικά), είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε το σύνολο των τελικών μετρήσεων ώστε να καταφέρουμε να εξετάσουμε το ζήτημα της συμπεριφοράς της κινητής λήψης με πιο μακροσκοπικό χαρακτήρα. Ο πλήρης αριθμός, των μετρήσεων συνοψίζεται από τους δύο πίνακες που ακολουθούν:

FFT 2K	QPSK						16QAM						64QAM					
	1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4	
	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate
TU	16	131	20	362	22	503.0	20	406.0	24	658.0	28	540.0	25	618.0	33	551.0	36	518.0
2	14	120	18	452	20	722.0	18	363.0	22	698.0	26	375.0	23	800.0	31	657.0	34	266.0
2	12	118	16	311	18	527.0	16	157.0	20	149.0	24	316.0	21	142.0	29	669.0	32	318.0
2	10	74.4	14	142	16	152.0	14	44.6	18	43.4	22	178.0	19	44.0	27	302.0	30	116.0
2	8	31.8	12	57.9	14	49.0	12	32.2	16	32.8	20	61.9	17	20.6	25	140.0	28	67.9
20	18	146	21	352	24	538.0	23	531.0	27	512.0	31	383.0	28	355.0	34	271.0	40	123.0
20	16	70	19	231	22	783.0	21	663.0	25	491.0	29	753.0	26	273.0	32	198.0	38	142.0
20	14	159	17	289	20	478.0	19	292.0	23	191.0	27	463.0	24	172.0	30	147.0	36	122.0
20	12	85.5	15	185	18	208.0	17	152.0	21	131.0	25	267.0	22	66.2	28	111.0	34	84.6
20	10	60.6	13	61.5	16	104.0	15	56.2	19	52.7	23	108.0	20	52.2	26	51.1	32	90.3
50	19	104	23	376	27	324.0	24	248.0	30	196.0	33	157.0	30	164.0	36	51.3	40	36.0
50	17	115	21	317	25	487.0	22	311.0	28	225.0	31	119.0	28	97.7	34	56.5	38	34.1
50	15	108	19	358	23	396.0	20	191.0	26	148.0	29	109.0	26	87.4	32	42.0	36	26.5
50	13	102	17	145	21	223.0	18	74.6	24	131.0	27	71.5	24	47.5	30	55.6	34	18.6
50	11	47.3	15	83.2	19	133.0	16	38.0	22	98.1	25	55.6	22	44.7	28	17.1	32	21.6
100	21	103	25	100.0	31	40.0	26	58.2	34	18.2	36	10.6	33	20.2	39	2.7	44	0.0
100	19	113	23	111.0	29	44.0	24	51.0	32	18.9	34	3.2	31	17.3	37	2.7	42	0.2
100	17	86.1	21	99.0	27	54.4	22	45.6	30	20.1	32	13.1	29	0.2	35	0.3	40	0.3
100	15	68.1	19	67.0	25	64.7	20	37.1	28	19.4	30	13.2	27	14.5	33	0.6	38	0.0
100	13	42.1	17	52.2	23	57.5	18	32.7	26	31.1	28	6.2	25	18.6	31	1.5	36	0.3

Πίνακας Τελετών Μετρήσεων Ι

FFT 8K	QPSK						16QAM						64QAM					
	1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4	
	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate	CNR	bitrate
TU																		
2	18	84.2	20	423.0	24	541.0	22	556.0	25	567.0	29	505.0	26	621.0	31	655.0	38	594.0
2	16	111.0	18	448.0	22	745.0	20	514.0	23	769.0	27	640.0	24	681.0	29	570.0	36	552.0
2	14	124.0	16	376.0	20	696.0	18	556.0	21	442.0	25	732.0	22	231.0	27	450.0	34	637.0
2	12	84.3	14	122.0	18	274.0	16	121.0	19	153.0	23	408.0	20	106.5	25	141.0	32	564.0
2	10	55.8	12	66.0	16	182.0	14	61.5	17	58.2	21	131.0	18	36.0	23	81.6	30	360.0
20	21	113.0	23	268.0	27	179.0	25	164.0	29	81.9	35	42.8	29	50.8	41	29.5	45.9	8.3
20	19	117.0	21	233.0	25	222.0	23	273.0	27	84.9	33	53.5	27	56.4	39	23.5	44	9.2
20	17	108.0	19	253.0	23	240.0	21	165.0	25	74.1	31	57.0	25	53.2	37	23.2	42	10.0
20	15	88.1	17	156.6	21	142.0	19	75.0	23	65.2	29	60.9	23	37.8	35	26.4	40	1.3
20	13	96.5	15	78.6	19	112.0	17	42.6	21	47.7	27	36.5	21	12.5	33	16.3	38	3.1
50	22	37.1	28	16.1	34	3.1	36	7.5	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0
50	20	34.5	26	12.5	32	4.4	34	3.1	44	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0
50	18	28.6	24	12.3	30	5.2	32	3.9	42	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0
50	16	32.4	22	16.4	28	6.1	30	2.5	40	0.1	40	0.0	40	0.0	40	0.0	40	0.0
50	14	23.3	20	17.1	26	0.0	28	3.7	38	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0
100	24	0.0	34	0.0	40	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0	45.9	0.0
100	22	0.0	32	0.0	38	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0	44	0.0
100	20	0.0	30	0.0	36	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0	42	0.0
100	18	0.0	28	0.0	34	0.0	40	0.0	40	0.0	40	0.0	40	0.0	40	0.0	40	0.0
100	16	0.0	26	0.0	32	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0	38	0.0

Πίνακας Τεχνικών Μετρήσεων II

Ο Πίνακας Τελικών Μετρήσεων I καταγράφει τη διακύμανση του bitrate σε kbps σε συνάρτηση με τα διάφορα είδη διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM, 64QAM), τις διάφορες τιμές Code Rate (1/2, 2/3, 3/4), τα διάφορα προφίλ διαλείψεων (TU2, TU20, TU50 και TU100) και τέλος τα διάφορα επίπεδα του CNR (σε dB), για FFT mode της COFDM 2K.

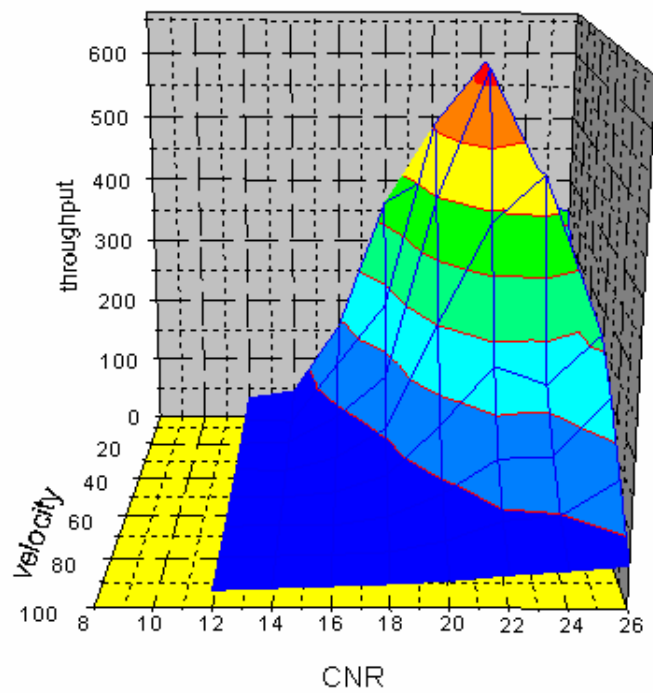
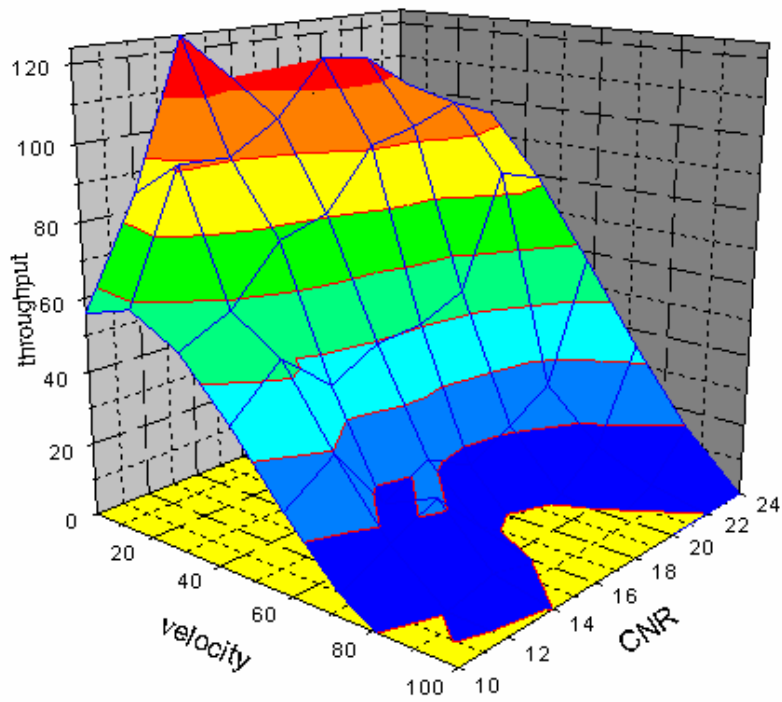
Ο Πίνακας Τελικών Μετρήσεων II καταγράφει τη διακύμανση του bitrate σε kbps σε συνάρτηση με τα διάφορα είδη διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM, 64QAM), τις διάφορες τιμές Code Rate (1/2, 2/3, 3/4), τα διάφορα προφίλ διαλείψεων (TU2, TU20, TU50 και TU100) και τέλος τα διάφορα επίπεδα του CNR (σε dB), για FFT mode της COFDM 8K.

9.4.2 Διαγράμματα

Για να δούμε πιο ποιοτικά τα δεδομένα που μας παρέχουν οι πίνακες των τελικών μετρήσεων κατασκευάσαμε μια σειρά από διαγράμματα τα οποία χωρίσαμε σε ομάδες για να διαφοροποιήσουμε τη συμπεριφορά του throughput ως προς την κάθε παράμετρο.

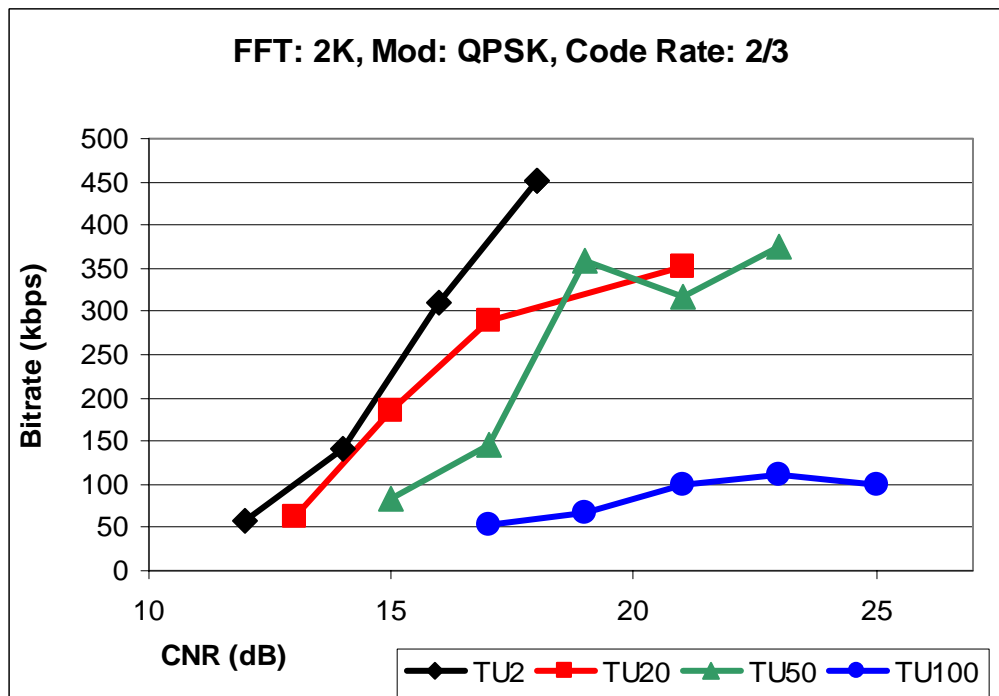
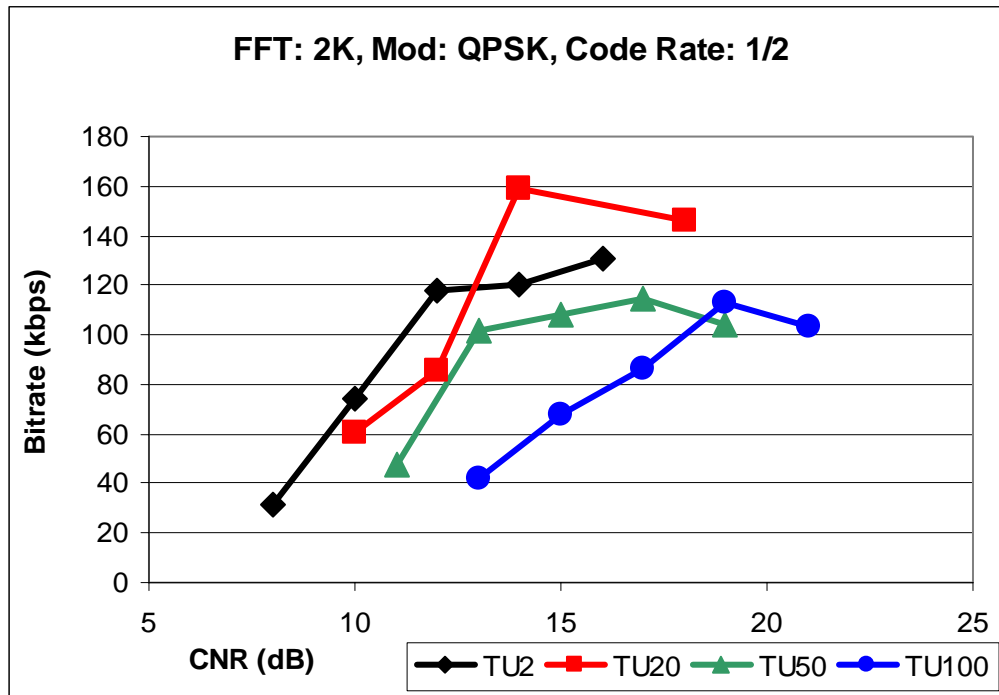
9.4.2.1 Ομάδα διαγραμμάτων 1 – Το throughput συναρτήσει της ταχύτητας δέκτη και του CNR

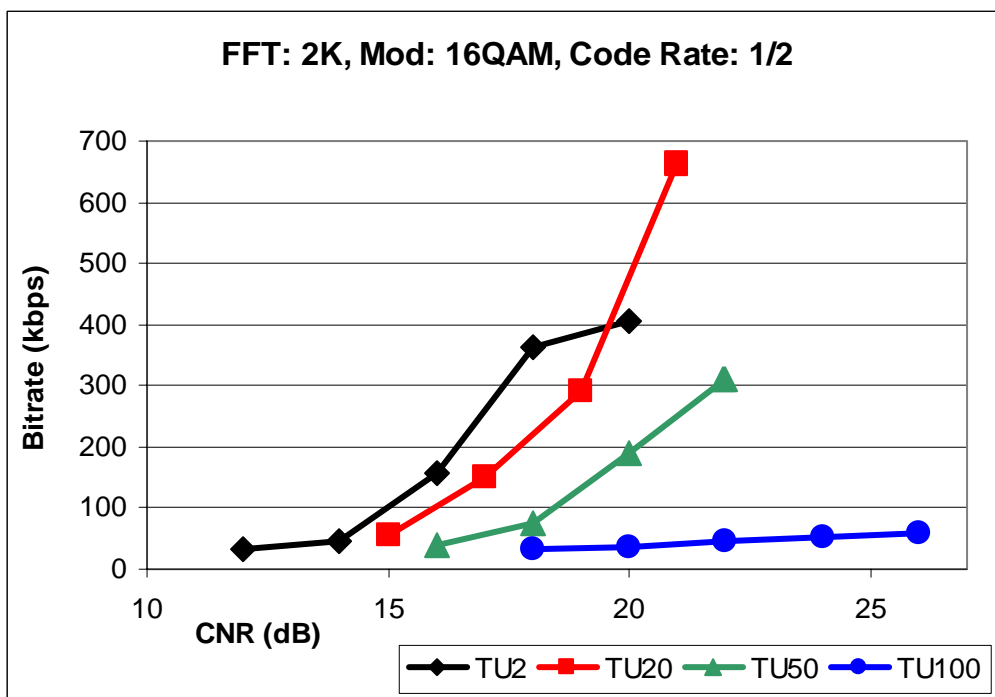
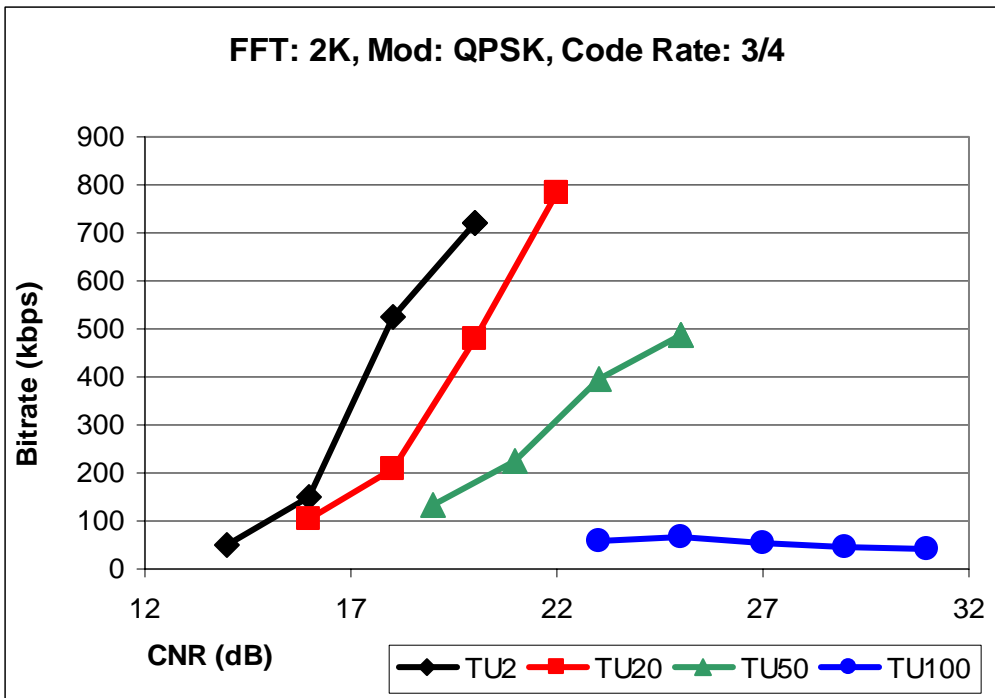
Τη συμπεριφορά του throughput σε συνάρτηση με την ταχύτητα του κινούμενου δέκτη (δηλαδή του προφίλ διαλείψεων) και του λαμβανόμενου CNR μπορούμε να τη δούμε μέσα από τα παρακάτω διαγράμματα:

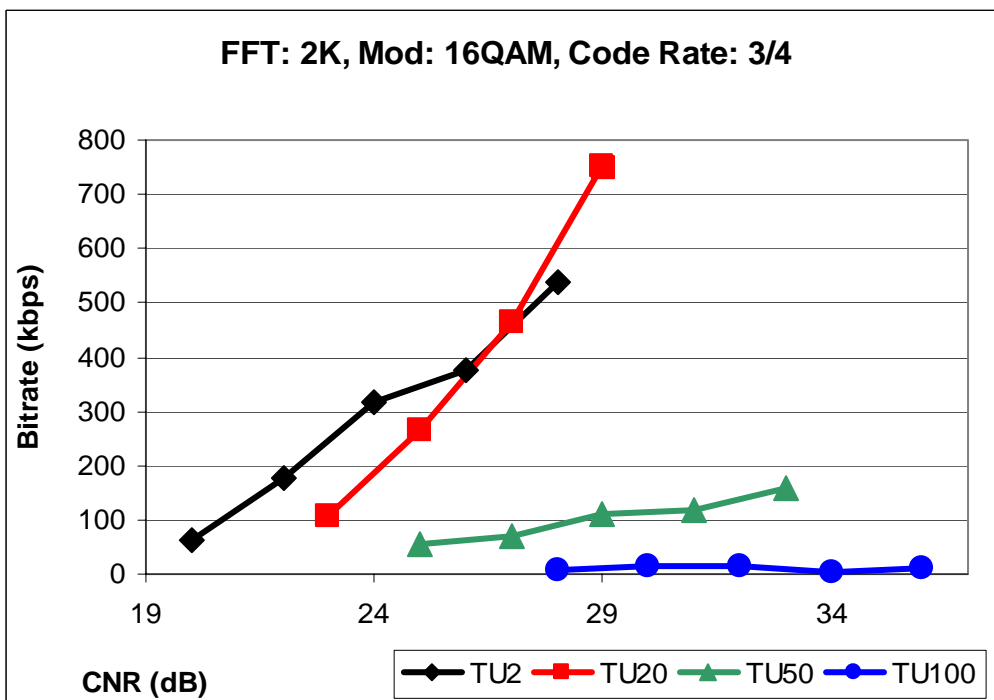
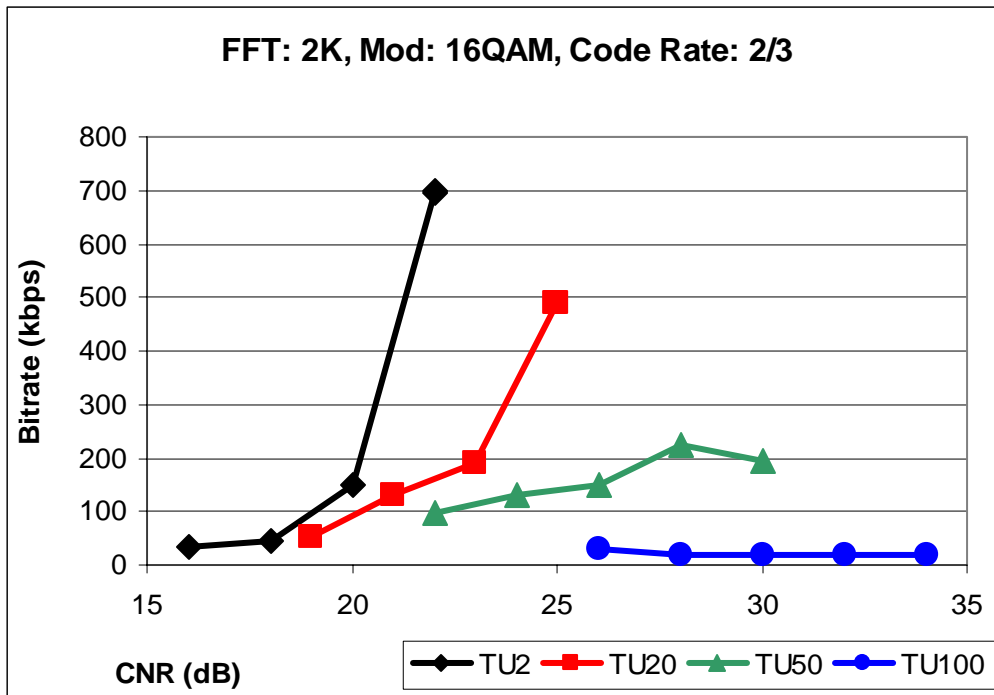


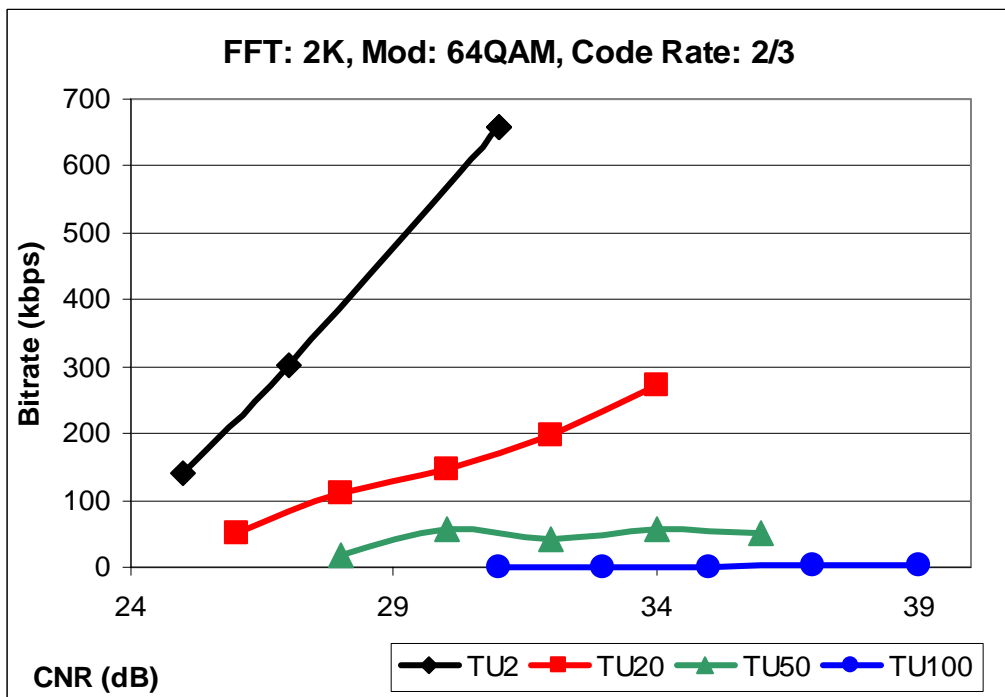
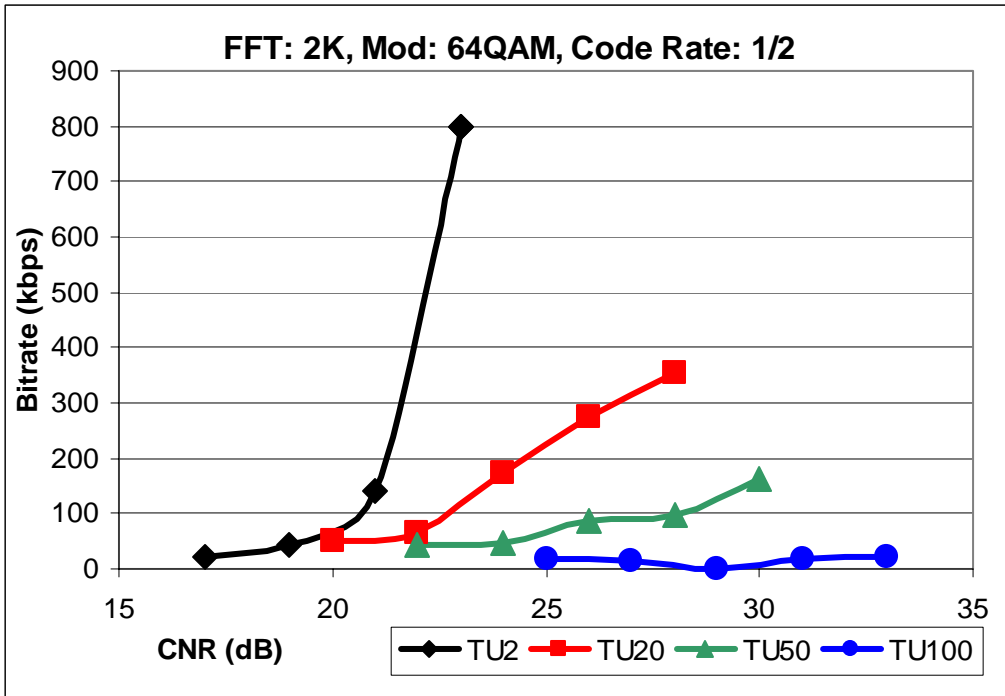
Παρόλο που από τα παραπάνω τρισδιάστατα γραφήματα μπορούμε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα, δεν είναι δυνατόν να τα παραθέσουμε με τρόπο που να έχουμε άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς του δικτύου για τους διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων,

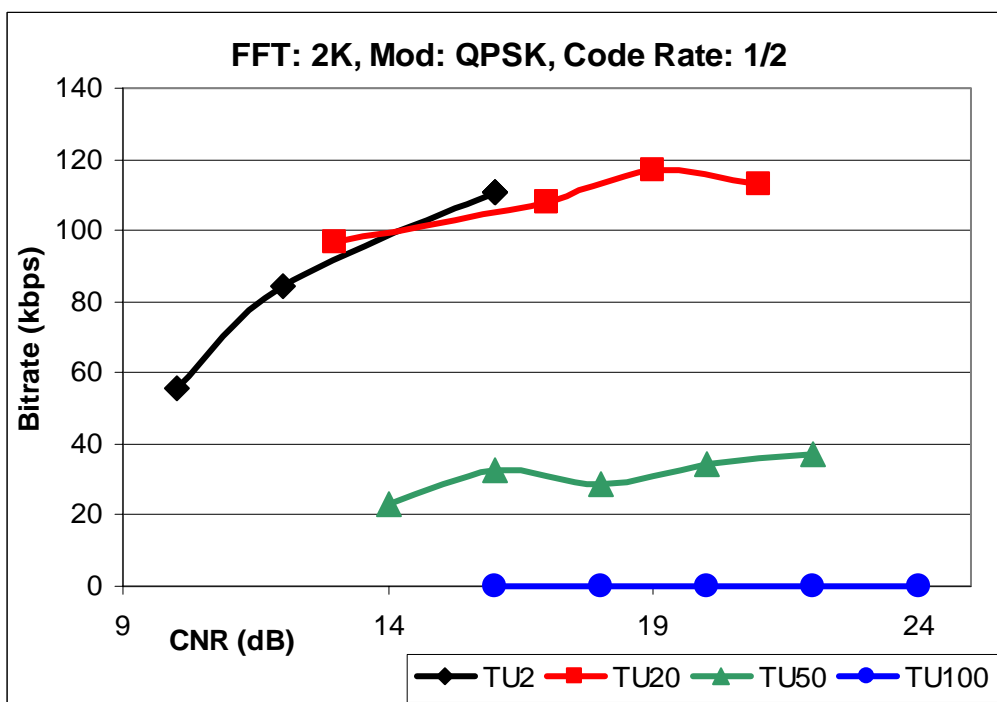
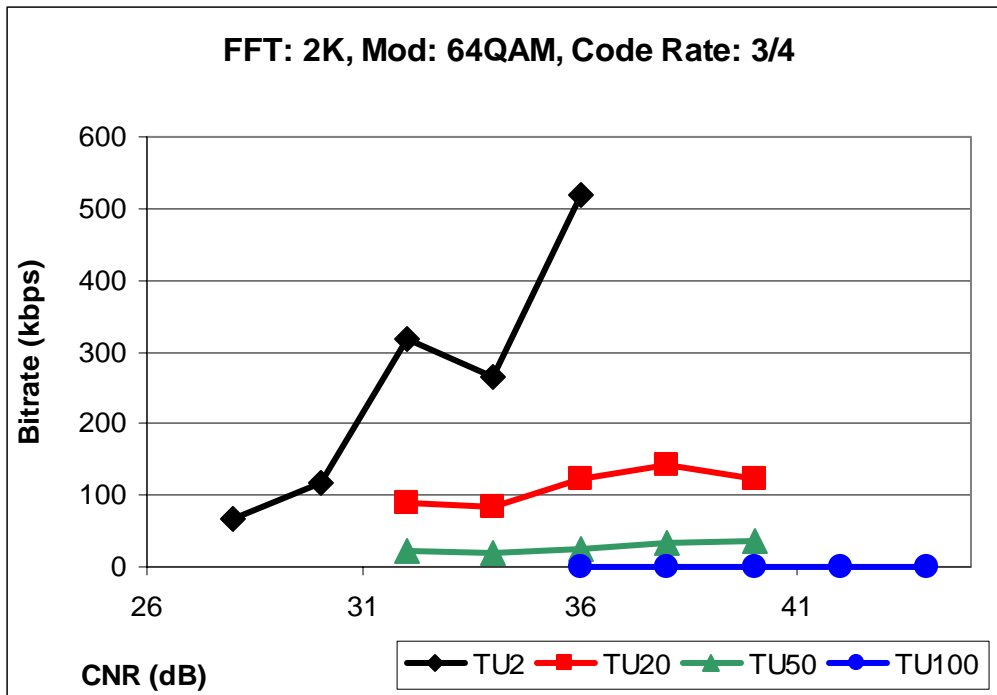
έτσι, κρίνεται σκόπιμο για μια πιο καλή άποψη, να εξετάσουμε τα δεδομένα σε διαγράμματα δύο διαστάσεων. Αυτά ακολουθούν στη συνέχεια:

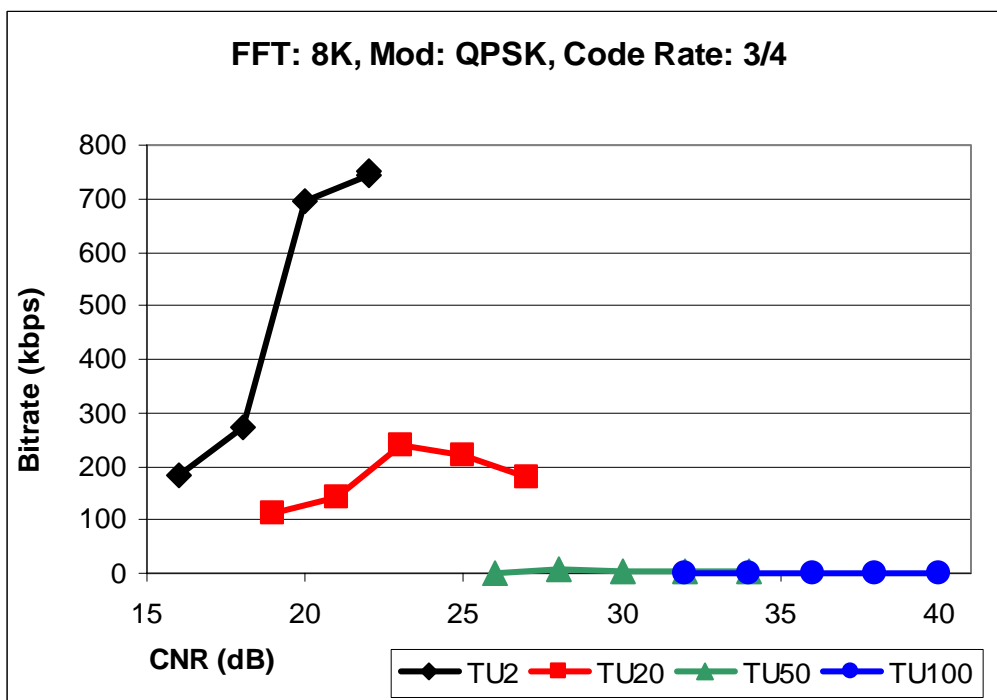
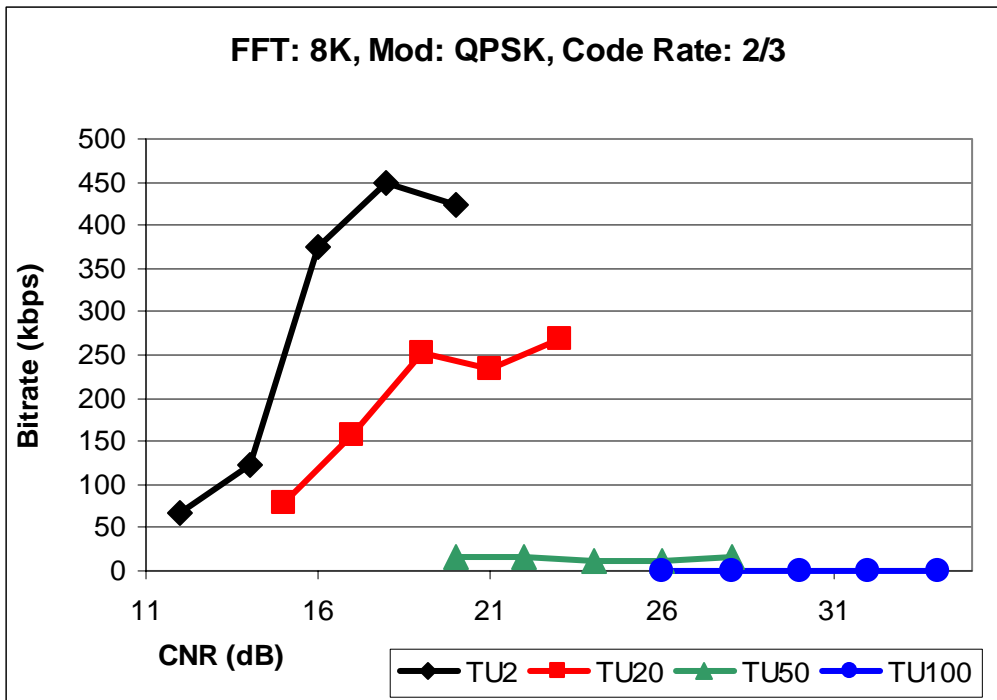


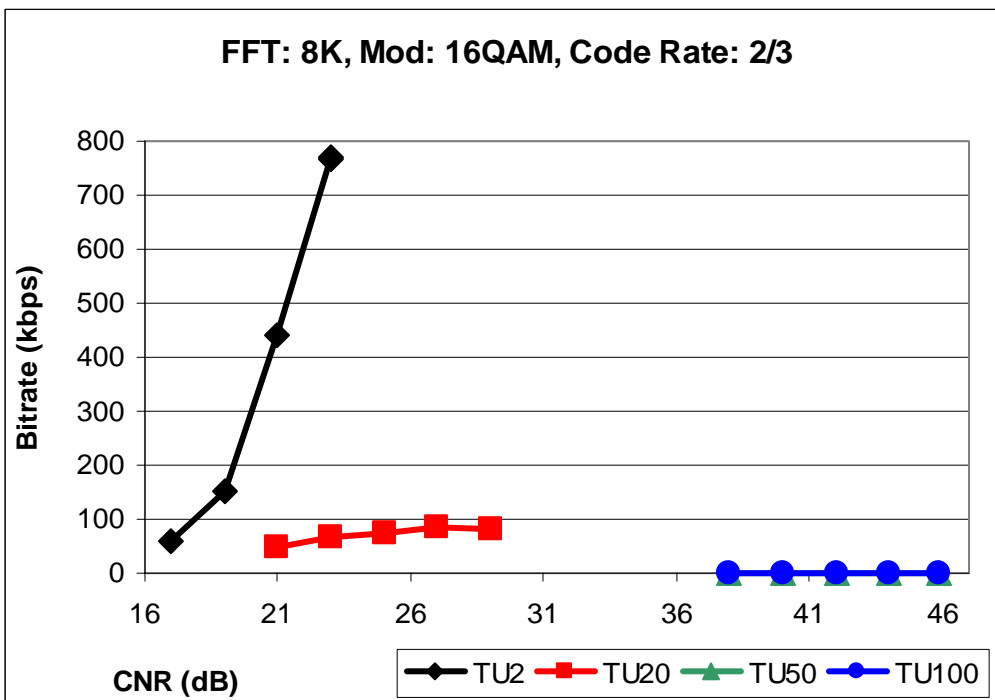
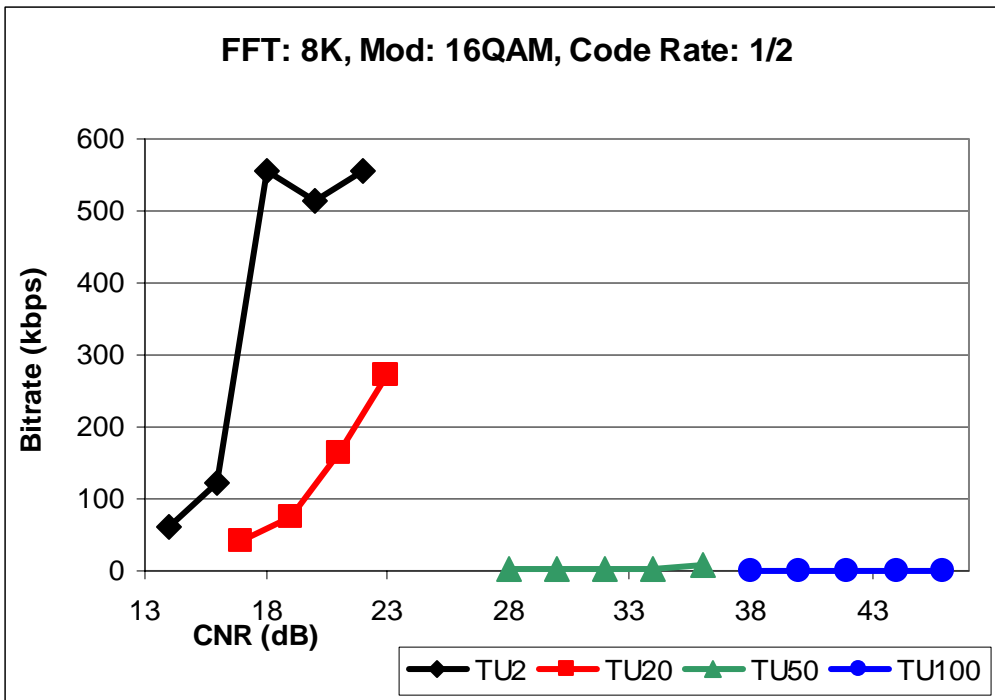


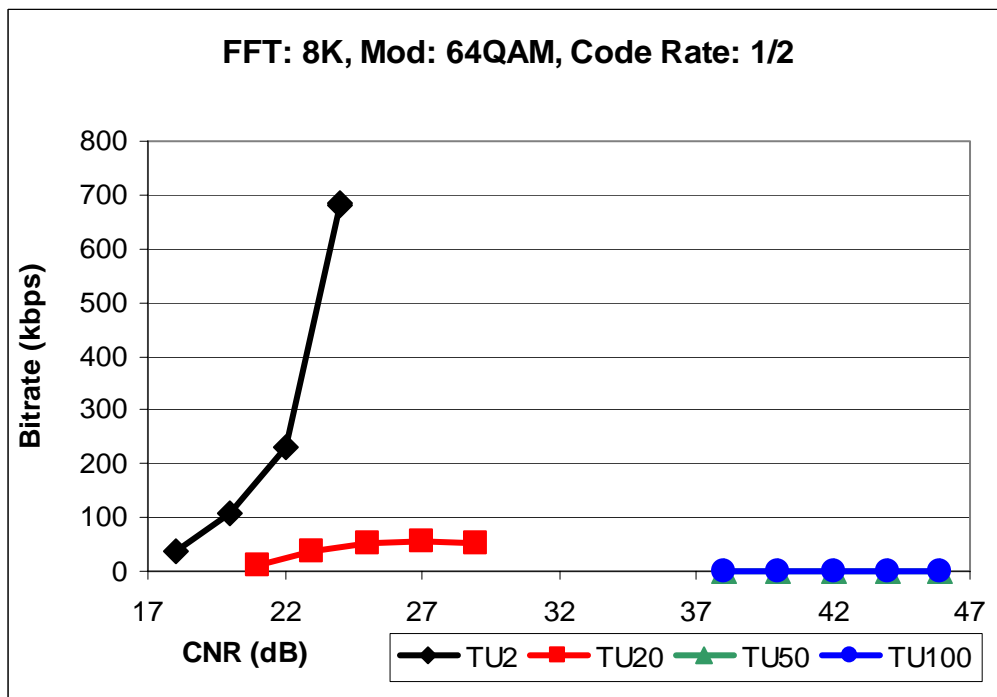
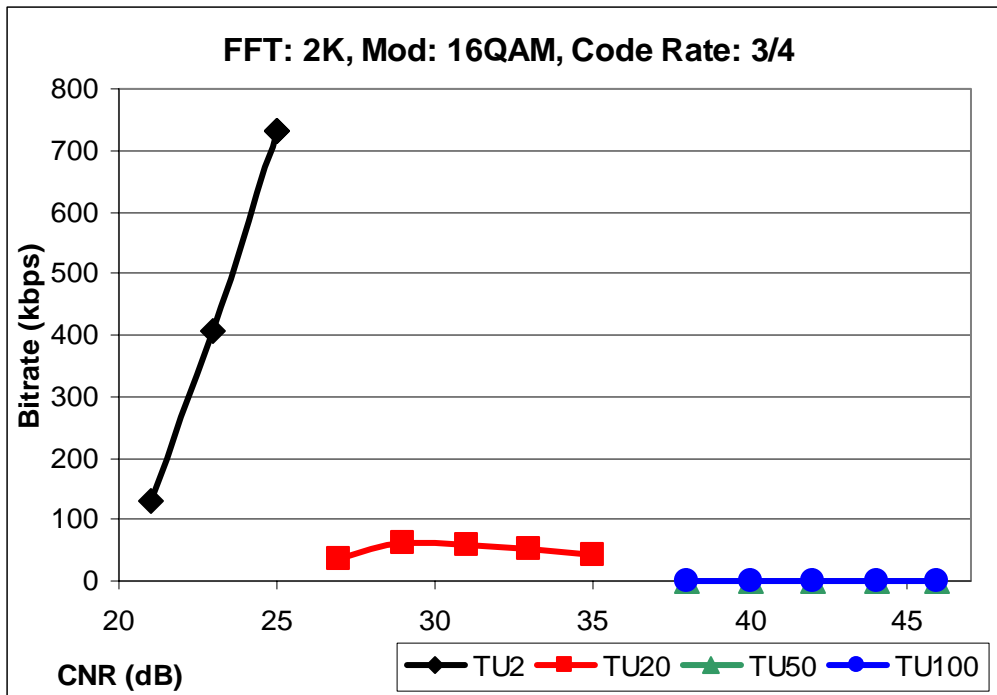


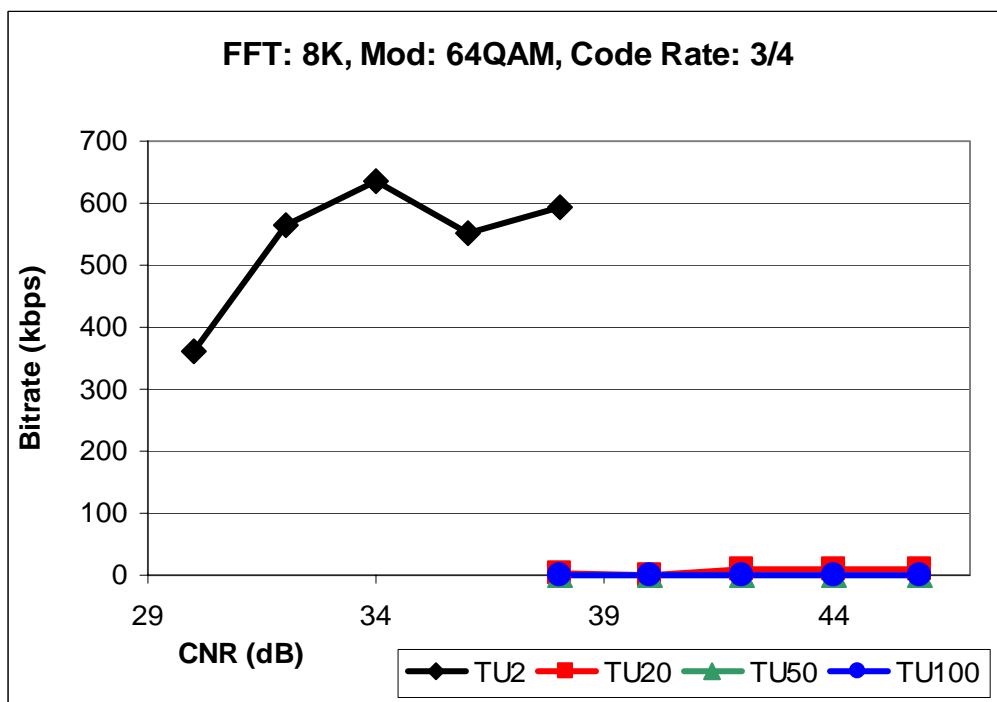
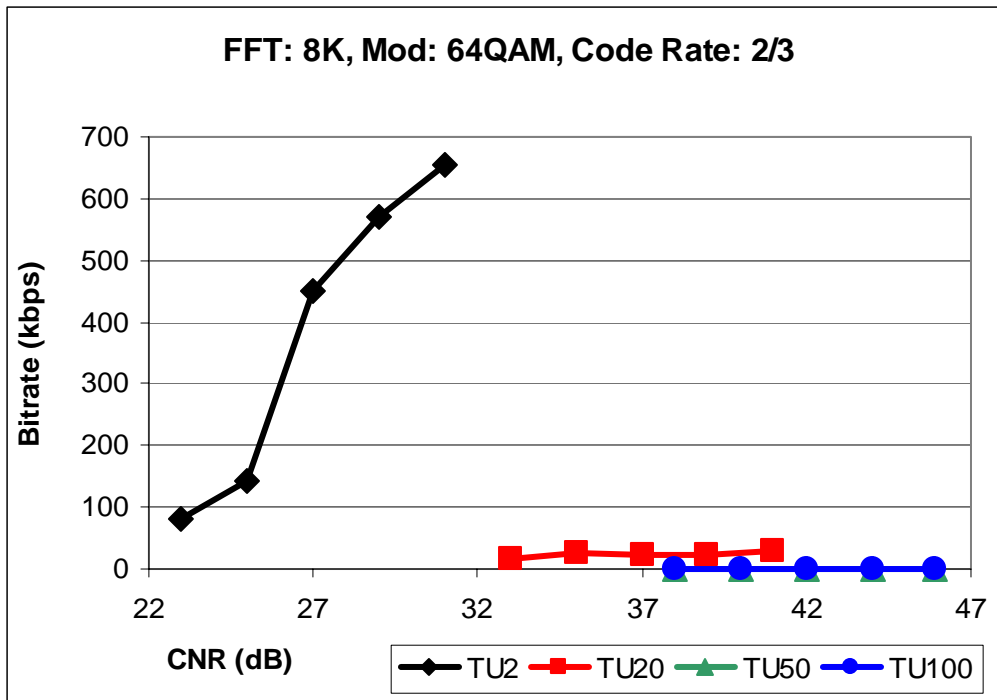










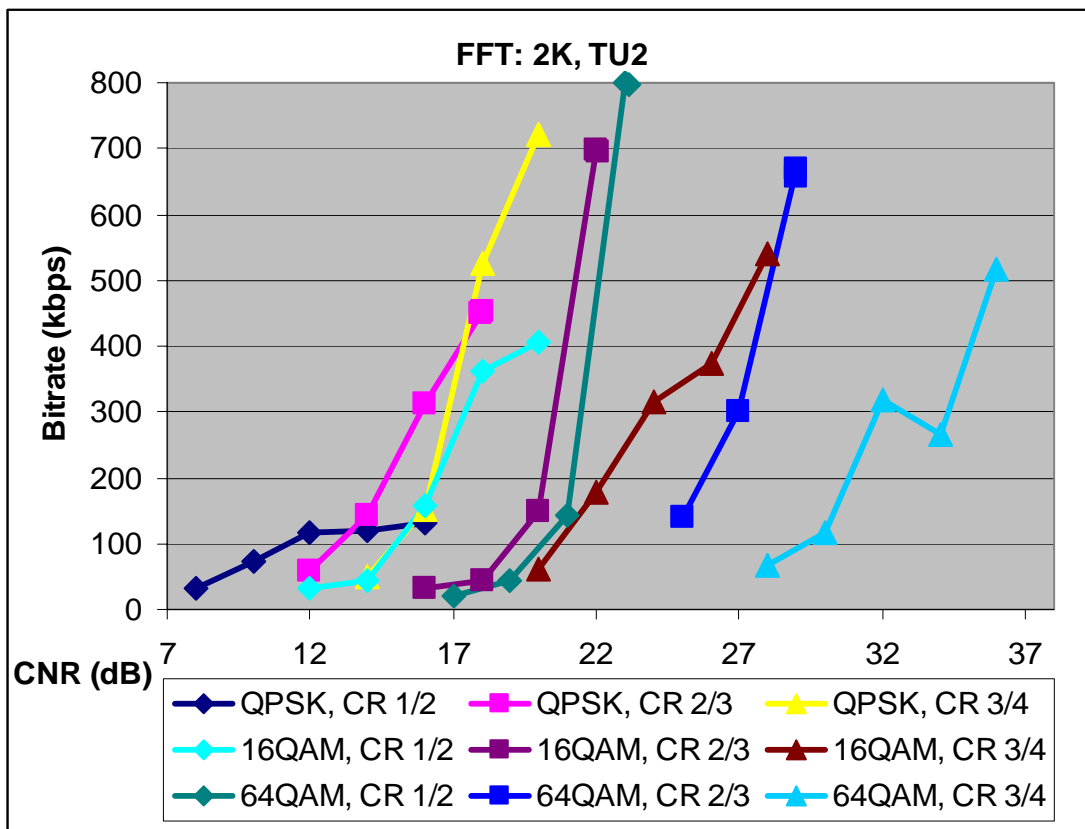


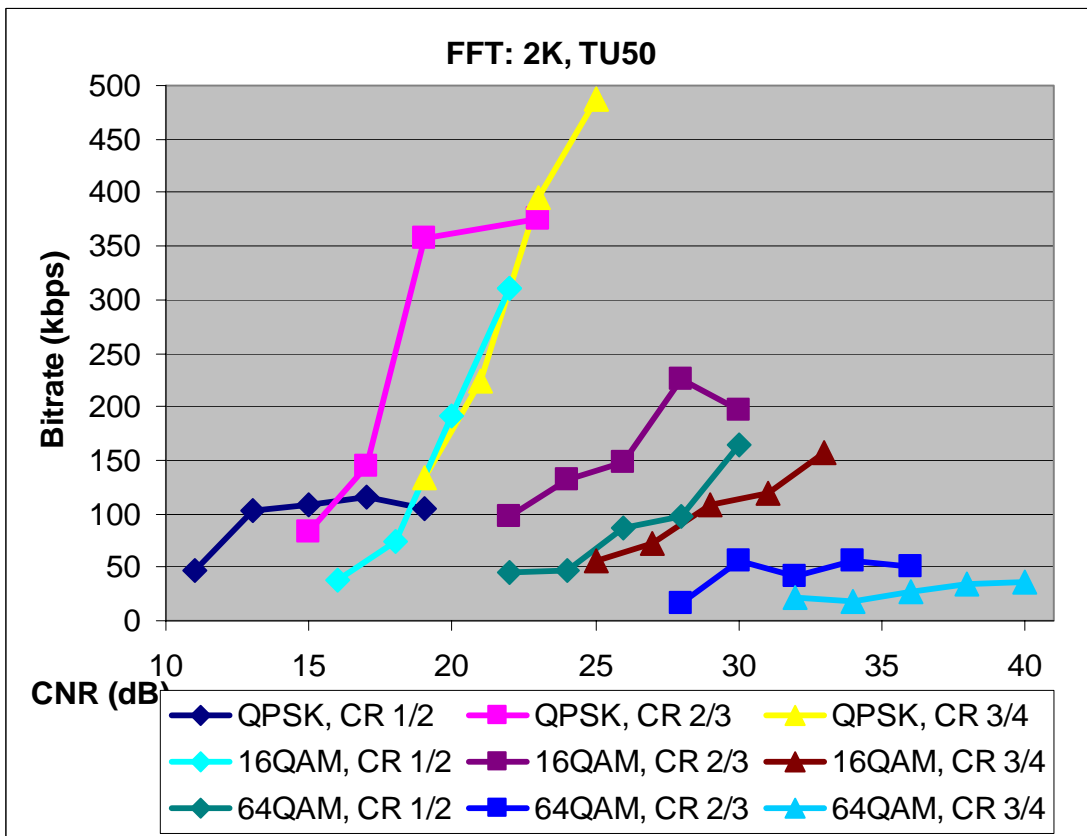
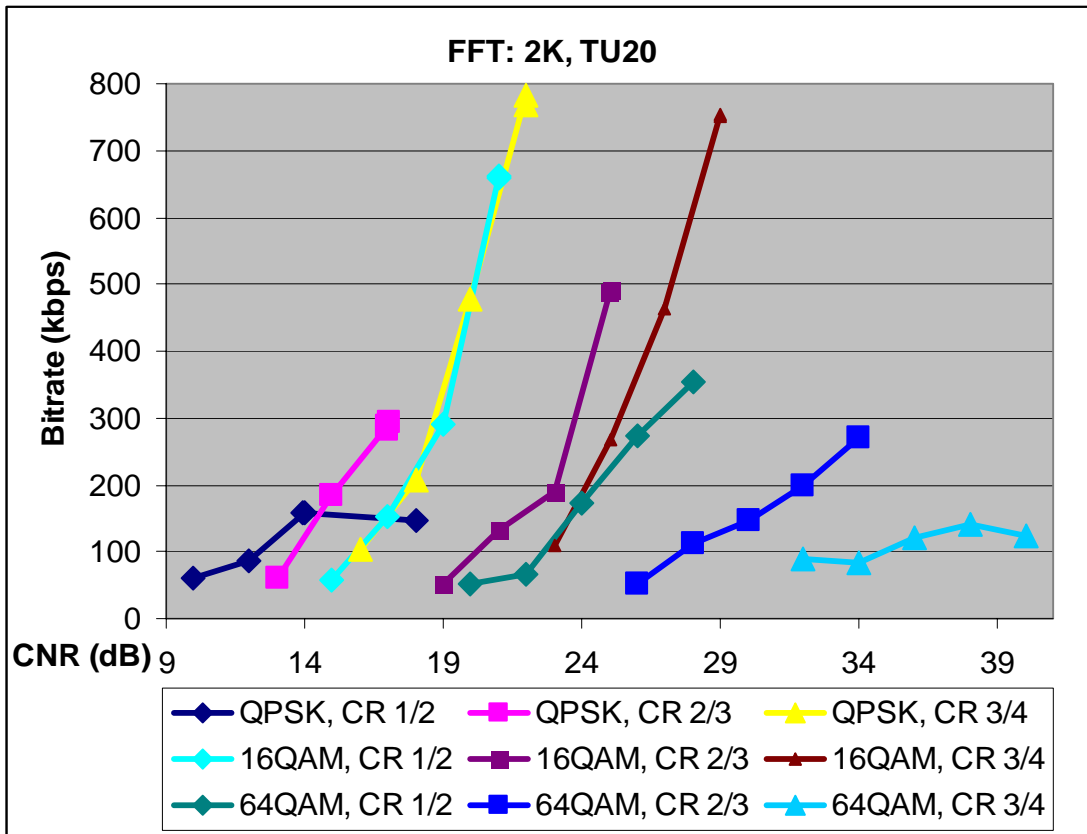
Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε ότι για κάθε συνδυασμό των FFT, σχήματος διαμόρφωσης και Code Rate το throughput υφίσταται δραματικές αλλαγές με τη μεταβολή της ταχύτητας κίνησης του δέκτη καθώς επίσης και του

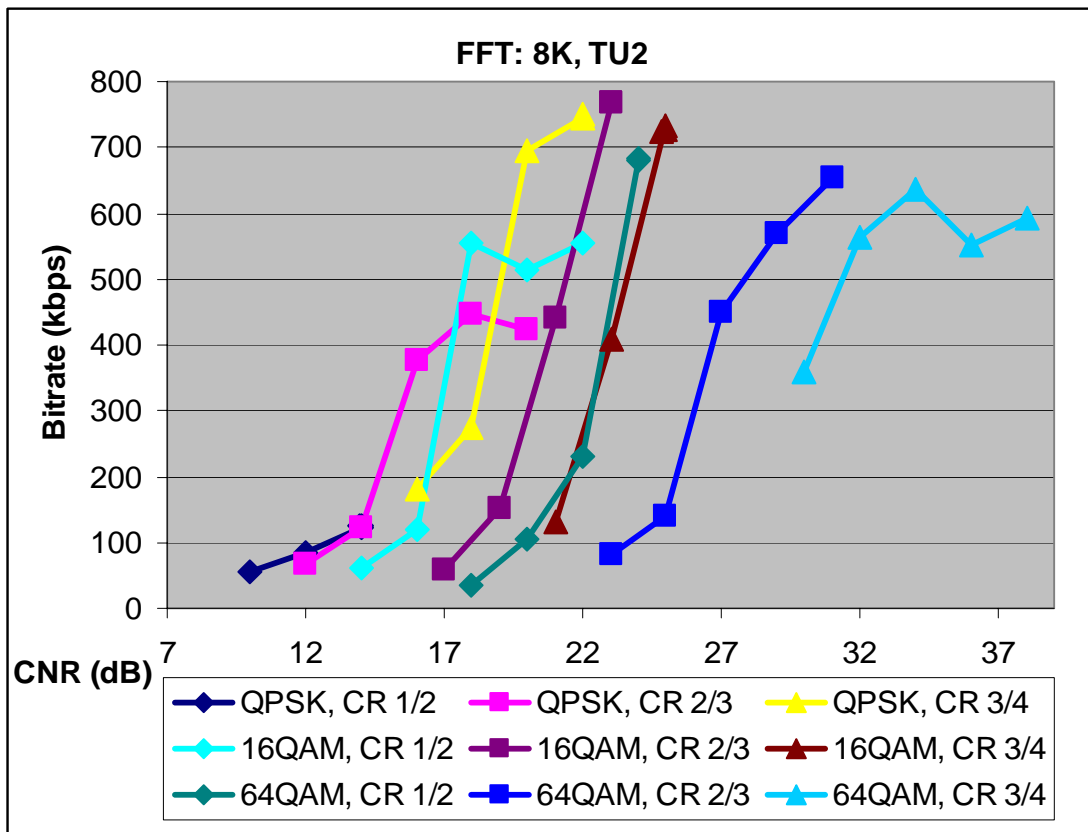
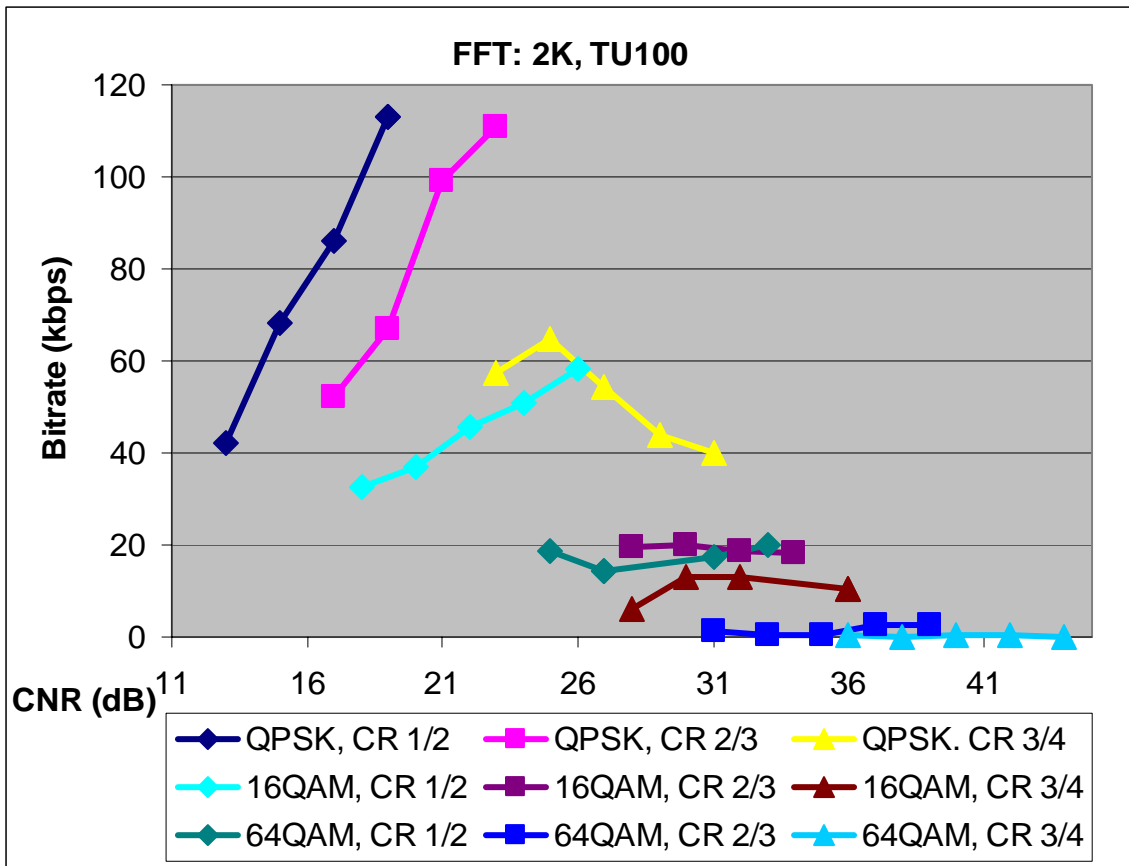
λαμβανόμενου CNR. Συγκεκριμένα, αύξηση της ταχύτητας συνιστά μεγάλη ελάττωση του bitrate ενώ αντίθετα, αύξηση στον CNR έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του bitrate. Η αναλογία μεταβολής παρατηρούμε ότι αλλάζει ανάλογα με το FFT mode, το είδος διαμόρφωσης και το Code Rate παρόλα αυτά, υπάρχει ο γενικός κανόνας ότι το throughput είναι ανάλογο με το λαμβανόμενο CNR και αντιστρόφως ανάλογο με την ταχύτητα του κινητού, κάτι που άλλωστε ήταν αναμενόμενο, αφού με την αύξηση της ταχύτητας το περιβάλλον των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων που εμφανίζει ο δίαυλος μετάδοσης συνεχώς επιδεινώνεται με τις διαλείψεις να αυξάνουν σε αριθμό αλλά και σε βάθος.

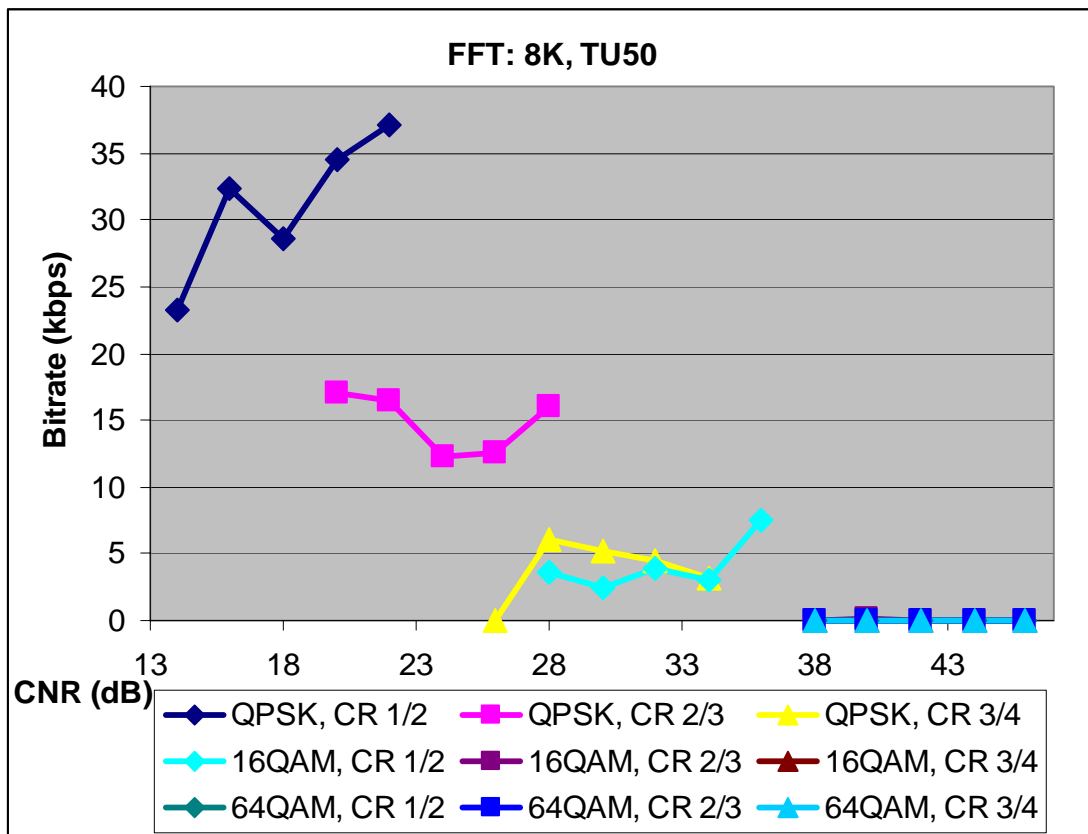
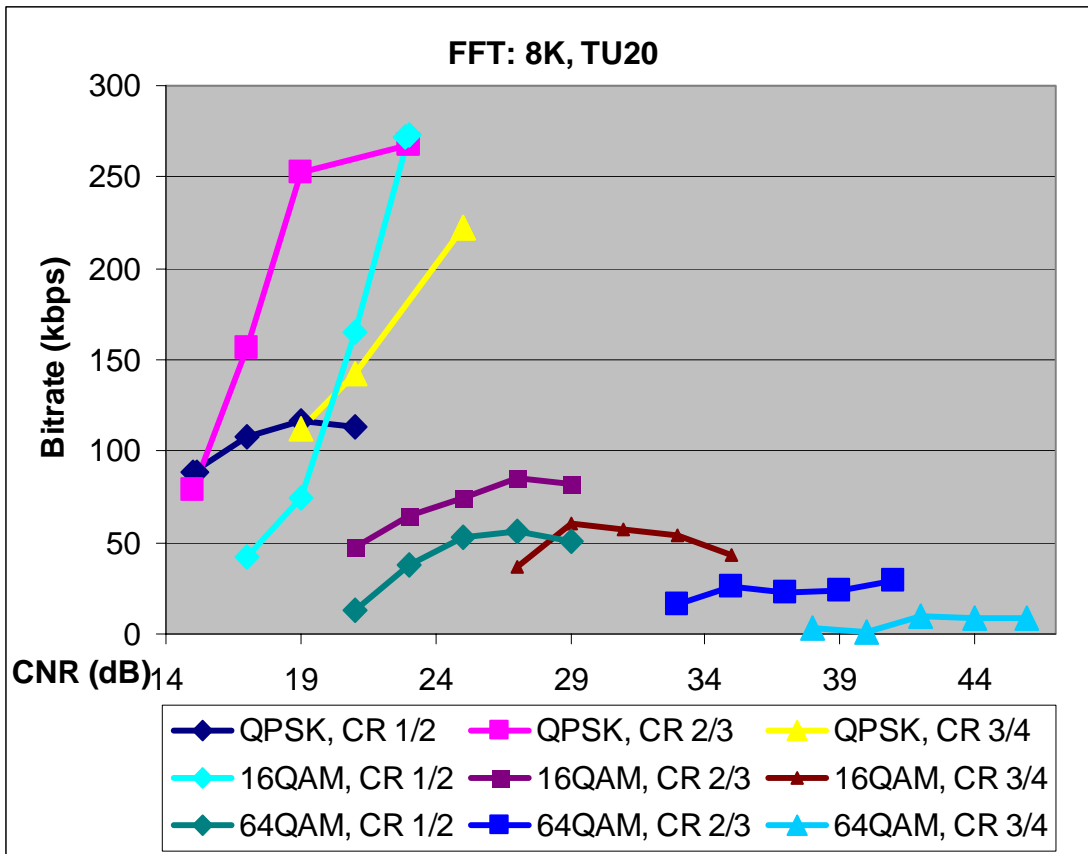
9.4.2.2 Ομάδα διαγραμμάτων 2 - Η συμπεριφορά του throughput συναρτήσει της διαμόρφωσης, του Code Rate και του FFT mode.

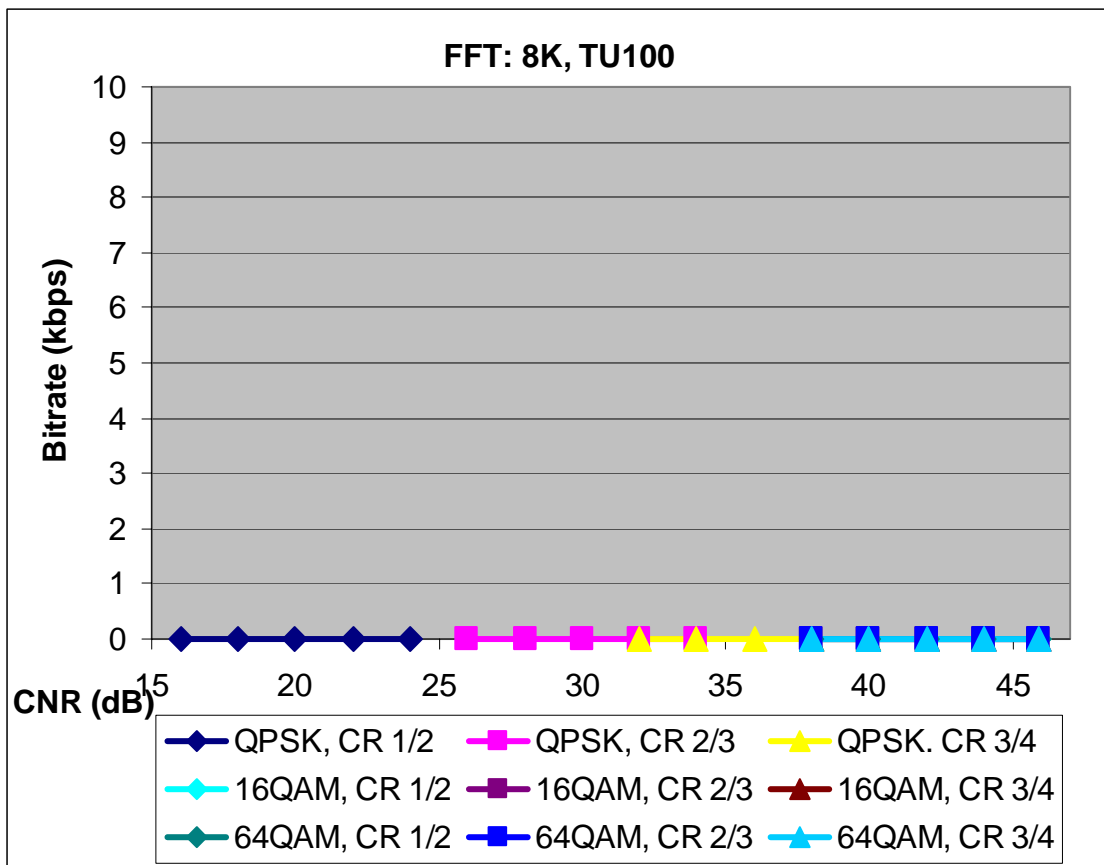
Για να φανεί καλύτερα η συμπεριφορά του throughput του δικτύου και ως προς τις υπόλοιπες παραμέτρους κατασκευάστηκαν τα ακόλουθα διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από τις ίδιες τιμές των Πινάκων Τελικών Μετρήσεων I και II:











Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι για μικρές ταχύτητες του κινούμενου δέκτη και του Code Rate η 64QAM διαμόρφωση δίνει καλύτερες τιμές του throughput αν και έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε CNR. Για μικρές ταχύτητες βλέπουμε επίσης, ότι η αύξηση του Code Rate ενώ έχει θετικά αποτελέσματα ως προς το throughput για διαμόρφωση QPSK, για 16QAM δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή, ενώ αντίθετα, για 64QAM σημειώνεται πτώση του throughput. Σε μεγάλες ταχύτητες, η πτώση του throughput με την αύξηση του Code Rate αποτελεί κανόνα για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης, ενώ επίσης παρατηρείται ότι η QPSK δίνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν και για τις δύο περιπτώσεις FFT της COFDM, 2K και 8K. Τι συμβαίνει όμως σε άμεση σύγκριση των δύο αυτών τιμών της παραμέτρου FFT;

Αν συγκρίνουμε τα παραπάνω διαγράμματα θα δούμε ότι η τιμή των 2K υπερτερεί κατά κράτος αυτής των 8K η οποία σε υψηλές ταχύτητες δεν καταφέρνει καν να εξασφαλίσει σύνδεση μεταξύ του πελάτη και του εξυπηρετητή, σε αντίθεση με την περίπτωση της 2K

που εξασφαλίζει στις περισσότερες περιπτώσεις όχι μόνο σύνδεση αλλά και ικανοποιητικά επίπεδα στο bitrate αυτής. Γεγονός είναι ότι στο 2K mode το διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών φερόντων στο σχήμα OFDM είναι μεγαλύτερη, οπότε είναι αυξημένη και η ανοχή του δέκτη στην ολίσθηση Doppler.

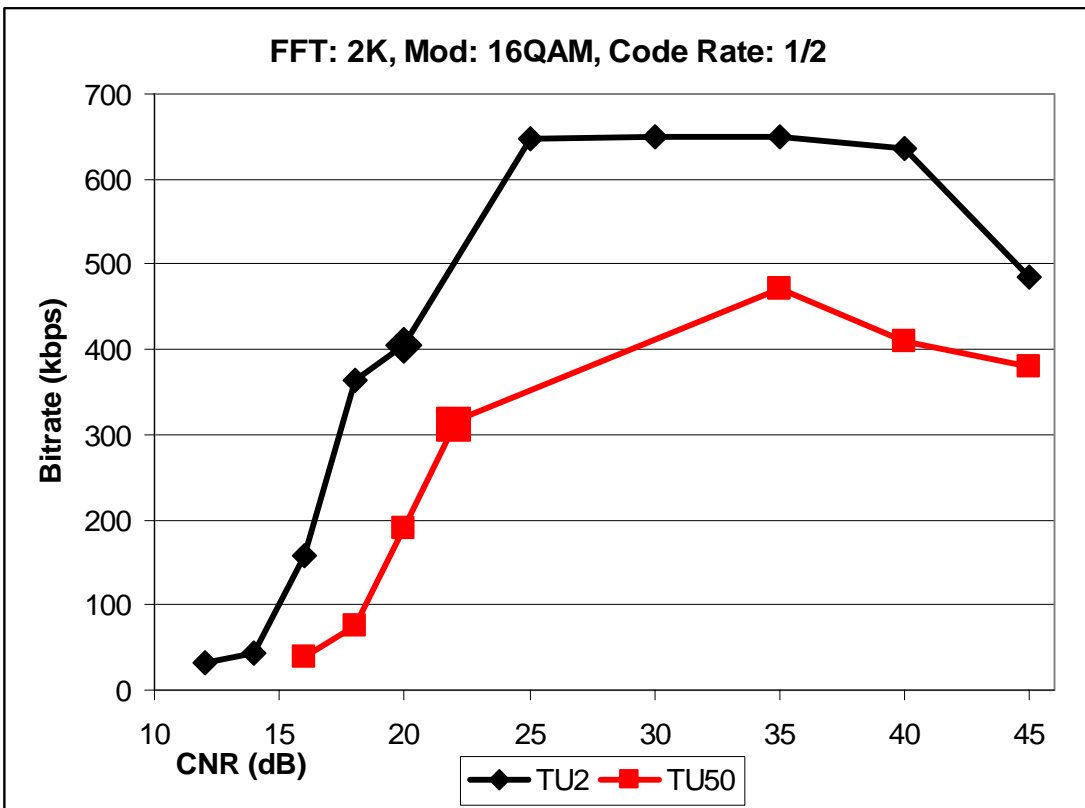
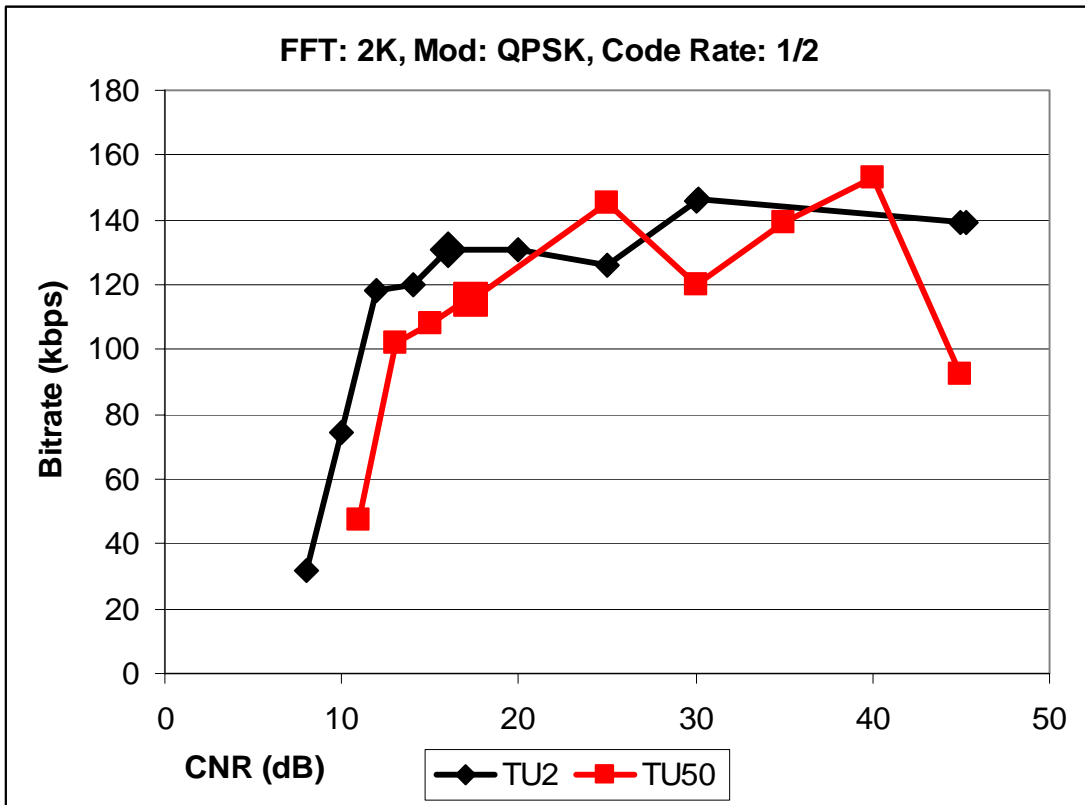
9.5 Μελέτη της συμπεριφοράς του throughput για μεγαλύτερες τιμές του CNR

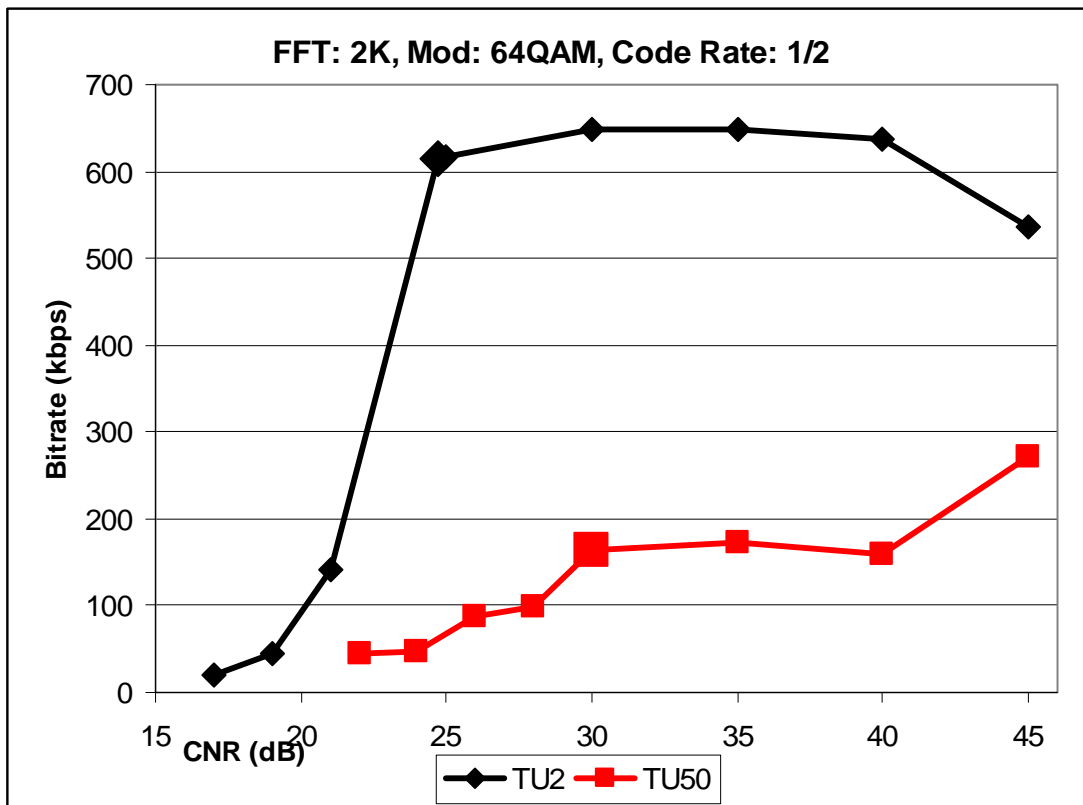
Η αμέσως επόμενη απορία που σχηματίζεται είναι, αν με αύξηση του CNR για τιμές πάνω από το κατώφλι του post Viterbi BER τάξεως 10^{-7} θα βλέπαμε κάποια περαιτέρω αύξηση στο throughput όπως συμβαίνει για τιμές κάτω από αυτό το κατώφλι που ορίσαμε στην αρχή των μετρήσεων. Κάτι τέτοιο ξεφεύγει από τα πλαίσια των αρχικών μετρήσεων, παρόλα αυτά, εμείς πήραμε ενδεικτικά ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο μετρήσεων για να εξετάσουμε και αυτή την περίπτωση. Έτσι, για FFT mode 2K και Code Rate 1/2 πήραμε κάποιες επιπλέον μετρήσεις και για τα τρία σχήματα διαμόρφωσης (QPSK, 16QAM, 64QAM) για ταχύτητα δέκτη 2 και 50 km/h αυξάνοντας το λαμβανόμενο CNR ανά βήματα των 5dB μέχρι το ανώτατο όριο του μηχανήματος Test Transmitter SFQ B10 της Rohde & Schwarz το οποίο ήταν 45.9dB, και μαζί με τις αρχικές μετρήσεις για τις αντίστοιχες τιμές των καθορισμένων παραμέτρων, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας:

FFT Mode : 2K						
Code Rate : 1/2						
TU	QPSK		16QAM		64QAM	
	CNR	Bitrate	CNR	Bitrate	CNR	Bitrate
2	45	139	45	486	45	536
	40	103	40	637	40	638
	35	85,1	35	649	35	649
	30	146	30	649	30	649
	25	126	25	648	25	618,0
	20	131	20	406,0	23	800,0
	16	131	18	363,0	21	142,0
	14	120	16	157,0	19	44,0
	12	118	14	44,6	17	20,6
	10	74,4	12	32,2		
	8	31,8				
50	45	92,5	45	379	45	272
	40	153	40	409	40	159
	35	139	35	472	35	173
	30	120	30	647	30	164,0
	25	145	24	248,0	28	97,7
	19	104	22	311,0	26	87,4
	17	115	20	191,0	24	47,5
	15	108	18	74,6	22	44,7
	13	102	16	38,0		
	11	47,3				

Πίνακας 9.5.1 Throughput για μεγαλύτερες τιμές CNR

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα αυτού, κατασκευάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα:





Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σε γενικές γραμμές το throughput του δικτύου δεν υπόκειται σε μεγάλες μεταβολές με την αύξηση του λαμβανόμενου CNR αλλά τείνει να σταθεροποιηθεί παίρνοντας τιμές σε ένα διάστημα γύρω από αυτήν του κατώφλιου που ορίσαμε στην αρχή των κύριων μετρήσεων, γεγονός που δικαιώνει την επιλογή μας αυτή.

Το κατώφλι όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, αντιπροσωπεύει την τιμή του CNR για την οποία ο δέκτης PT5765 της UBS δίνει post Viterbi BER της τάξης 10^{-7} . Η τιμή αυτή έχει τονιστεί στα προηγούμενα διαγράμματα για να είναι εμφανής.

Σε μερικές περιπτώσεις όπου η ταχύτητα του δέκτη είναι μικρή, με την αύξηση του CNR, παρατηρείται αύξηση και του bitrate, γεγονός το οποίο ακολουθεί τη λογική και ήταν αναμενόμενο εφόσον αυξάνεται η ισχύς του σήματος. Παρόλα αυτά, η αύξηση του bitrate είναι μικρή και σημειώνεται για μεγάλη αύξηση του CNR. Αντίθετα, για μικρές ελαττώσεις του CNR κάτω από το ορισμένο κατώφλι έχουν ως συνέπεια μεγάλη μείωση του bitrate, κάτι που και πάλι δικαιώνει την επιλογή αυτού του κατώφλιου.

Όλα τα παραπάνω ίσως με μία πρώτη σκέψη να φαίνονται άτοπα και αντίθετα με τη λογική η οποία επιτάσσει τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου με την αύξηση της ισχύος του σήματος σε σχέση με αυτή του θορύβου. Έτσι, η παραπάνω συμπεριφορά του throughput θα πρέπει να οφείλεται στο γεγονός ότι κάποιος άλλος παράγοντας με αρνητική συμβολή υπερισχύει της θετικής του CNR. Πράγματι, αυτός ο παράγοντας δεν είναι άλλος από τις διαλείψεις των οποίων η επιρροή είναι μεγαλύτερη από αυτή του CNR με αποτέλεσμα ακόμα και για μεγάλες τιμές του τελευταίου να μην μπορεί να σημειωθεί αύξηση στο bitrate της σύνδεσης. Κάτι τέτοιο έχει ήδη φανεί από τα πρώτα διαγράμματα των κύριων μετρήσεων στα οποία έχει παρατηρηθεί ο περιορισμός (και σε μερικές περιπτώσεις ο μηδενισμός) του bitrate για μεγάλες ταχύτητες του κινητού δέκτη παρά τις μεγάλες τιμές του λαμβανόμενου CNR.

10. Επίλογος – Συμπεράσματα – Περαιτέρω έρευνα

Σε μια γρήγορα μεταβαλλόμενη αγορά που απαιτεί απλή και φθηνή πρόσβαση σε αμφίδρομες πολυμεσικές υπηρεσίες μεγάλων ρυθμών μετάδοσης, η συνεργασία του τομέα των τηλεπικοινωνιών με αυτόν της ψηφιακής μετάδοσης δείχνει ότι μπορεί να προσφέρει προσιτές και αποδοτικές λύσεις. Ήδη, διεθνείς τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί όπως το UMTS forum εξετάζουν σοβαρά το ενδεχόμενο σύγκλισης των προσωπικών τηλεπικοινωνιών τρίτης γενιάς με τις σύγχρονες πλατφόρμες ψηφιακής τηλεόρασης. Τη στιγμή μάλιστα που το ψηφιακό κανάλι αποτελεί τον σίγουρο διάδοχο των τηλεοπτικών αναλογικών συστημάτων, έστω και υπό έναν ασαφή χρονικό ορίζοντα, οι ταχείες υπηρεσίες δεδομένων θα είναι αναπόσπαστο στοιχείο της τηλεόρασης του μέλλοντος.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα αμφίδρομο δίκτυο δεδομένων και επίγειας ψηφιακής τηλεοπτικής εκπομπής για κινητούς χρήστες, βασισμένο στο τηλεοπτικό πρότυπο DVB-T σε συνδυασμό με το τηλεπικοινωνιακό σύστημα GPRS ως υλοποίηση καναλιού επιστροφής. Αναλύθηκε η αρχιτεκτονική του δικτύου αυτού, τα στοιχεία που το συνθέτουν καθώς επίσης και οι παράγοντες που δυσχεραίνουν την αποδοτικότητά του. Μετρήθηκαν οι επιδόσεις του ως προς συγκεκριμένες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοσή του με παρουσίαση και επεξήγηση των επιρροών της κάθε μιας. Μαζί με κάποιες επιπλέον μετρήσεις εκτός των πλαισίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε η προσπάθεια να απεικονιστεί ποιοτικά η συμπεριφορά του δικτύου πέρα από την απόλυτη ποσοτική αντιμετώπιση των κυρίως μετρήσεων.

Όλα δείχνουν ότι τέτοιου τύπου ασύμμετρα δίκτυα, σαν αυτό που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, θα τύχουν ευρείας αποδοχής και εμπορικής εφαρμογής όταν τα σύγχρονα συστήματα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης αντικαταστήσουν στα προσεχή χρόνια τα υπάρχοντα αναλογικά. Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να επεκταθεί η μελέτη ώστε να ανακαλυφθούν περαιτέρω παράμετροι που να βελτιώνουν την απόδοση των συστημάτων αυτών, προς όφελος πάντα του κοινωνικού συνόλου. Έτσι, για παράδειγμα θα προτεινόταν περαιτέρω μελέτη με μετρήσεις υπό κανονικές συνθήκες ασύρματης εκπομπής, η υλοποίηση και η μελέτη δικτύου παροχής υπηρεσιών σε περισσότερους του ενός χρήστες καθώς και η μελέτη με μετρήσεις για διάφορες υπηρεσίες δεδομένων.

11. Βιβλιογραφία

1. G. Xilouris, G. Gardikis, E. Pallis, A. Kourtis **"Reverse Path Technologies in Interactive DVB-T Broadcasting"**, accepted for presentation in IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Thessaloniki, Greece, June 2001
2. The DVB forum, **"Digital Television over DVB standards"**, October 2000, electronically available at www.dvb.org
3. ETS 300 744: **"Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for Digital Terrestrial Television (DVB-T)"**, ETSI, 1997
4. Stott, J.H., **"The how and why of COFDM"**, EBU Technical Review, Winter 1998
5. Application Note: **"Fading Channel Simulation in DVB"**, Rohde & Schwarz Broadcasting Division, February 2001
6. Arauz, J., **"Discrete Rayleigh Channel Modelling"**, Tutorial, University of Pittsburgh, March 2002
7. ETS 300 802: **"Digital Video Broadcasting (DVB); Network-independent protocols for DVB interactive services"**, ETSI November 1997
8. ETS 300 801: **"Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel through Public Switched Telecommunications Network (PSTN) / Integrated Services Digital Networks (ISDN)"**, ETSI 1997
9. **"Description of Windows 2000 TCP Features"**, Microsoft Corporation, March 1999
10. **"TCP Extensions for High Performance (RFC 1323)"**, V. Jacobson, R. Braden, D. Borman, Cray Research, May 1992

11. W. Richard Stevens, **"TCP/IP Illustrated, Volume 1 - The protocols"**, Addison Wesley, ISBN: 0-201-63346-9
12. **"Dummynet"**, Luigi Rizzo, http://info.iet.unipi.it/~luigi/ip_dummynet/
13. **"Iperf User Docs"**, Mark Gates, Ajay Tirumala, Jon Dugan, Kevin Gibbs, March 2003
14. NLANR/DAST Iperf 1.7.0: **The TCP/UDP Bandwidth Measurement Tool**,
<http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>