



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ευρυζωνικές τεχνολογίες πρόσβασης - Η τεχνολογία G.FAST

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαηλίδου Σοφία – Άννα

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ευρωζωνικές τεχνολογίες πρόσβασης - Η τεχνολογία G.FAST

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχαηλίδου Σοφία – Άννα

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου 2019.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....

Μιχαηλίδου Σοφία Άννα

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

Copyright © Σοφία Άννα Μιχαηλίδου, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Κωπτή γιατί μου έδειξε πόσο συναρπαστικός είναι ο τομέας των τηλεπικοινωνιών και με βοήθησε να μάθω να σκέφτομαι, να διαβάζω και εκφράζομαι ως μηχανικός. Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Παναγιώτη Δήμο, χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του οποίου η διπλωματική αυτή δεν θα ήταν η ίδια. Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και τους φίλους μου που ήταν και είναι δίπλα μου σε κάθε μου βήμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αξιοποιώντας το υπάρχον δίκτυο χαλκού, τα διάφορα είδη ψηφιακής συνδρομητικής τεχνολογίας (xDSL) παρέχουν τη δυνατότητα για ταχεία, αξιόπιστη και οικονομική πρόσβαση στο διαδίκτυο. Με την ανάπτυξη των δικτύων πρόσβασης επόμενης γενιάς αντικαθίστανται σταδιακά τμήματα του δικτύου χαλκού από οπτικές ίνες και, ως αποτέλεσμα, μειώνεται η απόσταση στην οποία χρησιμοποιείται ο χαλκός ως μέσο μετάδοσης του σήματος. Κατά συνέπεια, μετριάζονται οι παράγοντες που υποβαθμίζουν την ποιότητα και τη μετάδοση του σήματος που οφείλονται στην επιλογή του χαλκού ως μέσο μετάδοσης.

Το πρότυπο του G.fast αποτελεί την πλέον πρόσφατη τεχνολογία DSL για την παροχή υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων στους συνδρομητές πάνω από το υπάρχον δίκτυο χαλκού. Η έγχυση της ισχύος γίνεται ακόμα εγγύτερα προς τις εγκαταστάσεις των συνδρομητών (Fiber To The Distribution Point) ενώ εξακολουθεί να αξιοποιείται ένα σημαντικό τμήμα του δικτύου χαλκού. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται ένας εξαιρετικός συμβιβασμός καθώς αυξάνεται σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με τις υπάρχουσες DSL τεχνολογίες και ταυτόχρονα αποφεύγονται οι δυσκολίες που συνεπάγεται η ανάπτυξη ενός δικτύου αποτελούμενου εξ ολοκλήρου από οπτικές ίνες.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι διττός. Παρέχεται στους αναγνώστες μία ολοκληρωμένη και αναλυτική παρουσίαση των διαφόρων DSL τεχνολογιών ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται σε βάθος η τεχνολογία G.fast ως προς την αρχιτεκτονική, τον τρόπο λειτουργίας καθώς επίσης και τα σενάρια συνύπαρξης με παλαιότερες τεχνολογίες και, επιπλέον, εξετάζονται μέσω μετρήσεων οι επιδόσεις της σε διάφορα σενάρια.

Στο Κεφ.1 γίνεται εισαγωγή στις βασικές τηλεπικοινωνιακές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Στο Κεφ.2 γίνεται μία ολοκληρωμένη παρουσίαση των διαφόρων DSL τεχνολογιών, ενώ στο Κεφ.3 εξηγείται αναλυτικά η τεχνολογία G.fast. Στο Κεφ.4 περιγράφονται οι κυριότερες λειτουργίες του G.fast βάσει του προτύπου της ITU-T, ενώ στο Κεφ.5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των επιδόσεων της τεχνολογίας σε ποικίλα σενάρια, συμπεριλαμβανομένου του σεναρίου συνύπαρξης με παλαιότερες τεχνολογίες. Τέλος, το Κεφ.6 αποτελεί ένα παράρτημα το οποίο παρέχει στον αναγνώστη μία συνοπτική παρουσίαση των γενεών κινητών επικοινωνιών (1G-5G) με σκοπό να διερευνήσει την δυνατότητα χρήσης του G.fast ως backhaul λύση στα αναπτυσσόμενα 5G δίκτυα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

G.fast, ψηφιακή γραμμή συνδρομητή, ίνα μέχρι το σημείο διανομής, δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς, vectoring, 4GBB, 5G backhauling, τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης, ευρυζωνικότητα

ABSTRACT

By taking advantage of the existing copper network, DSL technologies provide to the subscribers high speed, cheap and reliable access to the Internet. Thanks to the evolution of the Next Generation Access Networks, parts of the copper network are gradually being replaced by optical fibers and, as a result, the length of the copper loop is reduced accordingly. Consequently, the factors that are responsible for the degradation of the quality and the transmission of the signal (due to the use of copper wires) are mitigated.

G.fast is the most recent DSL technology developed for providing high speed services to the subscribers over the existing copper network. The power injection is taking place even closer to the subscribers' premises (Fiber To The Distribution Point) and at the same time a significant part of the copper network is still being used. As a result, a great compromise is achieved, not only because the transmission rate is significantly higher compared to legacy DSL technologies, but also because the difficulties from deploying an exclusively optical network are avoided.

The purpose of this thesis is double. Readers are provided with a complete and detailed presentation of DSL technologies, while at the same time, they are not only provided with a thorough presentation of G.fast concerning its architecture, the way it all works and the co-existence scenarios with legacy DSL technologies, but also with the results of multiple performance tests executed in various scenarios.

In Ch.1 the basic telecommunication terms used in this thesis are introduced. In Ch.2 the DSL technologies are presented, while Ch.3 the G. fast technology is explained in detail. In Ch.4 the principal functions of G. fast according to the ITU-T recommendation are described and in Ch.5 the results of the various performance tests executed are displayed. Ch.6 is an appendix in which a brief presentation of the first 5 generations of mobile telecommunication technologies is done, aiming at exploring the possibility of using G. fast as a backhaul solution in 5G networks.

KEY WORDS

G. fast, DSL, FTTdp, Next Generation Access Networks, Vectoring, The Fourth Generation Broadband Concept, 5G backhauling, Broadband Access Technologies, broadband

ΠΙΚΑΝΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ – ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	7
ABSTRACT – KEY WORDS	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	11
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	18
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	23
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	28
1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	31
1.1 Τηλεπικοινωνιακά συστήματα και δίκτυα.....	31
1.1.1 Η δομή του τηλεπικοινωνιακού συστήματος – οι βασικές έννοιες ..	31
1.1.2 Η δομή του τηλεπικοινωνιακού δικτύου	33
1.1.3 Η δομή του δικτύου πρόσβασης	34
1.1.4 Αδεσμοποίητη πρόσβαση στον τοπικό βρόχο	35
1.1.5 Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών	35
1.2 Το κανάλι επικοινωνίας	36
1.2.1 Εισαγωγή	36
1.2.2 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης	36
1.2.2.1 Χάλκινα καλώδια	37
1.2.2.2 Ομοαξονικό καλώδιο	39
1.2.2.3 Οπτική ίνα	39
1.2.2.4 Δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς	40
1.2.2.5 Επικοινωνία μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος	43
1.2.3 Ασύρματοι τρόποι μετάδοσης	43
1.2.4 Η πολύπλεξη ως τεχνική μετάδοσης	44
1.2.4.1 Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου	45
1.2.4.2 Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας	45
1.3 Αίτια υποβάθμισης σήματος στις ενσύρματες επικοινωνίες	46
1.3.1 Κατηγοριοποίηση παραγόντων.....	46
1.3.2 Θόρυβος	47
1.3.2.1 Είδη θορύβου.....	47
1.3.2.2 Παράμετροι περιγραφής θορύβου	48
1.3.2.3 Λευκός θόρυβος.....	49
1.3.2.4 Ζωνοπερατός θόρυβος.....	50

1.3.3	Εξασθένηση στα χάλκινα καλώδια	50
1.3.4	Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.....	50
1.3.5	Παραμόρφωση	52
1.3.6	Ανακλάσεις	52
1.3.7	Μεταβολές μήκους διάδοσης	52
1.4	Βιβλιογραφία	53
2	ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	55
2.1	Ευρυζωνικότητα.....	55
2.2	Ενσύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες.....	56
2.2.1	Ψηφιακές συνδρομητικές τεχνολογίες βρόχου	56
2.2.2	Δίκτυα παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών.....	57
2.2.2.1	Παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω του δικτύου χαλκού ...	57
2.2.2.2	Παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω δικτύου NGA.....	57
2.2.3	Διακριτή πολυτονική διαμόρφωση	58
2.2.4	Συνοπτική αναφορά σε τεχνολογίες που προηγήθηκαν xDSL	63
2.2.5	HDSL (High-bitrate DSL)	63
2.2.6	ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)	64
2.2.7	VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line).....	66
2.3	Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι τεχνολογιών xDSL	69
2.3.1	Εισαγωγή	69
2.3.2	Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για διόρθωση λαθών μετάδοσης ..	69
2.3.2.1	Κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών.....	69
2.3.2.2	Cyclic Redundancy Check (CRC).....	70
2.3.2.3	Forward Error Correction (FEC) μέσω κωδικοποίησης Reed Solomon	70
2.3.2.4	Κωδικοποιημένη διαμόρφωση	70
2.3.2.5	Scrambling (περίπλεξη).....	71
2.3.2.6	Άλλες τεχνικές.....	71
2.3.3	Προστασία από τον κρουστικό θόρυβο.....	72
2.3.3.1	Ο κρουστικός θόρυβος.....	72
2.3.3.2	Ανάδευση (interleaving)	72
2.3.3.3	Impulse Noise Protection (INP).....	73
2.3.3.4	Impulse Noise Monitor (INM).....	73
2.3.3.5	Physical Layer Retransmission (G.INP).....	73
2.3.4	Προστασία από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων	74
2.3.4.1	Παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων	74

2.3.4.2	RFI Notching.....	75
2.3.4.3	Tone Blackout.....	75
2.3.4.4	Bit Swapping	75
2.3.5	Προστασία από θόρυβο	76
2.3.5.1	Seamless Rate Adaptation (SRA)	77
2.3.5.2	SOS (Save Our Showtime).....	77
2.3.5.3	Εικονικός θόρυβος (Virtual Noise – VN)	78
2.3.6	Προστασία από παρεμβολές	79
2.3.6.1	Echo cancellation.....	79
2.3.6.2	PSD Masking	79
2.3.6.3	PSD shaping (Διαμόρφωση φασματικής πυκνότητας ισχύος)	80
2.3.6.4	Άλλες τεχνικές.....	80
2.3.7	Αύξηση ρυθμού μετάδοσης μέσω της τεχνικής Bonding	80
2.3.8	Δυναμική διαχείριση φάσματος	81
2.3.8.1	Εισαγωγή.....	81
2.3.8.2	Vectoring.....	82
2.3.9	Συγκεντρωτική παρουσίαση χαρακτηριστικών DSL τεχνολογιών....	84
2.4	Βιβλιογραφία	86
3	G.FAST.....	89
3.1	Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας G.fast.....	89
3.2	Αρχιτεκτονική – Τοπολογίες δικτύου	90
3.2.1	Γενιές συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης	90
3.2.2	Σενάρια εγκατάστασης μονάδων διανομής	91
3.2.3	Backhaul network.....	93
3.2.4	Ανάστροφη τροφοδότηση	94
3.3	Χαρακτηριστικά λειτουργίας G.fast	96
3.3.1	Τα προφίλ του G.fast	96
3.3.2	Μέθοδος διαμόρφωσης	96
3.3.3	Μέθοδος πολύπλεξης	97
3.3.4	Τεχνικές κωδικοποίησης για τη διόρθωση λαθών μετάδοσης.....	97
3.3.5	Το κανάλι εύρωστης διαχείρισης	98
3.3.6	Προστασία από κρουστικό θόρυβο (INP).....	98
3.3.7	Φασματική πυκνότητα ισχύος.....	99
3.3.7.1	Μάσκες φασματικής πυκνότητας ισχύος	99
3.3.7.2	Limit PSD Mask	100

3.3.7.3	Subcarrier Masking	100
3.3.7.4	PSD Shaping	101
3.3.7.5	Notching of specific frequency bands	101
3.3.7.6	Low Frequency edge stop-band masking	102
3.3.7.7	Οριακές μάσκες των προφίλ του G.fast.....	102
3.3.7.8	Μάσκα μετάδοσης της φασματικής πυκνότητας ισχύος	104
3.3.7.9	UPBO	105
3.3.7.10	Ρυθμιζόμενες συχνότητες	105
3.3.8	Καταστάσεις του εξοπλισμού (states)	106
3.3.9	Link states (Καταστάσεις της διασύνδεσης).....	107
3.3.9.1	L3 – Idle state	107
3.3.9.2	L0 – Normal operation State.....	107
3.3.9.3	Low power link state L2.1.....	108
3.3.9.4	Low power link state L2.2.....	108
3.3.10	Online Reconfiguration Methods.....	108
3.3.10.1	Seamless Rate Adaptation	109
3.3.10.2	Bit Swapping	109
3.3.10.3	Transmitter-Initiated Gain Adjustment (TIGA).....	109
3.3.10.4	RMC Parameter Adjustment (RPA).....	109
3.3.10.5	Fast Rate Adaptation (FRA).....	109
3.3.10.6	L2 Transmission Schedule Adaptation (L2TSA)	109
3.3.10.7	RMC Recovery (RMCR)	109
3.3.11	Παρεμβολές στο G.fast.....	110
3.3.12	Vectoring στο G. fast.....	110
3.3.13	Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών και λειτουργιών του G.fast .	112
3.4	Συνύπαρξη με παλαιότερες τεχνολογίες	115
3.4.1	Τοπολογίες συνύπαρξης G.FAST με VDSL2	115
3.4.2	Στρατηγικές συνύπαρξης	116
3.4.3	Επιδόσεις τεχνολογιών στην περίπτωση συνύπαρξης.....	116
3.5	Μελλοντικές τάσεις	118
3.6	Διεθνής εμπειρία	119
3.7	Βιβλιογραφία	121
4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ G.fast ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ G.9701 ΤΗΣ ITU 123	
4.1	Μοντέλο αναφοράς συστήματος	123
4.2	Μοντέλα αναφοράς εφαρμογής	127

4.3	Μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου FTU	129
4.4	Λειτουργικό μοντέλο FTU	131
4.4.1	Υπόστρωμα TPS-TC	132
4.4.1.1	Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς	132
4.4.1.2	Τα σημεία αναφοράς	133
4.4.1.3	Δομή μονάδας μεταφοράς δεδομένων (DTU).....	133
4.4.2	Υπόστρωμα PMS-TC	135
4.4.2.1	Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς	135
4.4.2.2	Τα σημεία αναφοράς	136
4.4.2.3	Περίπλεξη, κωδικοποίηση και ανάδευση	137
4.4.2.4	Πολυπλέκτης πλαισίων δεδομένων	137
4.4.3	Υπόστρωμα PMD.....	138
4.4.3.1	Το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς	138
4.4.3.2	Τα σημεία αναφοράς	139
4.4.3.3	Κωδικοποιητής συμβόλων δεδομένων.....	140
4.4.3.4	Προκωδικοποιητής (precoder).....	144
4.4.3.5	Διαμορφωτής (modulator)	145
4.4.3.6	Δομή πλαισίου TDD	145
4.4.3.7	Δομή υπερπλαισίου	146
4.5	Βιβλιογραφία	146
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	147
5.1	Στόχος	147
5.2	Εξοπλισμός	147
5.3	Μετρήσεις	150
5.3.1	Πείραμα 1: Κατανομή ισχύος στο G.fast.....	150
5.3.1.1	Σενάριο.....	150
5.3.1.2	Τοπολογία.....	150
5.3.1.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	150
5.3.1.4	Συμπεράσματα.....	152
5.3.2	Πείραμα 2: Κατανομή ισχύος στο G.fast με την εφαρμογή φασματικών περιορισμών για την προστασία άλλων υπηρεσιών και υπολογισμός διεκπεραιωτικότητας.....	152
5.3.2.1	Σενάριο.....	152
5.3.2.2	Τοπολογία.....	153
5.3.2.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	153
5.3.2.4	Συμπεράσματα.....	155

5.3.3	Πείραμα 3: Προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης βάση του αριθμού των χρονοθυρίδων που διατίθενται σε κάθε ζεύξη και βάση των περιορισμών στο ρυθμό.....	155
5.3.3.1	Σενάριο.....	155
5.3.3.2	Τοπολογία.....	155
5.3.3.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί - Γραφήματα	156
5.3.3.4	Συμπεράσματα.....	156
5.3.4	Πείραμα 4: Αποκοπή RFI συχνοτήτων	156
5.3.4.1	Σενάριο.....	156
5.3.4.2	Τοπολογία.....	156
5.3.4.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	156
5.3.4.4	Συμπεράσματα.....	157
5.3.5	Πείραμα 5: Επίδραση παρεμβολών του προφίλ VDSL2 17a	157
5.3.5.1	Σενάριο.....	157
5.3.5.2	Τοπολογία.....	158
5.3.5.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	158
5.3.5.4	Συμπεράσματα.....	159
5.3.6	Πείραμα 6: Επίδοση G.fast σε μία ενεργή γραμμή	159
5.3.6.1	Σενάριο.....	159
5.3.6.2	Τοπολογία.....	159
5.3.6.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	160
5.3.6.4	Συμπεράσματα.....	166
5.3.7	Πείραμα 7: Επίδοση προφίλ 212 G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές 167	
5.3.7.1	Σενάριο.....	167
5.3.7.2	Τοπολογία.....	167
5.3.7.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	168
5.3.7.4	Συμπεράσματα.....	175
5.3.8	Πείραμα 8: Επίδοση G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές (προφίλ 106 & 212) 176	
5.3.8.1	Σενάριο.....	176
5.3.8.2	Τοπολογία.....	176
5.3.8.3	Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα.....	177
5.3.8.4	Συμπεράσματα.....	188
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: BACKHAULING ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ.....	189
6.1	Κυβελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών	189

6.1.1	Ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών	189
6.1.2	Η κυψελωτή δομή	189
6.1.3	Φυσική αρχιτεκτονική κυψελωτών συστημάτων	190
6.2	Από το 1G στο 5G	192
6.2.1	Εισαγωγή	192
6.2.2	1G	192
6.2.3	2G	194
6.2.4	3G	196
6.2.5	4G	198
6.2.6	Σύνοψη	200
6.3	Η πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών (5G).....	201
6.3.1	Γενικά για το 5G	201
6.3.2	Αρχιτεκτονική δικτύων 5G.....	202
6.3.3	G.fast as a backhaul solution for 5G networks.....	204
6.3.3.1	Τι είναι το «backhaul network»	204
6.3.3.2	Backhauling in 5G.....	205
6.3.3.3	G.fast as a backhaul solution	206
6.4	Συμπεράσματα.....	207
6.5	Βιβλιογραφία	208

ΣΥΤΝΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ	ΣΗΜΑΣΙΑ	ΚΕΦ.
10G-EPON	10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network	3
4GBB	Fourth Generation Broadband Concept	3
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership	6
ACK	Acknowledgement	4
ADSL	Asymmetric DSL	2
AGGR	Aggregate	5
AMPS	Advanced Mobile Phone Service	6
AON	Active Optical Network	1
AP	Access Point	6
AUC	Authentication Centre	6
AWGN	Additive White Gaussian Noise	1
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network	1
BAT	Bit Allocation Table	2
BER	Bit Error Ratio	1
BN	Backhaul Network	6
BRAS	Broadband Remote Access Server	2
BRI	Basic Rate ISDN	2
BS	Base Station	6
BSC	Base Station Controller	6
BSS	Base Station System or Subsystem	6
BTS	Base Transceiver Station	6
CDM	Code Division Multiplexing	1
CFA	Cable Farm Automation	5
CO	Central Office	1
CM	Coded Modulation	2
CN	Core Network	6
CPE	Customer Premises Equipment	2
CRC	Cyclic Redundancy Check	2
DB	DataBase	6
DLM	Dynamic Line Management	2
DMT	Discrete Multi-Tone	2
DOI	Discontinuous Operation Interval	3
DP	Distribution Point	1
DPBO	Downstream Power Back-off	2
DP-MIB	Distribution Point Management Information Base	3
DPU	Distribution Point Unit	3
DRA	Dynamic Resource Allocation	4
DRR	Dynamic Resource Reports	4
DS	Downstream	5
DSL	Digital Subscriber Line	1
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer	2
DSM	Dynamic Spectrum Management	2
DTU	Data Transfer Unit	4
ECS	Error Check Sequence - ECS	4
EDGE	Enhanced Data GSM Evolution	6

EIA/TIA	Electronic Industries Association and Telecommunications Industries Association)	1
ELR	Equipment Location Register	6
eNB	Evolved Node B	6
eoc	embedded operations channel	4
EPON	Ethernet Passive Optical Network	3
EPC	Evolved Packet Core – EPC	6
E-UTRAN	Evolved UTRAN	6
FDD	Frequency Division Duplexing	1
FDM	Frequency Division Multiplexing	1
FEC	Forward Error Correction	2
FEXT	Far End Crosstalk	1
FFT	Fast Fourier Transform	2
FME	FTU Management Entity	4
FRA	Fast Rate Adaptation	3
FTTx	Fiber To The x	1
FTTA	Fiber To The Apartment	1
FTTB	Fiber To The Building	1
FTTC	Fiber To The Cabinet	1
FTTc	Fiber To The Curb	1
FTTdp	Fiber To The Distribution Point	3
FTTEx	Fiber To The Exchange	2
FTTF	Fiber To The Frontage	3
FTTH	Fiber To The Home	1
FTTN	Fiber To The Node/Neighborhood	1
FTTO	Fiber To The Office	1
FTTP	Fiber To The Premises	1
FTTS	Fiber To The Street	1
FTU	Fast Transceiver Unit	3
FTU-O	Fast Transceiver Unit, O for Optical Network	3
FTU-R	Fast Transceiver Unit, R for Remote Side	3
G	Generation	6
G.fast	G (G series of recommendation Fast Access Subscriber Terminal)	3
GGSN	Gateway GPRS Support Node	6
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre	6
GPON	Gigabit Passive Optical Network	3
GPRS	General Packet Radio Service	6
GSM	Global System for Mobile communications	6
HDSL	High-bitrate DSL	2
HLR	Home Location Register	6
HON	Higher Order Node	4
HSPA	High Speed Packet Access	6
HSS	Home Subscriber Server	6
IAR	International Amateur Aadio	3
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform	2
INM	Impulse Noise Monitor	2
INP	Impulse Noise Protection	2

IoT	Internet of Things	6
IPTV	Internet Protocol Television	2
ISDN	Integrated Services Digital Network	1
ISI	Intersymbol Interference	2
ITU	International Telecommunication Union	1
ITU-D	ITU Development Sector	1
ITU-R	ITU Radiocommunication Sector	1
ITU-T	ITU Standardization Sector	1
L2TSA	L2 Transmission Schedule Adaptation	3
LAN	Local Area Network	1
LESM	Low-frequency edge stop-band mask	3
LLU	Local Loop Unbundling	1
LPM	Limit PSD mask	3
LTE	Long Term Evolution	6
MAN	Metropolitan Area Network	1
MAPSK	Multiple Amplitude Phase Shift Keying	2
MDF	Main Distribution Frame	1
ME	Management Entity	4
MIB	Management Information Base	2
MIMO	Multiple Input Multiple Output	2
MME	Mobility Management Entity	6
MMS	Multimedia Message Service	6
MPMC	Multi-point MAC control	3
MPSK	Multiple Phase Shift Keying	2
MQAM	Multiple Quadrature Amplitude Modulation	2
MS	Mobile Station	6
MSC	Mobile Switching Centre	6
MT	Mobile Terminal	6
MTSO	Mobile Telephone Switching Office	6
M2M	Machine to Machine	6
NDR	Net Data Rate	3
NEXT	Near End Crosstalk	1
NGA	Next Generation Access	1
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Network 2	1
NM	Notching mask	3
NMS	Network Management System	4
NMT	Nordic Mobile Telephone	6
NOI	Normal Operation Interval	3
NSS	Network and Switching Subsystem	6
NT	Network Termination	4
NTE	Network Termination Equipment	3
NTR	Network Timing Reference	3
ODN	Optical Distribution Network	4
OLT	Optical Line Termination	1
OLR	On-line Reconfiguration	2
ONT	Optical Network Termination	1
ONU	Optical Network Unit	1
OSS	Operation and Support Subsystem	6

PAM	Pulse Amplitude Modulation	2
PAN	Personal Area Network	1
PCE	Power Control Entity	4
PCRF	Policy and Charging Rules Function	6
PE	Power Extractor	4
PEIN	Prolonged Electrical Impulsive Noise	2
PHY	Physical Layer	4
PLC	Power Line Communication	1
PMD	Physical Media Dependent	4
PMS-TC	Physical Media Specific – Transmission Convergence	4
PON	Passive Optical Network	1
POP	Point-Of-Presence	1
POTS	Plain Old Telephone Service	2
PSD	Power Spectral Density	1
PSE	Power Source Equipment	4
PSM	PSD shaping mask	3
PSTN	Public Switched Telephone Network	1
PSU	Power Supply Unit	4
PtMP	Point to Multipont	1
PtP	Point to Point	1
P-GW	Packet Data Network Gateway	6
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	2
QoE	Quality of Experience	6
QoS	Quality of Service	3
QPSK	Quadrature Phase Shift Key	2
RADSL	Rate Adaptive DSL	2
RAN	Radio Access Network	6
REIN	Repetitive Electrical Impulsive Noise	2
RFI	Radio Frequency Interference	2
RMC	Robust Management Channel	3
RMCR	Robust Management Channel Recovery	3
RNC	Radio Network Controller	6
RPA	RMC Parameter Adjustment	3
RPF	Reverse Power Feeding	3
RS	Reed Solomon	2
RTMS	Radio Telephone Mobile System	6
SA	Spectrum Analyzer	5
SDSL	Symmetric DSL	2
SGSN	Serving GPRS Support Node	6
SHDSL	Singe-pair High-speed DSL	2
SHINE	Single High-level Impulse Noise Event	2
SID	Sequence Identifier	4
SL	Single Line	5
SM	Subcarrier mask	3
SMS	Short Message Service	6
SNR	Signal to Noise Ratio	1
SNR _M	Signal to Noise Ratio Margin	1
SNR _{TH}	Signal to Noise Ratio Threshold	1

SOS	Save Our Showtime	2
SRA	Seamless Rate Adaptation	2
SSM	Static Spectrum Management	2
STDD	Synchronous Time Division Duplexing	4
S-GW	Serving Gateway	6
TACS	Total Access Communication System	6
TCE	Timing Control Entity	4
TCM	Trellis Coded Modulation	2
TDD	Time Division Duplexing	1
TDM	Time Division Multiplexing	1
TDMA	Time Division Multiple Access	3
TIGA	Transmitter-Initiated Gain Adjustment	3
ToD	Time of Day	3
TP	Twisted Pair	1
TPS-TC	Transport Protocol Specific – Transmission Convergence	4
TS	Time Stamp	4
TWDM	Time Wavelength Division Multiplexing	1
TxPSDM	Transmit PSD Mask	3
TXPSDM_N	Narrowband transmit PSD mask	3
TXPSDM_W	Wideband transmit PSD mask	3
UDSL	Universal DSL	2
UE	User Equipment	6
UMTS	Universal Mobile Telecommunication Service	6
UPBO	Upstream Power Back-off	2
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network	6
US	Upstream	5
VCE	Vectoring Control Entity	4
VDSL	Very High-Speed DSL	2
VFC	Vectoring Feedback Channel	4
VG	Vectored Group	4
VLR	Visitor Location Register	6
VN	Virtual Noise	2
VoD	Video on Demand	2
VoIP	Voice over Internet Protocol	6
WAN	Wide Area Network	1
WDM	Wavelength Division Multiplexing	1
XG-PON1	Asymmetric 10 Gigabit Passive Optical Network	3
AK	Αστικό Κέντρο	1
H/M	Ηλεκτρομαγνητικό	1
KK	Κύριος Κατανομητής	1
ΣΑ	Σημείο Αναφοράς	4
ΥΚ	Υπαίθριος Κατανομητής	1
ΧΣ	Χώρος Συνδρομητή	2

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1.1 Η δομή του τηλεπικοινωνιακού συστήματος
- Σχήμα 1.2 Τοπολογίες δικτύων
- Σχήμα 1.3 Η δομή του δικτύου πρόσβασης
- Σχήμα 1.4 Ακύρωση παρεμβολών λόγω συστροφής αγωγών χάλκινου ζεύγους
- Σχήμα 1.5 Η δομή των καλωδίων του ελληνικού δικτύου πρόσβασης
- Σχήμα 1.6 Δομή ομοαξονικού καλωδίου
- Σχήμα 1.7 Δομή και «τρόποι» οπτικής ίνας
- Σχήμα 1.8 Αρχιτεκτονικές FTTx
- Σχήμα 1.9 Ενεργητικό/Παθητικό Οπτικό Δίκτυο
- Σχήμα 1.10 Πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου και συχνότητας
- Σχήμα 1.11 Πολύπλεξη μήκους κύματος
- Σχήμα 1.12 Παράγοντες υποβάθμισης σήματος
- Σχήμα 1.13 Ταξινόμηση ειδών θορύβου
- Σχήμα 1.14 Φασματική πυκνότητα ισχύος τεχνολογιών DSL
- Σχήμα 1.15 Τηλεδιαφωνία - παραδιαφωνία
- Σχήμα 2.1 Τοπολογία δικτύου παροχής xDSL υπηρεσιών
- Σχήμα 2.2 Πλεονέκτημα DMT διαμόρφωσης
- Σχήμα 2.3 Μπλοκ διάγραμμα DMT διαμορφωτή
- Σχήμα 2.4 Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση QPSK και 8PSK
- Σχήμα 2.5 Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση 16QAM
- Σχήμα 2.6 Ρυθμοί μετάδοσης (σε Mbps) ADSL, ADSL2, ADSL2+ συναρτήσει της εξασθένησης
- Σχήμα 2.7 Επιδόσεις τεχνολογιών ADSL και VDSL συναρτήσει της απόστασης
- Σχήμα 2.8 Κατανομή συχνοτήτων στην άνω και κάτω ζεύξη των τεχνολογιών DSL
- Σχήμα 2.9 Δομικό διάγραμμα της κωδικοποιημένης διαμόρφωσης trellis
- Σχήμα 2.10 Διαδικασία διαστρωμάτωσης
- Σχήμα 2.11 Επίδραση κρουστικού θορύβου
- Σχήμα 2.12 RFI Notching
- Σχήμα 2.13 Επίδραση θορύβου με ή χωρίς την εφαρμογή μάσκας εικονικού θορύβου
- Σχήμα 2.14 Τα επίπεδα διαχείρισης φάσματος
- Σχήμα 2.15 Vectoring
- Σχήμα 3.1 Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης DSL τεχνολογιών
- Σχήμα 3.2 Χρονική εξέλιξη συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης
- Σχήμα 3.3 Σενάρια εγκατάστασης των μονάδων διανομής
- Σχήμα 3.4 Εναλλακτικές τοπολογίες single-port DPs
- Σχήμα 3.5 Εναλλακτικές τοπολογίες multi-port DPs
- Σχήμα 3.6 Σενάριο τοποθέτησης μπαταριών υποστήριξης RPF σε DP και NTE
- Σχήμα 3.7 Οριακή μάσκα εντός ζώνης προφίλ 106MHz
- Σχήμα 3.8 Οριακή μάσκα εντός ζώνης προφίλ 212MHz
- Σχήμα 3.9 Οριακή μάσκα εκτός ζώνης συχνοτήτων κάτω της f_{tr1}
- Σχήμα 3.10 Οριακή μάσκα εκτός ζώνης άνω της f_{tr2}

- Σχήμα 3.11 Σχέση μεταξύ των μηχανισμών για τη δημιουργία μασκών, των παραμέτρων διαμόρφωσης που ορίζονται από τη βάση διαχείρισης πληροφοριών, των παραμέτρων των πομποδεκτών G.9701 και των τελικών μασκών μετάδοσης
- Σχήμα 3.12 Το φαινόμενο των παρεμβολών στο G.fast
- Σχήμα 3.13 Ισχύς σημάτων μετάδοσης και σημάτων παρεμβολών
- Σχήμα 3.14 Συνύπαρξη τοπολογιών FTTC και FTTdp στο ίδιο καλώδιο
- Σχήμα 3.15 Συνύπαρξη VDSL2 και G.fast στην ίδια καμπίνα
- Σχήμα 3.16 Είδη παρεμβολών στην περίπτωση συνύπαρξης VDSL2 και G.fast
- Σχήμα 3.17 Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 1
- Σχήμα 3.18 Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 1 με χρήση μείωσης ισχύος στην περίπτωση επικαλυπτόμενου φάσματος
- Σχήμα 3.19 Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 2 με χρήση μείωσης ισχύος στην περίπτωση επικαλυπτόμενου φάσματος
- Σχήμα 4.1 Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας FTTdp
- Σχήμα 4.2 Μοντέλο αναφοράς DPU
- Σχήμα 4.3 Μοντέλο αναφοράς NT
- Σχήμα 4.4 Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας εφαρμογής FTTdp με POTS
- Σχήμα 4.5 Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας εφαρμογής FTTdp με POTS και RPF
- Σχήμα 4.6 Μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου FTU
- Σχήμα 4.7 Μοντέλο αναφοράς του πρωτοκόλλου FTU του επιπέδου δεδομένων
- Σχήμα 4.8 Λειτουργικό μοντέλο FTU
- Σχήμα 4.9 Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος TPS-TC της FTU-O
- Σχήμα 4.10 Δομή μονάδας μεταφοράς δεδομένων
- Σχήμα 4.11 Περιεχόμενο της ωφέλιμης πληροφορίας μίας DTU
- Σχήμα 4.12 Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος PMS-TC της FTU-O
- Σχήμα 4.13 Πολύπλεξη RMC πλαισίων και bytes από DTUs
- Σχήμα 4.14 Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος PMD της FTU-O
- Σχήμα 4.15 Λειτουργικό μοντέλο κωδικοποιητή υποστρώματος PMD
- Σχήμα 4.16 Παραπλήρωση συμβόλων δεδομένων και RMC συμβόλων
- Σχήμα 4.17 Μετατροπή των bits από τον κωδικοποιητή trellis
- Σχήμα 4.18 Μετατροπή λέξης u στις λέξεις v και w
- Σχήμα 4.19 Ο συνελκτικός κωδικοποιητής
- Σχήμα 4.20 Λειτουργικό μοντέλο PMD υποστρώματος με χρήση προκωδικοποιητή $N*N$
- Σχήμα 4.21 Δομή πλαισίου TDD
- Σχήμα 4.22 Δομή υπερπλαισίου
- Σχήμα 5.1 Κάτοψη εξοπλισμού G.fast
- Σχήμα 5.2 Πλαϊνή όψη εξοπλισμού G.fast
- Σχήμα 5.3 Εσωτερική καλωδίωση εξοπλισμού G.fast
- Σχήμα 5.4 Distance Creator
- Σχήμα 5.5 Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων μηκών
- Σχήμα 5.6 Επιλογή επιθυμητού μήκους βρόχου για κάθε κανάλι από τις δημιουργηθείσες επιλογές

- Σχήμα 5.7 Τοπολογία πειράματος 1
- Σχήμα 5.8 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106a
- Σχήμα 5.9 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a
- Σχήμα 5.10 Κατανομή ισχύος στα προφίλ 106a και 212a κατά την ταυτόχρονη λειτουργία
- Σχήμα 5.11 Τοπολογία πειράματος 2
- Σχήμα 5.12 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a με την εφαρμογή φασματικού περιορισμού για την προστασία του VDSL 17a
- Σχήμα 5.13 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a με την εφαρμογή φασματικού περιορισμού για την προστασία του VDSL 35b
- Σχήμα.5.14 Τοπολογία πειράματος 3
- Σχήμα 5.15 Κατανομή ισχύος με την εφαρμογή της τεχνικής RFI notching
- Σχ.5.16 Τοπολογία πειράματος 5
- Σχήμα 5.17 Ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων
- Σχήμα 5.18 Ρυθμός μετάδοσης άνω ζεύξης G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων
- Σχήμα 5.19 Επίδοση G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων
- Σχήμα 5.20 Ποσοστό αρχικού ρυθμού μετάδοσης (στα 0 μέτρα) που επιτυγχάνεται συναρτήσει του μήκους βρόχου
- Σχήμα 5.21 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106MHz στα 150m
- Σχήμα 5.22 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106MHz στα 250m
- Σχήμα 5.23 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 19-106MHz στα 250m
- Σχήμα 5.24 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-106MHz στα 250m
- Σχήμα 5.25 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 19-212MHz στα 75m
- Σχήμα 5.26 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-212MHz στα 150m
- Σχήμα 5.27 Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-212MHz στα 150m
- Σχήμα 5.28 Τοπολογία πειράματος 7
- Σχήμα 5.29 AVG SL VS AVG VECT
- Σχήμα 5.30 AVERAGE VECTORING GAIN
- Σχήμα 5.31 MIN VS AVG AT 2.2-212
- Σχήμα 5.32 MIN VS AVG AT 19-212
- Σχήμα 5.33 MIN VS AVG AT 30-212
- Σχήμα 5.34 MAX VS AVG AT 2.2-212
- Σχήμα 5.35 MAX VS AVG AT 19-212
- Σχήμα 5.36 MAX VS AVG AT 30-212
- Σχήμα 5.37 Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 19-212]
- Σχήμα 5.38 Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 30-212]
- Σχήμα 5.39 Average aggregate rates Δ [19-212 vs 30-212]
- Σχήμα 5.40 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 0m
- Σχήμα 5.41 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 25m

- Σχήμα 5.42 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 50m
- Σχήμα 5.43 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 75m
- Σχήμα 5.44 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 250m
- Σχήμα 5.45 Τοπολογία πειράματος 8
- Σχήμα 5.46 AVG OF 3*212+3*106 SL VS VECT (comparing all lines)
- Σχήμα 5.47 AVG OF 3*212+3*106 SL VS VECT (comparing only 212 lines)
- Σχήμα 5.48 AVG VECT RATE 6*212 VS 3*212+3*106 (comparing only 212 lines)
- Σχήμα 5.49 VECTORING GAIN FOR 106 & 212 COEXISTENCE
- Σχήμα 5.50 MIN VS AVG AT FULL SPECTRUM COEXISTENCE
- Σχήμα 5.51 MIN VS AVG AT COEXISTENCE WITH 17a MASK
- Σχήμα 5.52 MIN VS AVG AT COEXISTENCE WITH 35b MASK
- Σχήμα 5.53 MAX VS AVG AT FULL SPECTRUM COEXISTENCE
- Σχήμα 5.54 MAX VS AVG AT COEXISTENCE WITH 17a MASK
- Σχήμα 5.55 MAX VS AVG AT COEXISTENCE WITH 35b MASK
- Σχήμα 5.56 Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs VDSL2 17a mask]
- Σχήμα 5.57 Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs VDSL2 35b mask]
- Σχήμα 5.58 Average aggregate rates Δ [VDSL2 17a vs VDSL2 35b mask]
- Σχήμα 5.59 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 0m
- Σχήμα 5.60 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 25m
- Σχήμα 5.61 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 75m
- Σχήμα 5.62 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 150m
- Σχήμα 5.63 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 250m
- Σχήμα 5.64 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 25m
- Σχήμα 5.65 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 50m
- Σχήμα 5.66 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 75m
- Σχήμα 5.67 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 150m
- Σχήμα 5.68 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 0m
- Σχήμα 5.69 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 25m
- Σχήμα 5.70 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 50m
- Σχήμα 5.71 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 75m

- Σχήμα 5.72 Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 150m
- Σχήμα 5.73 SL_35-212_75m_bitloading
- Σχήμα 5.74 VECT_35-212_75m_bitloading
- Σχήμα 5.75 VECT_30-106_0m_bitloading
- Σχήμα 5.76 VECT_30-212_0m_bitloading
- Σχήμα 5.77 VECT_35-106_250m_bitloading
- Σχήμα 5.78 VECT_35-212_250m_bitloading
- Σχήμα 6.1 Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου κινητών επικοινωνιών
- Σχήμα 6.2 Οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τις πέντε γενιές κινητών επικοινωνιών
- Σχήμα 6.3 Αρχιτεκτονική AMPS
- Σχήμα 6.4 Αρχιτεκτονική GSM
- Σχήμα 6.5 Αρχιτεκτονική UMTS
- Σχήμα 6.6 Αρχιτεκτονική LTE
- Σχήμα 6.7 Η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών
- Σχήμα 6.8 Η πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών
- Σχήμα 6.9 Υπηρεσίες δικτύων 5G
- Σχήμα 6.10 Δίκτυο 5G
- Σχήμα 6.11 Αρχιτεκτονική 5G

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1	Χαρακτηριστικά ενσύρματων μέσων μετάδοσης
Πίνακας 1.2	Τύποι χάλκινων καλωδίων και οι εφαρμογές τους
Πίνακας 1.3	Αρχιτεκτονικές FTTx
Πίνακας 2.1	Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών DSL
Πίνακας 2.2	Προφίλ VDSL2
Πίνακας 2.3	Είδη κρουστικού θορύβου
Πίνακας 2.4	Αντίμετρα στις διάφορες μορφές θορύβου
Πίνακας 2.5	Χαρακτηριστικά λειτουργίας τεχνολογιών DSL
Πίνακας 2.6	Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι DSL τεχνολογιών
Πίνακας 2.7	Περιπτώσεις εφαρμογής υποστηρικτικών μηχανισμών DSL τεχνολογιών
Πίνακας 3.1	Οι 5 γενιές συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης
Πίνακας 3.2	Χαρακτηριστικά PONs που συνδέουν DPU με AK
Πίνακας 3.3	Τιμές βασικών παραμέτρων στα προφίλ του G.fast
Πίνακας 3.4	Τεχνικές κωδικοποίησης του G.fast
Πίνακας 3.5	Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης προφίλ 106MHz
Πίνακας 3.6	Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης προφίλ 212MHz
Πίνακας 3.7	Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης κάτω της f_{tr1}
Πίνακας 3.8	Παράμετροι οριακής μάσκας εκτός ζώνης άνω της f_{tr2}
Πίνακας 3.9	Χαρακτηριστικά λειτουργίας DSL τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένου του G.fast
Πίνακας 3.10	Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι DSL τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένου του G.fast
Πίνακας 4.1	Βασικά χαρακτηριστικά σημείων αναφοράς του FTU
Πίνακας 4.2	Δυνατές τιμές M_{ds} συναρτήσεως του μήκους TDD πλαισίου
Πίνακας 4.3	Υποχρεωτικά ζεύγη τιμών (M_F, M_{SF})
Πίνακας 5.1	Χαρακτηριστικά εξοπλισμού μετρήσεων
Πίνακας 5.2	Παράμετροι πειράματος 1
Πίνακας 5.3	Μετρήσεις πειράματος 1
Πίνακας 5.4	Παράμετροι πειράματος 2
Πίνακας 5.5	Μετρήσεις speedtest
Πίνακας 5.6	Μετρήσεις ρυθμού συγχρονισμού και υπολογισμός διεκπεραιωτικότητας
Πίνακας 5.7	Παράμετροι πειράματος 3
Πίνακας 5.8	Μετρήσεις πειράματος 3
Πίνακας 5.9	Παράμετροι πειράματος 4
Πίνακας 5.10	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 4
Πίνακας 5.11	Παράμετροι πειράματος 5
Πίνακας 5.12	Μετρήσεις πειράματος 5
Πίνακας 5.13	Υπολογισμοί πειράματος 5
Πίνακας 5.14	Παράμετροι πειράματος 6
Πίνακας 5.15	Μετρήσεις πειράματος 6
Πίνακας 5.16	Ποσοστό αρχικού ρυθμού μετάδοσης (στα 0 μέτρα) που επιτυγχάνεται συναρτήσεως του μήκους βρόχου
Πίνακας 5.17	Παράμετροι πειράματος 7
Πίνακας 5.18	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 7 (full spectrum)

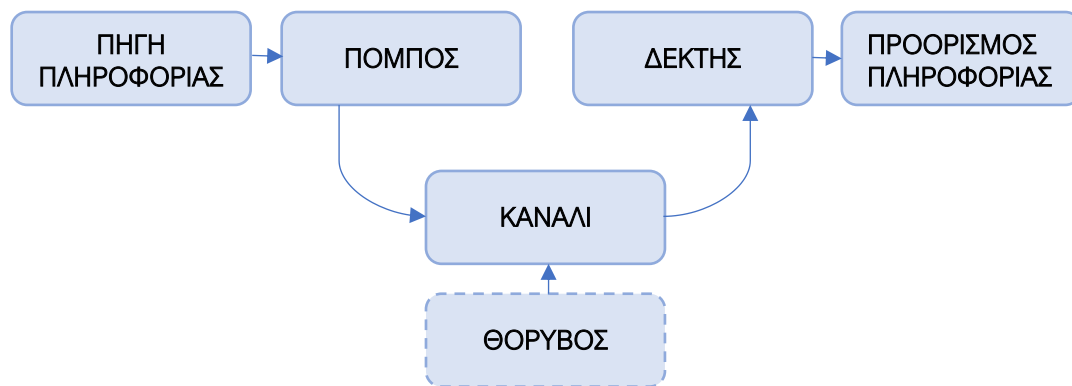
Πίνακας 5.19	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 7 (19-212MHz)
Πίνακας 5.20	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 7 (30-212MHz)
Πίνακας 5.21	Απώλειες ρυθμού μετάδοσης μεταξύ διαφορετικών προφίλ σε κάθε μήκος βρόχου
Πίνακας 5.22	Ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα του προφίλ 30-212 στα διάφορα μήκη βρόχου
Πίνακας 5.23	Παράμετροι πειράματος 8
Πίνακας 5.24	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 8 (full spectrum coexistence)
Πίνακας 5.25	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 8 (106 & 212 coexistence with VDSL2 17a mask)
Πίνακας 5.26	Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 8 (106 & 212 coexistence with VDSL2 35b mask)
Πίνακας 5.27	Απώλειες ρυθμού μετάδοσης μεταξύ διαφορετικών προφίλ σε κάθε μήκος βρόχου
Πίνακας 5.28	Συγκριτική επίδοση γραμμών G.fast 212 στα δύο σενάρια (6x212/3x212+3x106)
Πίνακας 5.29	Τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει» σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο full spectrum coexistence
Πίνακας 5.30	Πρώτη και τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει» σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο 106 & 212 coexistence with VDSL2 17a mask
Πίνακας 5.31	Πρώτη και τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει» σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο 106 & 212 coexistence with VDSL2 35b mask
Πίνακας 6.1	Χαρακτηριστικά συστημάτων πρώτης γενιάς
Πίνακας 6.2	Χαρακτηριστικά συστημάτων δεύτερης γενιάς
Πίνακας 6.3	Χαρακτηριστικά συστημάτων τρίτης γενιάς
Πίνακας 6.4	Χαρακτηριστικά συστημάτων τέταρτης γενιάς
Πίνακας 6.5	Backhauling solutions σε 5G δίκτυα

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Τηλεπικοινωνιακά συστήματα και δίκτυα

1.1.1 Η δομή του τηλεπικοινωνιακού συστήματος – οι βασικές έννοιες

Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχουν ως στόχο την αξιόπιστη μετάδοση της πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο ή άλλα απομακρυσμένα από αυτό. Το μοντέλο των C. E. Shannon και W. Weaver, το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου και αναφέρεται συχνά ως η μητέρα των μοντέλων, εισάγει θεμελιώδεις έννοιες οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.1: Η δομή του τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Πομπός: Είναι η διάταξη που λαμβάνει ως είσοδο την παραγόμενη από την πηγή πληροφορία, την επεξεργάζεται και δημιουργεί ένα σήμα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να μεταδοθεί. Η διαδικασία ενσωμάτωσης της αρχικής πληροφορίας στο προς μετάδοση σήμα ονομάζεται *διαμόρφωση*.

Σήμα: Είναι μια οντότητα η οποία μεταβάλλεται τυχαία με το χρόνο. Η γνώση της μεταβολής έχει ενδιαφέρον καθώς σε αυτή είναι ενσωματωμένη η πληροφορία. Το σήμα μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό.

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα (H/M κύμα): Είναι ο φορέας του σήματος.

Κανάλι ή δίαυλος: Είναι το φυσικό μέσο μετάδοσης του φορέα του σήματος, δηλαδή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το μέσο μπορεί να είναι ενσύρματο (διάδοση H/M κύματος στο εσωτερικό μιας διάταξης όπως είναι η γραμμή μεταφοράς, ο κυματοδηγός ή η οπτική ίνα) ή ασύρματο (διάδοση H/M κύματος στον ελεύθερο χώρο). Στις ενσύρματες μεταδόσεις χρησιμοποιείται συχνά ο όρος γραμμή ισοδύναμα με τους όρους κανάλι ή δίαυλος. Σε αρκετές περιπτώσεις η μετάδοση είναι σε ένα τμήμα της ενσύρματη και σε ένα άλλο ασύρματη.

Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης υπερτίθεται στο σήμα από το δίαυλο *θόρυβος*, δηλαδή τυχαία μεταβαλλόμενη ανεπιθύμητη οντότητα ομοειδής προς το σήμα, που προστίθεται σε αυτό και δεν ξεχωρίζει από αυτό. Ως αποτέλεσμα, στο δέκτη φθάνει μία αλλοιωμένη εκδοχή του αρχικού σήματος.

Τόσο κατά την επεξεργασία όσο και κατά τη μετάδοση της πληροφορίας, υπεισέρχονται φυσικοί και τεχνητοί μηχανισμοί οι οποίοι οδηγούν στην περαιτέρω αλλοίωση του σήματος και αναφέρονται αναλυτικά στην Εν.1.3.

Δέκτης: Είναι η διάταξη που παραλαμβάνει το μεταδιδόμενο σήμα, το επεξεργάζεται και προσπαθεί να αναδημιουργήσει την πληροφορία σύμφωνα με προδιαγραφές.

Στις τηλεπικοινωνίες είναι σύνηθες οι διαδικασίες της αποστολής αλλά και της λήψης των σημάτων να επιτελούνται και στα δύο άκρα του διαύλου, με αποτέλεσμα οι χαρακτηρισμοί «πομπός» και «δέκτης» να εναλλάσσονται με βάση την εκάστοτε κατεύθυνση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Οπότε, στην παρούσα διπλωματική η χρήση των εννοιών αυτών μπορεί να υποδηλώνει αμφότερα άκρα του διαύλου, εκτός αν έχει προηγηθεί διαφορετική διευκρίνιση. Επιπλέον, παρόλο που στις ενσύρματες επικοινωνίες δεν γίνεται εκπομπή αλλά έγχυση του σήματος στο δίαυλο, κατά σύμβαση θα γίνεται χρήση των όρων πομπού και δέκτη και σε αυτή την περίπτωση. Τέλος, ο όρος «άνω ζεύξη» (Uplink) θα χρησιμοποιείται δηλώνοντας ότι η μετάδοση της πληροφορίας έχει κατεύθυνση από χρήστη προς τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, ενώ ο όρος «κάτω ζεύξη» (Downlink) θα υποδηλώνει την αντίστροφη κατεύθυνση της επικοινωνίας.

Κατά την επικοινωνία μεταξύ δύο άκρων, η ροή της πληροφορίας μπορεί να είναι μονόδρομη, εκ περιτροπής αμφίδρομη και πλήρως αμφίδρομη. Ένας σύνδεσμος μεταξύ δύο άκρων στον οποίο μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο κατευθύνσεις επικοινωνίας ονομάζεται πλήρως αμφίδρομος (full duplex link). Όταν είναι δυνατή η χρήση αμφότερων κατευθύνσεων με την προϋπόθεση ότι δε γίνεται ταυτόχρονα ο σύνδεσμος ονομάζεται ημιαμφίδρομος (half duplex link), ενώ όταν είναι επιτρεπτή η χρήση μόνο μίας κατεύθυνσης ο σύνδεσμος ονομάζεται μονόδρομος (simplex link).

Η περιγραφή και η ανάλυση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων γίνεται κυρίως στο πεδίο της συχνότητας, το οποίο αποτελεί μια καταλυτικά χρήσιμη ανθρώπινη επινόηση. Στο πεδίο της συχνότητας η ανάλυση και η επεξεργασία των σημάτων είναι πολύ πιο απλή αλλά και βολική διαδικασία συγκριτικά με αυτή που θα ακολουθούσαν στο πεδίο του χρόνου. Με χρήση μαθηματικών εργαλείων, όπως είναι η ανάλυση Fourier, γίνεται εφικτή η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας και αντιστρόφως. Ως *εύρος ζώνης σήματος* εννοείται η φασματική απόσταση μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης φασματικής συνιστώσας του φάσματός του, ενώ *εύρος ζώνης διαύλου* εννοείται η περιοχή των συχνοτήτων που είναι δυνατό να μεταδοθεί χωρίς (ή πρακτικά με μικρή) εξασθένιση μέσω του διαύλου.

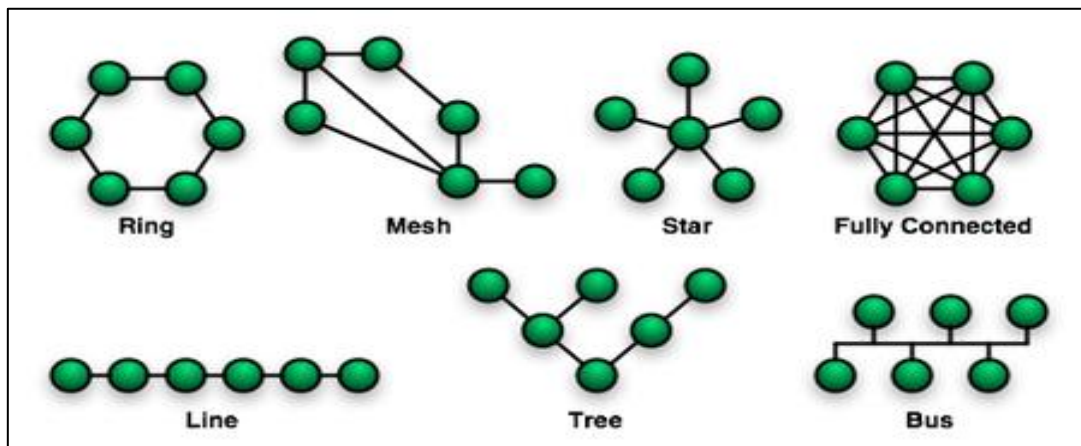
Ως γνωστόν, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στις τηλεπικοινωνίες αξιοποιείται κατά κύριο λόγο το τμήμα του φάσματος που καταλαμβάνουν τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα, δηλαδή το εύρος των συχνοτήτων από 0 έως 300MHz και από 300MHz έως 300GHz, το οποίο αποτελεί πολύτιμο πόρο λόγω της πολύ υψηλής ζήτησης που έχει σε πληθώρα εφαρμογών. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση και χρήση του.

[1] [2] [3]

1.1.2 Η δομή του τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Για να επιτευχθεί η ταυτόχρονη κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας πολλών συνδρομητών είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός δικτύου. Το δίκτυο αποτελείται από τερματικές συσκευές και κόμβους μεταγωγής. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν τις ζεύξεις του δικτύου για να μεταφέρουν την πληροφορία από μία τερματική συσκευή σε μία άλλη. Υπάρχουν αρκετές κατηγοριοποιήσεις των δικτύων βάσει των κριτηρίων υπό τα οποία τα εξετάζονται:

- Ως προς τον τρόπο διασύνδεσης των διαφόρων σημείων υπάρχουν η τοπολογία αστέρα (star), διαύλου (bus), δακτυλίου (ring), η μερικώς ή πλήρως καταναμημένη (fully connected or mesh) αλλά και οι υβριδικές τοπολογίες όπως για παράδειγμα είναι η τοπολογία δένδρου (tree), όπως φαίνονται στο Σχ.1.2.



Σχήμα 1.2: Τοπολογίες δικτύων

- Ως προς τον τηλεπικοινωνιακό τύπο εξυπηρέτησης υπάρχει το κοινό τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής (Public Switched Telephone Network - PSTN) για υπηρεσίες φωνής, τα δίκτυα ενοποιημένων υπηρεσιών (Integrated Services Digital Network - ISDN, Broadband ISDN - B-ISDN) για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, τα δίκτυα υπολογιστών για υπηρεσίες δεδομένων και τέλος, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας καθώς και τα ευρυζωνικά δίκτυα, για υπηρεσίες διαφόρων τύπων (φωνή, διαδίκτυο, τηλεόραση).
- Ως προς το φορέα εξυπηρέτησης υπάρχουν τα ιδιωτικά δίκτυα και τα δημόσια δίκτυα δεδομένων.
- Ως προς τη γεωγραφική έκταση τερματικών και υπολογιστικών σημείων υπάρχουν τα δίκτυα ευρείας περιοχής (Wide Area Network - WAN), τα αστικά δίκτυα (Metropolitan Area Network - MAN), τα τοπικά δίκτυα (Local Area Network - LAN) και τα δίκτυα προσωπικού χώρου (Personal Area Network - PAN).
- Τέλος, ως προς την τεχνική προώθησης της πληροφορίας διακρίνονται σε δίκτυα μεταγωγής και στα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης. Τα δίκτυα μεταγωγής χωρίζονται περαιτέρω σε δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος (όπως είναι δομημένο τα τηλεφωνικά δίκτυα) και μεταγωγής πακέτου (όπως είναι δομημένο το Internet).

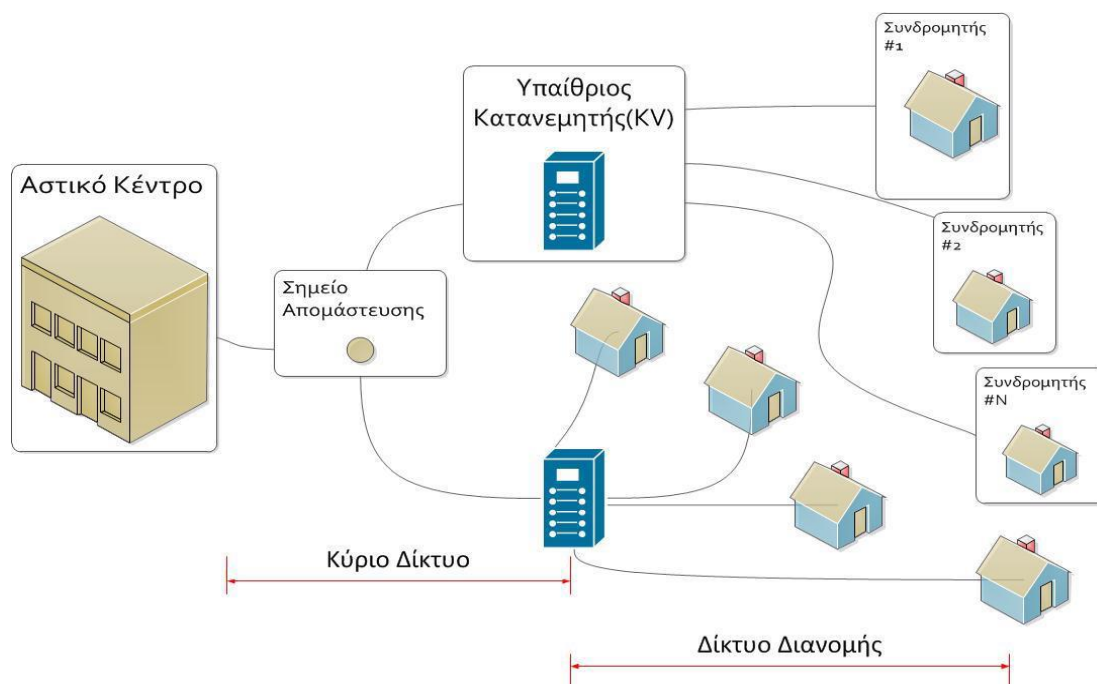
Ένας ολοκληρωμένος ορισμός που καλύπτει τα διαφορετικά είδη δικτύων που παρουσιάστηκαν ανωτέρω είναι ο αυτός που τα παρουσιάζει ως καταναμημένα συστήματα υλικού και λογισμικού που επιτρέπουν στους χρήστες των διαφόρων υπηρεσιών να ανταλλάσσουν πληροφορίες.

[4] [5] [6] [7] [8]

1.1.3 Η δομή του δικτύου πρόσβασης

Η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών, η οποία θα εξηγηθεί στο Κεφ.2, αξιοποιεί την υπάρχουσα υποδομή του δικτύου PSTN. Το δίκτυο αυτό, που είναι γνωστό ως δίκτυο πρόσβασης, είναι ένα εκτεταμένο και πολύπλοκο δίκτυο χάλκινων καλωδίων. Αποτελείται από το κύριο δίκτυο και το δίκτυο διανομής (απερχόμενο δίκτυο). Οι διάφορες γεωγραφικές περιοχές λειτουργίας χωρίζονται σε υποπεριοχές, εκάστη οποίων εξυπηρετείται από ένα Αστικό Κέντρο – ΑΚ (Central Office - CO).

Το ΑΚ περιλαμβάνει τον Κύριο Καταναμητή - ΚΚ (Main Distribution Frame - MDF), από τον οποίο εκκινούν μεγάλα καλώδια τα οποία στη συνέχεια απομαστεύονται σε μικρότερα καλώδια και αναπτύσσονται σε δενδροειδή τοπολογία περί το ΑΚ. Έκαστο των καλωδίων αυτών τερματίζεται σε ένα Υπαίθριο Καταναμητή - ΥΚ (Καφάο από την «ελληνοποιημένη» προφορά του Γερμανικού αρκτικόλεξου KV που προέρχεται από τη λέξη KabelVerzweiger που σημαίνει καταναμητής καλωδίων), ο οποίος θεωρείται η διεπαφή μεταξύ των καλωδίων του κύριου και του απερχόμενου δικτύου. Εκεί διαχωρίζονται εκ νέου σε ομάδες που με τη σειρά τους διακλαδώνονται σε ακόμη μικρότερες ομάδες και καταλήγουν, αναπτυσσόμενα σε τοπολογία αστέρα γύρω από τον ΥΚ, στο χώρους των συνδρομητών, όπου μέσω του εσωτερικού καταναμητή συνδέονται με την υπάρχουσα εσωτερική καλωδίωση. [9]



Σχήμα 1.3: Η δομή του δικτύου πρόσβασης

1.1.4 Αδεσμοποίητη πρόσβαση στον τοπικό βρόχο

Στα δίκτυα πρόσβασης χαλκού, ως τοπικός βρόχος αναφέρεται ο φυσικός σύνδεσμος μεταξύ του τερματικού εξοπλισμού του συνδρομητή με κάποιο ακραίο κόμβο του δικτύου του παρόχου του. Η αδεσμοποίητη πρόσβαση στον τοπικό βρόχο (Local Loop Unbundling - LLU) είναι η διαδικασία που επιτρέπει την αξιοποίηση του δικτύου πρόσβασης που έχει κατασκευάσει ένας πάροχος από άλλους παρόχους που δραστηριοποιούνται στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Υπάρχουν τρεις τύποι LLU, οι οποίοι περιγράφονται στη συνέχεια:

- Full LLU: Στην περίπτωση της πλήρους αδεσμοποίητης πρόσβασης, ο εναλλακτικός πάροχος λαμβάνει τον πλήρη έλεγχο του καλωδίου από το βασικό πάροχο. Επομένως, είναι ο μοναδικός που συνδέεται στο βρόχο και αναλαμβάνει την υποχρέωση εξυπηρέτησης όλων των τηλεπικοινωνιακών αναγκών του συνδρομητή (υπηρεσίες φωνής και δεδομένων) εγκαθιστώντας δικό του ενεργό εξοπλισμό. Ο αρχικός πάροχος λαμβάνει στην περίπτωση αυτή πάγιο από το νέο πάροχο.
- Shared LLU: Στην περίπτωση της μεριζόμενης πρόσβασης, ο εναλλακτικός πάροχος προσφέρει κατά κανόνα μόνο την εξυπηρέτηση διασύνδεσης για υπηρεσίες δεδομένων (Internet), ενώ ο αρχικός πάροχος εξακολουθεί να προσφέρει τη βασική υπηρεσία φωνής.
- Sub-loop LLU: Στην περίπτωση της αδεσμοποίητης πρόσβασης στον τοπικό υποβρόχο, ο εναλλακτικός πάροχος αποκτά τον πλήρη έλεγχο για ένα τμήμα του βρόχου, μέσω εξωτερικής πρόσβασης σε ένα σημείο πρόσβασης (Distribution Point - DP).

[4]

1.1.5 Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών

Ο σημαντικότερος διεθνής τηλεπικοινωνιακός οργανισμός παγκοσμίως είναι η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU) η οποία δημιουργήθηκε με στόχο τη διευκόλυνση της διεθνούς διασύνδεσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων και αποτελείται από 3 κύριους τομείς. Ο τομέας των ραδιοεπικοινωνιών (Radiocommunication Sector: ITU-R) συντονίζει το συνεχώς αυξανόμενο εύρος υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών, ενώ, επίσης, είναι υπεύθυνος για τη διεθνή διαχείριση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και των δορυφορικών τροχιών. Ο τομέας της ανάπτυξης (Development Sector: ITU-D) προωθεί την ανάπτυξη των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών και προσπαθεί να βελτιώσει την πρόσβαση που έχουν σε αυτές οι υποεξυπηρετούμενες τηλεπικοινωνιακά περιοχές παγκοσμίως. Τέλος, ο τομέας της τυποποίησης (ITU Standardization Sector: ITU-T) προβαίνει σε τεχνικές συστάσεις (recommendations), οι οποίες στην πλειοψηφία των περιπτώσεων καταλήγουν να γίνουν αναγνωρισμένα πρότυπα τα οποία ακολουθούνται διεθνώς.

[10]

1.2 Το κανάλι επικοινωνίας

1.2.1 Εισαγωγή

Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι τηλεπικοινωνίες είναι η επίτευξη αξιόπιστης μετάδοσης τεράστιου όγκου διαφόρων τύπων πληροφορίας ταχέως, και οικονομικά. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει αντισταθμιστική σχέση μεταξύ ταχύτητας, αξιοπιστίας και κόστους, η οποία προκύπτει από τον συνυπολογισμό όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη μετάδοση. Το κανάλι επικοινωνίας αποτελεί αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος καθώς οι συνθήκες που επικρατούν σε αυτό, αλλά και αυτή καθαυτή η φύση του, είναι συνήθως η στενωπός της επίδοσης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που φέρει το προς μετάδοση σήμα μπορεί να διαδίδεται είτε στον ελεύθερο χώρο (ασύρματη μετάδοση) είτε μέσω καλωδίων διαφόρων τύπων (ενσύρματη μετάδοση). Η παρούσα διπλωματική μελετά και αναλύει κατά κύριο λόγο τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης. Σε αυτήν την ενότητα, θα παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά των ενσύρματων μέσων ενώ, στην επόμενη, θα αναλυθούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοσή τους.

1.2.2 Ενσύρματα μέσα μετάδοσης

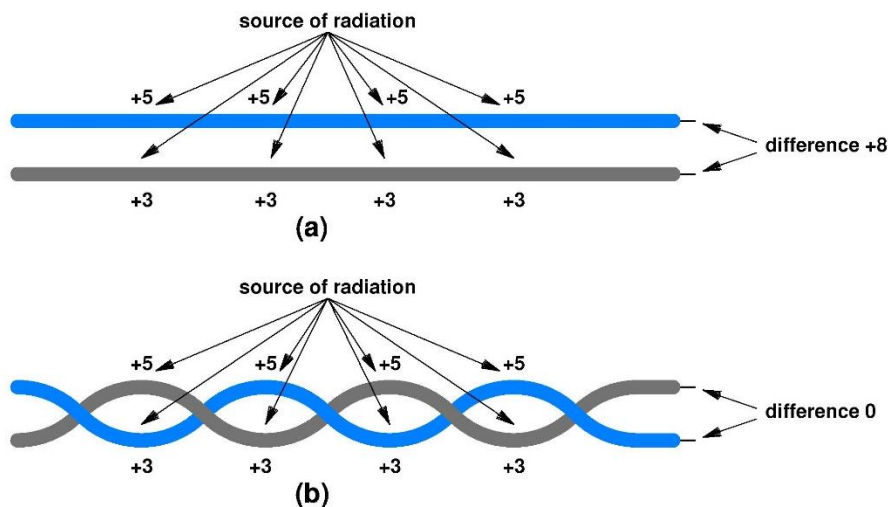
Πλέον, τα ενσύρματα δίκτυα πρόσβασης αποτελούνται κατά κύριο λόγο από χάλκινα ή ομοαξονικά καλώδια, οπτικές ίνες ή συνδυασμό αυτών. Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων καθώς και η ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρονται στο συνδρομητή εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέσο μετάδοσης. Στον Πιν.1.1 παρουσιάζονται συγκριτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών τύπων ασύρματων μέσων.

Μέσο μετάδοσης Χαρακτηριστικό	Χάλκινο καλώδιο	Ομοαξονικό καλώδιο	Οπτική ίνα
Ρυθμός μετάδοσης	Χαμηλοί/Μέτριοι	Μέτριοι/Υψηλοί	Υψηλοί/Πολύ υψηλοί
Μήκος καλωδίου	Μικρό/Μέτριο	Μέτριο	Μεγάλο
Διαθεσιμότητα	Πολύ μεγάλη	Μέτρια	Μέτρια
Πολυπλοκότητα διασύνδεσης	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή
Ασφάλεια από υποκλοπές	Μεσαία/Υψηλή	Μεσαία/Υψηλή	Υψηλή
Κόστος	Χαμηλό	Χαμηλό/Μέτριο	Υψηλό
Εξασθένιση σήματος	Μεγάλη	Μέτρια	Μικρή
Ευαισθησία σε θόρυβο	Μεγάλη	Μέτρια	Μικρή
Εύρος ζώνης μετάδοσης	Μικρό	Μέτριο	Μεγάλο
Ευκαμψία	Μέτρια/Μεγάλη	Μικρή/Μέτρια	Μέτρια/Μεγάλη

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά ενσύρματων μέσων μετάδοσης

1.2.2.1 Χάλκινα καλώδια

Τα χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες έχουν τη μορφή συνεστραμμένων ζευγών δύο μεμονωμένων χάλκινων συρμάτων (Twisted Pair - TP). Κατ' αυτό τον τρόπο, περιορίζονται οι παρεμβολές σε γειτονικά ζεύγη καθώς τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν οι δύο αγωγοί του χάλκινου ζεύγους αλληλοακυρώνονται. Επιπλέον, το χάλκινο ζεύγος καθίσταται περισσότερο εύρωστο στις εξωτερικές παρεμβολές, καθώς, λόγω της συστροφής, η πηγή της παρεμβολής επηρεάζει πρακτικά στον ίδιο βαθμό τους δύο αγωγούς (σε κάθε στροφή είναι πιο κοντά εναλλάξ στον ένα και στον άλλο αγωγό), με αποτέλεσμα, κατά τη λήψη του διαφορικού σήματος (διαφορά σημάτων των δύο αγωγών), η διαφορά των σημάτων παρεμβολών να είναι τελικά μηδενική (Σχ.1.4).

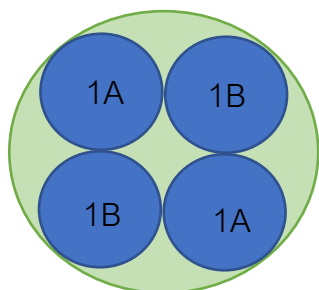


Σχήμα 1.4: Ακύρωση παρεμβολών λόγω συστροφής αγωγών χάλκινου ζεύγους

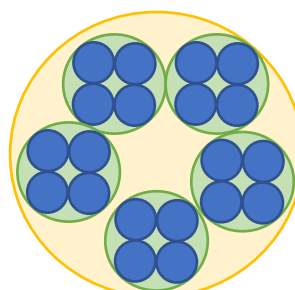
Οι τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο του συνεστραμμένου ζεύγους χωρίζονται σε κατηγορίες με κριτήριο το αν χρησιμοποιείται κάποιου είδους θωράκιση, είτε για το καλώδιο συνολικά είτε για κάθε συνεστραμμένο ζεύγος ξεχωριστά είτε και συνδυαστικά. Η θωράκιση μειώνει την επίδραση των παρεμβολών που προκαλεί το συνεστραμμένο ζεύγος αλλά και τις παρεμβολές που οφείλονται σε γειτονικά ζεύγη του. Τα χάλκινα καλώδια, αν και εύχρηστα και οικονομικά, είναι ευάλωτα σε θόρυβο, εισάγουν μεγάλη εξασθένηση ενώ η μέγιστη συχνότητα που μπορεί να μεταδοθεί μέσω αυτών είναι σχετικά μικρή.

Στον Πιν.1.2 φαίνονται οι διάφοροι τύποι χάλκινων καλωδίων, το εύρος ζώνης μετάδοσης που επιτρέπουν καθώς και οι εφαρμογές τους. Στον τύπο καλωδίου το γράμμα πριν από την κάθετο δηλώνει τον τύπο της θωράκισης του καλωδίου, ενώ μετά την κάθετο δηλώνει τη θωράκιση του κάθε συνεστραμμένου ζεύγους.

Στο ελληνικό δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιήθηκε η δομή της αστεροειδούς τετράδας (αστεροτετράδας). Η συστροφή τεσσάρων αγωγών σε αστερο-τετραδική διάταξη πραγματοποιείται έτσι ώστε οι αγωγοί που βρίσκονται διαγώνια να αποτελούν ζεύγος, όπως φαίνεται στο Σχ.1.5(α). Σε καλώδια που περιλαμβάνουν μέχρι 10 ζεύγη οι 5 τετράδες συστρέφονται απλώς μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχ.1.5(β). Σε καλώδια που περιλαμβάνουν περισσότερα από 10 ζεύγη, οι ήδη συνεστραμμένες τετράδες συστρέφονται ανά πέντε μεταξύ τους, αποσκοπώντας στη μικρότερη δυνατή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη.



(α) Αστεροτετράδα



(β) Καλώδιο 10 ζευγών

Σχήμα 1.5: Η δομή των καλωδίων του ελληνικού δικτύου πρόσβασης

Όνομα	Τύπος	Εύρος Ζώνης	Εφαρμογές	Παρατηρήσεις
Level 1		0.4 MHz	Τηλεφωνία και γραμμές modem	Δεν περιγράφεται από την EIA/TIA ¹
Level 2		4 MHz	Παλαιά συστήματα τερματικών π.χ.. IBM 3270	Δεν περιγράφεται από την EIA/TIA
Cat.3	UTP	16 MHz	10BASE-T and 100BASE-T4 Ethernet	Ακατάλληλο για ταχύτητες πάνω από 16 Mbit/s.
Cat.4	UTP	20 MHz	16 Mbit/s, Token Ring	Δε χρησιμοποιείται ευρέως
Cat.5	UTP	100 MHz	100BASE-TX & 1000BASE-T Ethernet	Ευρέως χρησιμοποιούμενο
Cat.5e	UTP	100 MHz	100BASE-TX & 1000BASE-T Ethernet	Ενισχυμένο καλώδιο Cat.5. Ευρέως χρησιμοποιούμενο
Cat.6	UTP	250 MHz	10GBASE-T Ethernet	Βελτιωμένο καλώδιο
Cat.6a	U/FTP, F/UTP	500 MHz	10GBASE-T Ethernet	Θωρακισμένο καλώδιο
Cat.7	F/FTP, S/FTP	600 MHz	Τηλεφωνία, CCTV, 1000BASE-TX στο ίδιο καλώδιο. 10GBASE-T Ethernet.	Πλήρως θωρακισμένο καλώδιο
Cat.7a	F/FTP, S/FTP	1000 MHz	Τηλεφωνία, CATV, 1000BASE-TX στο ίδιο καλώδιο. 10GBASE-T Ethernet.	Χρήση και των τεσσάρων ζευγών
Cat.8.1	U/FTP, F/UTP	1600-2000 MHz	Τηλεφωνία, CATV, 1000BASE-TX στο ίδιο καλώδιο. 40GBASE-T Ethernet.	Υπό Ανάπτυξη
Cat.8.2	F/FTP, S/FTP	1600-2000 MHz	Τηλεφωνία, CATV, 1000BASE-TX. Στο ίδιο καλώδιο 40GBASE-T Ethernet.	Υπό Ανάπτυξη

U = Unshielded (αθωράκιστο)
 F = Foil Shielding (θωράκιση φύλλου)
 S = Braided Shielding (θωράκιση πλέγματος)

Πίνακας 1.2 Τύποι χάλκινων καλωδίων και οι εφαρμογές τους

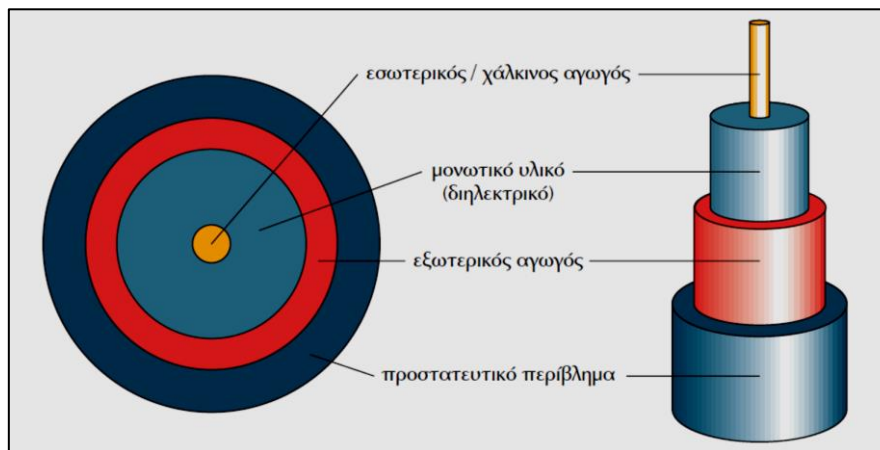
[9] [11] [12] [13]

¹ EIA/TIA: Είναι ο οργανισμός που διαμορφώνει τα πρότυπα της δομημένης καλωδίωσης (Electronic Industries Association and Telecommunications Industries Association)

1.2.2.2 Ομοαξονικό καλώδιο

Το ομοαξονικό καλώδιο αποτελείται από δύο αγωγούς οι οποίοι έχουν τον ίδιο άξονα. Γύρω από τον εξωτερικό αγωγό -συνήθως πυκνό σωληνωτό συρμάτινο πλέγμα- υπάρχει προστατευτικό και μονωτικό περίβλημα, ενώ, ανάμεσα στον εσωτερικό αγωγό -πυρήνας άκαμπτου χάλκινου καλωδίου που μεταφέρει το σήμα- και στον εξωτερικό, υπάρχει διηλεκτρικό υλικό για την απομόνωσή τους (Σχ.1.6). Λόγω του διηλεκτρικού, το μεταδιδόμενο σήμα δεν αλληλεπιδρά με άλλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που πιθανώς να υπάρχουν στο εξωτερικό του καλωδίου. Έτσι, το ομοαξονικό καλώδιο αποτελεί μια καλή επιλογή για τη μετάδοση σημάτων με χαμηλή ανοχή σε παρεμβολές. Επιπλέον, η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μετάδοση σημάτων μεγάλου εύρους ζώνης, άρα και υψηλές ταχύτητες.

Τα ομοαξονικά καλώδια, ενώ εμφανίζουν καλύτερες επιδόσεις από τα χάλκινα (λόγω της καλύτερης θωράκισης καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις σε υψηλότερες ταχύτητες από τα χάλκινα καλώδια), έχουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και είναι δύσχρηστα λόγω του μεγαλύτερου πάχους τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την καλωδιακή τηλεόραση, για τη μετάδοση RF και μικροκυματικών συχνοτήτων καθώς και σε τοπικά δίκτυα. [11] [14]



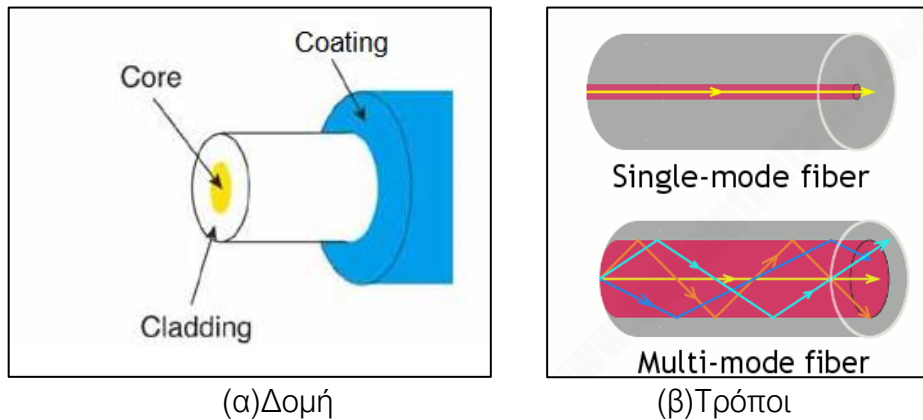
Σχήμα 1.6: Δομή ομοαξονικού καλωδίου

1.2.2.3 Οπτική ίνα

Η οπτική ίνα είναι ένα μέσο που επιτρέπει τη μετάδοση υψηλών συχνοτήτων μεγάλου εύρους ζώνης. Η βασική διαφορά των οπτικών ινών από τα χάλκινα και από τα ομοαξονικά καλώδια είναι ότι ο φορέας μετάδοσης της πληροφορίας είναι το φως. Μια οπτική ίνα αποτελείται από 3 μέρη: Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική ίνα που ονομάζεται πυρήνας (core) και είναι το τμήμα στο οποίο διαδίδεται το φως, την απλή ή πολλαπλή επικάλυψη (cladding), που είναι ένας ομόκεντρος με τον πυρήνα κύλινδρος και το περίβλημα (coating), που είναι ένα αδιαφανές πλαστικό (Σχήμα 1.7α). Τα καλώδια οπτικών ινών περιέχουν στο εσωτερικό τους δέσμες οπτικών ινών οι οποίες προστατεύονται από ένα εξωτερικό περίβλημα.

Η επιτυχία της οπτικής ίνας ως μέσο μετάδοσης οφείλεται σε μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα αρχή της φυσικής, σύμφωνα με την οποία όταν μια ακτίνα φωτός (H/M κύμα) περνά από ένα μέσο σε ένα άλλο διαθλάται (κάμπτεται). Για τιμές της γωνίας πρόσπτωσης μεγαλύτερες από ένα συγκεκριμένο όριο (κρίσιμη γωνία), η ακτίνα διαθλάται πίσω στο ίδιο μέσο χωρίς να διαφεύγει οπότε είναι δυνατό να ταξιδέψει μέσα σε αυτό για πολλά χιλιόμετρα χωρίς ουσιαστικές απώλειες.

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι μέσα σε μία οπτική ίνα μπορούν να ταξιδεύουν ταυτόχρονα πολλαπλές ακτίνες φωτός (H/M κύματα διαφορετικού μήκους κύματος), οι οποίες έχουν προσπέσει στο όριο μεταξύ πυρήνα και επικάλυψης υπό μία γωνία (διαφορετική για κάθε μήκος κύματος) μεγαλύτερη της κρίσιμης. Κάθε ακτίνα έχει διαφορετικό «τρόπο» (mode), οπότε μια οπτική ίνα με την προαναφερθείσα ιδιότητα ονομάζεται πολύτροπη (multimode). Στην περίπτωση που η διάμετρος της οπτικής ίνας μειωθεί αρκετά, τότε θα λειτουργεί ως αγωγός για τα κύματα και το φως θα διαδίδεται σε ευθεία γραμμή, δίνοντας έτσι μία μονότροπη ίνα (single-mode), όπως φαίνεται από το Σχ.1.7β.



Σχήμα 1.7: Δομή και «τρόποι» οπτικής ίνας

Οι οπτικές ίνες συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα χάλκινα καλώδια. Καταρχήν, έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης μετάδοσης. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής εξασθένησης, η χρήση επαναληπτών γίνεται ανά μεγαλύτερες αποστάσεις οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους. Ακόμη, δεν επηρεάζονται από διαταραχές του ρεύματος, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, απώλειες τάσης και διαβρωτικά χημικά στον αέρα. Επιπροσθέτως είναι λεπτές και ελαφριές, ενώ λόγω του ότι δε διαρρέει φως δεν υπόκεινται εύκολα σε υποκλοπές.

Από πλευράς μειονεκτημάτων, μπορούν να καταστραφούν εύκολα εάν καμφθούν και επιπλέον απαιτούν δύο ζώνες συχνοτήτων για την επίτευξη της αμφίδρομης μετάδοσης δεδομένων (καθώς η οπτική μετάδοση είναι φύσει μονόδρομη). Τέλος έχουν πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης και διασύνδεσης, με αποτέλεσμα η σταδιακή εισαγωγή τους στο δίκτυο πρόσβασης να είναι μονόδρομος. [4] [11] [15]

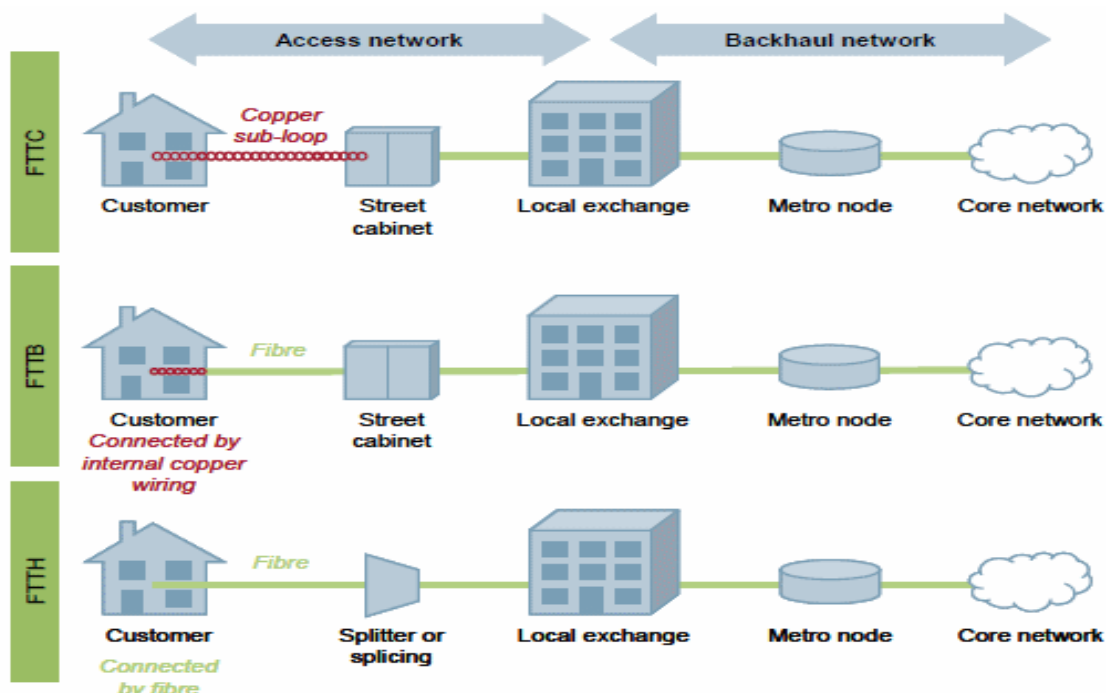
1.2.2.4 Δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς

Ως Δίκτυα Πρόσβασης Επόμενης Γενιάς (Next Generation Access - NGA) νοούνται ενσύρματα δίκτυα που αποτελούνται μερικώς ή στο σύνολό τους από οπτικά στοιχεία και είναι ικανά να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες πρόσβασης με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (όπως υψηλότερη διεκπεραιωτικότητα - throughput) σε σύγκριση με τις υπηρεσίες που παρέχουν τα υφιστάμενα δίκτυα χαλκού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα δίκτυα NGA είναι αποτέλεσμα αναβάθμισης ήδη υφιστάμενου χάλκινου ή ομοαξονικού δικτύου πρόσβασης.

Με κριτήριο την εγγύτητα της οπτικής ίνας προς τον συνδρομητή, προκύπτουν οι διάφορες αρχιτεκτονικές των δικτύων πρόσβασης επόμενης γενιάς (Πιν.1.3 και Σχ.1.8). Για την περιγραφή τους χρησιμοποιείται ο όρος “FTTx” (Fiber To The “x”) όπου το x συμβολίζει το σημείο όπου φθάνει η οπτική ίνα.

FTTx	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
FTTN (Node) FTTN (Neighborhood) FTTC (Cabinet) FTTS (Street)	Ορίζεται μέχρι περίπου 1500 μέτρα από τις εγκαταστάσεις του τελικού χρήστη. Οι οπτικές ίνες φθάνουν μέχρι το κουτί (cabinet) που εξυπηρετεί μια γειτονιά, και από εκεί μέχρι τον τελικό χρήστη χρησιμοποιείται η υπάρχουσα υποδομή (π.χ. χαλκός).
FTTc (Curb)	Ορίζεται μέχρι περίπου 300 μέτρα από τις εγκαταστάσεις του τελικού χρήστη. Από εκεί μέχρι τον τελικό χρήστη χρησιμοποιείται η υπάρχουσα υποδομή (π.χ. χαλκός).
FTTB (Building)	Η οπτική ίνα φθάνει στο οικοδομικό τετράγωνο ή στο κτήριο, αλλά όχι σε κάθε όροφο, γραφείο ή διαμέρισμα.
FTTH (Home) FTTO(Office)	Η οπτική ίνα φθάνει σε ιδιωτικά σπίτια / διαμερίσματα και γραφεία.
FTTP (Premises)	Η οπτική ίνα φθάνει σε κάθε τύπο κτηρίου (χρησιμοποιείται κάποιες φορές για να περιγράψει το FTTH ή/και το FTTB). Η βασική διαφορά από τα FTTN και FTTC είναι ότι η οπτική ίνα καλύπτει και το "last mile" μέχρι τον τελικό χρήστη.
FTTA (Apartment)	Περιλαμβάνει την οπτική ίνα από το υπόγειο της πολυκατοικίας στο διαμέρισμα.

Πίνακας 1.3: Αρχιτεκτονικές FTTx



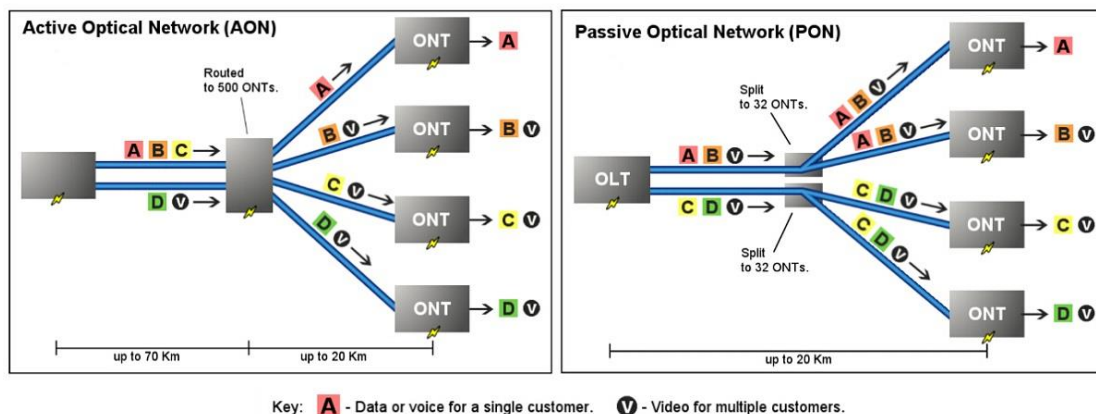
Σχήμα 1.8: Αρχιτεκτονικές FTTx

Δίκτυα σημείου-προς-σημείο/Δίκτυα σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία

Ανάλογα τώρα με το αν η οπτική ίνα διαμοιράζεται μεταξύ πολλών χρηστών ή συνδέει το χρήστη ατομικά με το δίκτυο κορμού τα οπτικά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε σημείου-προς-σημείο (PtP: Point to Point) και σε σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία (PtMP: Point to Multipont).

Στα δίκτυα σημείου-προς-σημείο μπορεί να εφαρμοστεί η αρχιτεκτονική τύπου “home run”, όπου ο τελικός χρήστης διαθέτει μία αποκλειστική για αυτόν οπτική ίνα από το αστικό κέντρο μέχρι το σπίτι του/το γραφείο του. Εναλλακτικά, εφαρμόζεται αρχιτεκτονική ενεργού δικτύου (Active Optical Network – AON), όπου κάθε χρήστης διαθέτει αποκλειστική οπτική ίνα μέχρι το σημείο όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ενεργός εξοπλισμός (συνήθως μεταγωγείς ethernet), ο οποίος μετάγει από εκεί και πέρα την κίνηση πολλών χρηστών προς το κυρίως δίκτυο (backbone).

Στην περίπτωση σημείου-προς-πολλαπλά-σημεία έχουμε αρχιτεκτονική παθητικού δικτύου (Passive Optical Network – PON) όπου χρησιμοποιούνται διατάξεις που δεν χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οπτικοί διαχωριστές (splitters) για να δώσουν τη δυνατότητα διαμοιρασμού μίας οπτικής ίνας σε πολλαπλούς χρήστες. Το τελευταίο ενεργό στοιχείο στην περίπτωση του PON βρίσκεται στο δίκτυο κορμού (backbone). [4] [16] [17]



Σχήμα 1.9: Ενεργητικό/Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

Δομή δικτύων FTTx

Ένα δίκτυο FTTx αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- OLT: Optical Line Termination (Οπτικός Τερματισμός Γραμμής). Το OLT αποτελεί την οπτική τερματική διάταξη διαφόρων PON δικτύων προς την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού παρόχου και είναι εγκατεστημένος στο σημείο παρουσίας του (Point-Of-Presence ή POP). Ο OLT είναι υπεύθυνος για τη διασύνδεση του FTTx με το υπόλοιπο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο (PSTN, IP, ATM, κλπ.). Στα δίκτυα FTTC, ο ενεργός εξοπλισμός στην αρχή του δικτύου είναι ένας οπτικός μεταγωγέας ethernet (optical ethernet switch) ή ένας δρομολογητής (router).
- ONU (ή και ONT): Optical Network Unit / Termination (Οπτική Τερματική Συσκευή). Οι ONU αποτελούν τις οπτικές τερματικές διατάξεις προς την πλευρά των πελατών, στις οποίες καταλήγει το FTTx δίκτυο. Σε κάθε ONU γίνεται η οπτικοηλεκτρονική μετατροπή και αποπολυπλεξία του οπτικού σήματος και παρέχονται οι υπηρεσίες προς τους πελάτες μέσω χάλκινων αγωγών. Οι ONU έχουν τη μορφή καμπινών (υπαίθριων ή εσωτερικού χώρου).

- **Οπτικό Δίκτυο:** Πρόκειται για την οπτική καλωδίωση που συνδέει την OLT με τις ONU. Η καλωδίωση γίνεται με καλώδιο οπτικών ινών², συνήθως προσαρμοσμένο για μεγάλη χωρητικότητα και μπορεί γενικά να έχει οποιαδήποτε τοπολογία: δακτυλίου, αστέρα ή δενδρική. Η οπτική καλωδίωση σχεδιάζεται έτσι ώστε οι πιθανοί κόμβοι του δικτύου να μην βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους συνδρομητές. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από τις τελικές ταχύτητες πρόσβασης που θα δοθούν.

1.2.2.5 Επικοινωνία μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος

Για τη μεταφορά δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το πλέον διαδεδομένο είδος καλωδίωσης: οι γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα στα σπίτια. Η χρήση των γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος για την επικοινωνία (Power Line Communication - PLC) είναι μία παλιά ιδέα, η οποία έχει αξιοποιηθεί από τις εταιρίες ηλεκτρισμού για την επικοινωνία με χαμηλές ταχύτητες όπως για τηλεμέτρηση ή για έλεγχο συσκευών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον για την επικοινωνία υψηλών ταχυτήτων μέσω των γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος.

Η βασική ευκολία που προσφέρει η χρήση των γραμμών ρεύματος, δηλαδή η αποστολή και λήψη δεδομένων με την απλή σύνδεση στην πρίζα τοποθετώντας με υπέρθεση το σήμα δεδομένων στο χαμηλής συχνότητας (50 ή 60Hz) ηλεκτρικό ρεύμα, αντισταθμίζεται από πρακτικές δυσκολίες. Η βασική δυσκολία έγκειται στο ότι η οικιακή καλωδίωση έχει πολύ κακή απόδοση στη μετάδοση δεδομένων, καθώς έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί εντελώς διαφορετικό σκοπό (το ρεύμα μεταφέρεται σε συχνότητες 50-60Hz ενώ τα σήματα δεδομένων υψηλότερης συχνότητας της τάξης των MHz εξασθενούν έντονα).

Επιπλέον, λόγω της ενεργοποίησης και της απενεργοποίησης των ηλεκτρικών συσκευών προκαλείται ηλεκτρικός θόρυβος σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, επηρεάζοντας δυσμενώς την ποιότητα των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Τέλος, η ηλεκτρική καλωδίωση λειτουργεί ως κεραία λόγω της απουσίας συστροφής των καλωδίων, με αποτέλεσμα να προκαλεί αλλά και να δέχεται πολλές και έντονες παρεμβολές. Ως εκ τούτου, για την ικανοποίηση των ρυθμιστικών διατάξεων, καθίσταται απαραίτητος ο αποκλεισμός ορισμένων αδειοδοτημένων συχνοτήτων όπως αυτές του ερασιτεχνικού ραδιοφώνου.

Παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει αυτός ο τρόπος μετάδοσης, πλέον είναι εφικτή η μετάδοση με ταχύτητες τουλάχιστον 100Mbps κάνοντας χρήση σχημάτων επικοινωνίας που είναι εύρωστα ως προς τις ριπές λαθών ενώ υπάρχει έντονη δραστηριότητα για την ανάπτυξη διεθνών προτύπων. Ακόμη, αποτελεί μία ιδιαίτερα δημοφιλή λύση για home networking³, με ρυθμούς έως 300Mbps. [4]

1.2.3 Ασύρματοι τρόποι μετάδοσης

Η ασύρματη μετάδοση βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και χρησιμοποιεί κεραίες για την εκπομπή και λήψη των σημάτων. Ανάλογα με το είδος και τον τρόπο πραγματοποίησης των ζεύξεων κατηγοριοποιούνται ως εξής:

² Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται η χρήση πολύτροπης ή μονότροπης ίνας

³ Η διασύνδεση όλων των συσκευών μίας οικίας μεταξύ τους για τη δημιουργία ενός οικιακού δικτύου

- Ζεύξεις σημείου προς σημείου, οι οποίες πραγματοποιούνται μεταξύ δύο σημείων.
- Ζεύξεις ευρείας κάλυψης, στις οποίες το σήμα μεταδίδεται ταυτόχρονα σε πολλούς αποδέκτες διασπαρμένους σε ευρεία γεωγραφική περιοχή.
- Ζεύξεις οπτικής επαφής όπου η διάδοση του επιφανειακού κύματος δεν υπερβαίνει τη μέγιστη απόσταση οπτικής επαφής.
- Ζεύξεις πέραν του ορίζοντα, όπου η διάδοση του επιφανειακού κύματος υπερβαίνει τη μέγιστη απόσταση οπτικής επαφής.
- Κινητές ζεύξεις, όπου είτε ο πομπός είτε ο δέκτης είναι κινητοί. [18]

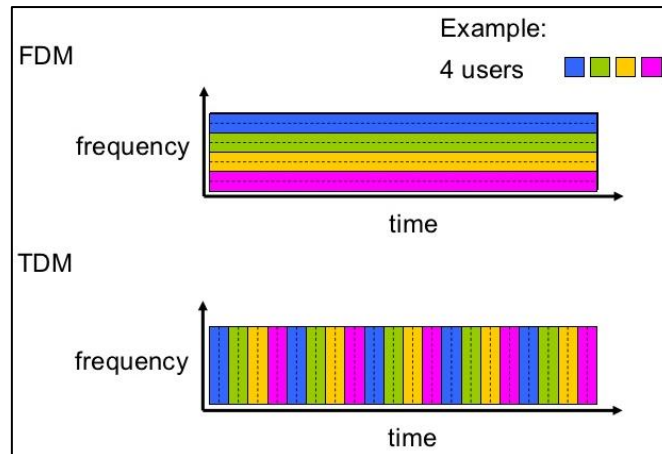
1.2.4 Η πολύπλεξη ως τεχνική μετάδοσης

Οι τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες αναπτύχθηκαν -και συνεχίζουν να αναπτύσσονται- με στόχο την αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, την υλοποίηση φθηνών και απλών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και φυσικά τη ταχεία και αξιόπιστη μετάδοση της πληροφορίας.

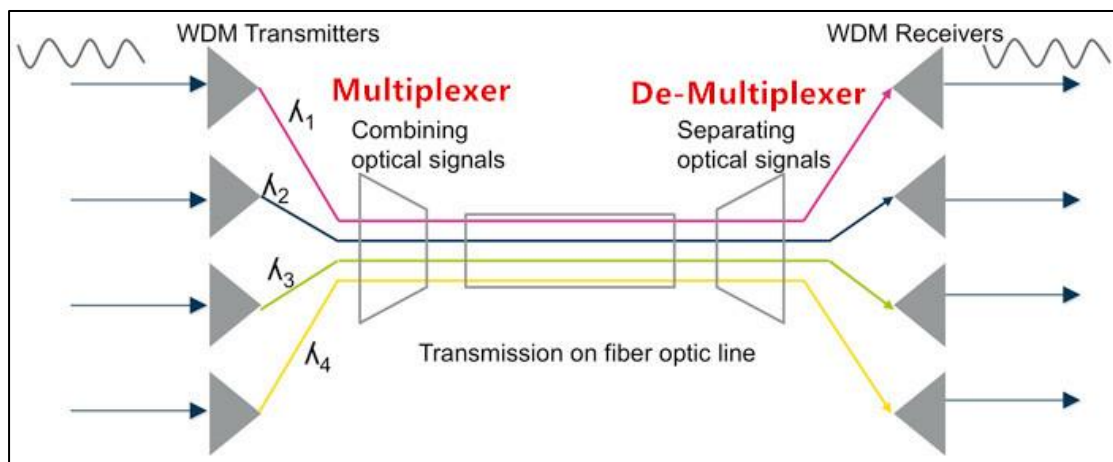
Η πολύπλεξη είναι μία τεχνική κατά την οποία πολλά σήματα (αναλογικά ή ψηφιακά) συνδυάζονται και δημιουργούν ένα σήμα με μεγαλύτερο εύρος ζώνης το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του διαύλου, καθώς πολλοί χρήστες μπορούν να τον αξιοποιούν ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές πολύπλεξης κατηγοριοποιούνται:

- Στην πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή του όλο το εύρος ζώνης για μία σύντομη χρονική διάρκεια. Αποδίδεται δηλαδή περιοδικά σε κάθε χρήστη μία χρονοθυρίδα (time slot), κατά τη διάρκεια της οποίας μεταδίδει την πληροφορία του και οι χρονοθυρίδες όλων των χρηστών δημιουργούν μία ενιαία ροή πληροφορίας. Η τεχνική αυτή απαιτεί ακριβή συγχρονισμό μεταξύ όλων των χρηστών.
- Στην πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing – FDM) κάθε χρήστης έχει στη διάθεσή του ένα τμήμα του διαθέσιμου εύρους ζώνης καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσης. Μετατοπίζοντας φασματικά το περιεχόμενό τους, οι χρήστες τελικά καταλαμβάνουν διαδοχικές και μη επικαλυπτόμενες ζώνες του διαθέσιμου φάσματος, οπότε προκύπτει ένα σήμα με πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το ατομικό εύρος ζώνης των πολυπλεγμένων σημάτων.
- Στην πολύπλεξη με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM), πολλαπλοί χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα την ίδια οπτική ίνα για τη μετάδοση ανεξάρτητων οπτικών σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος. Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η πολύπλεξη WDM μιας οπτικής ζεύξης ισοδυναμεί με την πολύπλεξη FDM μιας ηλεκτρομαγνητικής ζεύξης.

Εκτός των ανωτέρω τεχνικών, υπάρχουν και άλλα είδη πολύπλεξης, όπως η πολύπλεξη με διαίρεση χώρου (Code Division Multiplexing - CDM) και η πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου και μήκους κύματος (Time Wavelength Division Multiplexing - TWDM), που χρησιμοποιείται στα παθητικά οπτικά δίκτυα επόμενης γενιάς (Next Generation Passive Optical Network 2 - NG-PON2). Η πολύπλεξη με διαίρεση μήκους κύματος χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων στην κάτω ζεύξη, ενώ η μετάδοση με διαίρεση χρόνου χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων στην άνω ζεύξη. Από τον συνδυασμό των δύο τεχνικών προκύπτει το όνομα TWDM.



Σχήμα 1.10: Πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου και συχνότητας



Σχήμα 1.11: Πολύπλεξη μήκους κύματος

1.2.4.1 Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Χρόνου

Η αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing – TDD) είναι μία τεχνική μετάδοσης που εξομοιώνει την πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία κάνοντας χρήση ημιαμφίδρομων συνδέσμων και πρόκειται για μία ειδική εφαρμογή της πολύπλεξης διαίρεσης χρόνου. Τα δύο άκρα μιας ζεύξης χρησιμοποιούν εναλλάξ για ένα μικρό χρονικό διάστημα το δίαυλο μεταδίδοντας την πληροφορία τους, αξιοποιώντας την ίδια φέρουσα συχνότητα. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής έγκειται στη δυνατότητα προσαρμογής του ποσοστού του χρόνου που ο δίαυλος χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της άνω και της κάτω ζεύξης (άρα στη δυνατότητα προσαρμογής των αντίστοιχων ρυθμών μετάδοσης).

1.2.4.2 Αμφιδρόμηση Διαίρεσης Συχνότητας

Η αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplexing – FDD) είναι μία ακόμη τεχνική μετάδοσης που εξομοιώνει την πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία κάνοντας χρήση ημιαμφίδρομων συνδέσμων και πρόκειται για μία ειδική εφαρμογή της πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση τα δύο άκρα μιας ζεύξης χρησιμοποιούν (ταυτόχρονα) διαφορετική ζώνη συχνοτήτων για να μεταδώσουν την πληροφορία τους. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ανθεκτικότητά της ως προς τις παρεμβολές μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης λόγω της χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων.[1] [8]

1.3 Αίτια υποβάθμισης σήματος στις ενσύρματες επικοινωνίες

1.3.1 Κατηγοριοποίηση παραγόντων

Τόσο κατά τη μετάδοση όσο και κατά την επεξεργασία υπεισέρχονται παράγοντες οι οποίοι οδηγούν στην αλλοίωση των σημάτων, με αποτέλεσμα το σήμα λήψης που φθάνει στο δέκτη να είναι ένα παραμορφωμένο αντίγραφο του αρχικού σήματος. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι εσωτερικοί (ενδογενείς) ή εξωτερικοί (εξωγενείς) του τηλεπικοινωνιακού συστήματος που μελετάται και να οφείλονται είτε σε φυσικά φαινόμενα είτε σε ανθρωπίνες δραστηριότητες.

Εναλλακτικά, τα αίτια υποβάθμισης μπορούν να διαχωριστούν σε αίτια περιορισμού ικανότητας και σε αίτια περιορισμού επίδοσης. Τα αίτια υποβάθμισης ικανότητας μεταβάλλονται αργά με το χρόνο ενώ η επίδρασή τους, έως ένα βαθμό, είναι προβλέψιμη. Ωστόσο, η επίδραση των παραγόντων περιορισμού της επίδοσης δεν μπορεί να προβλεφθεί, διότι οι παράγοντες αυτοί μεταβάλλονται τοπικά κατά τυχαίο τρόπο. Ο μόνος τρόπος εξασφάλισης αποδεκτής επίδοσης είναι η θέσπιση ορίων ασφαλείας μέσω κατάλληλων κανόνων.

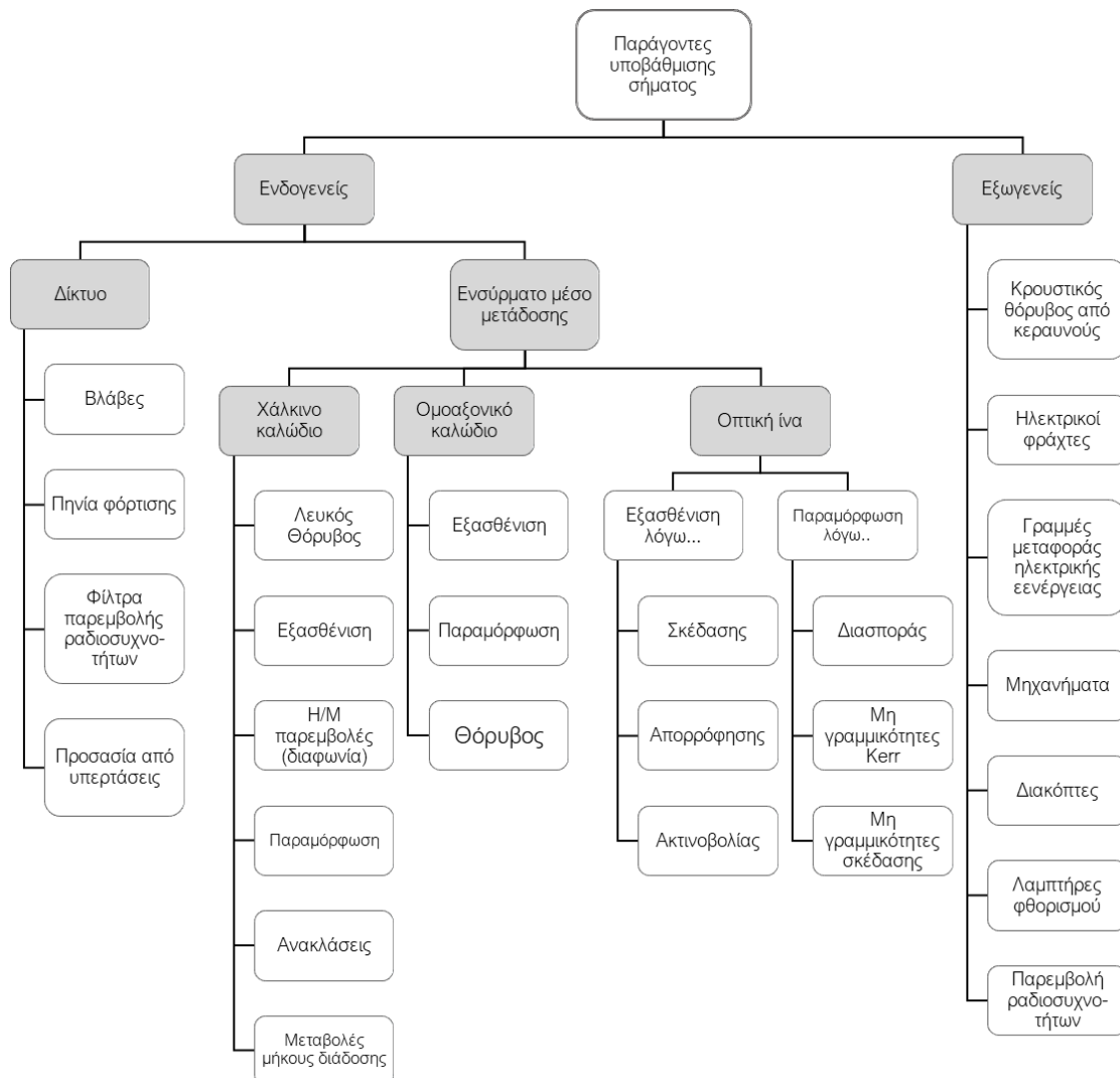
Στο Σχ.1.12 παρουσιάζονται ονομαστικά οι παράγοντες υποβάθμισης του σήματος στις ενσύρματες επικοινωνίες. Με γκρίζο επισημαίνονται οι διάφορες κατηγοριοποιήσεις, ενώ με λευκό όλοι οι παράγοντες.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράγοντες υποβάθμισης της ποιότητας του σήματος που οφείλονται στο χάλκινο καλώδιο ως μέσο διάδοσης. Ενδεικτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι αν $x(t)$ είναι το μεταδιδόμενο σήμα, τότε το λαμβανόμενο σήμα $y(t)$ έχει τη μορφή:

$$y(t) = a * \tilde{x}(t) + i(t) + n(t) \quad (1.1)$$

όπου $a < 1$ ο παράγοντας που δηλώνει την εξασθένηση του σήματος, $\tilde{x}(t)$ το παραμορφωμένο σήμα, $i(t)$ οι παρεμβολές και $n(t)$ ο θόρυβος. Από τη σχέση (1.1) γίνεται εύκολα κατανοητό ότι το σήμα λήψης είναι μια οντότητα που έχει υποστεί την επίδραση ποικιλίας δυσμενών παραγόντων. Ως αποτέλεσμα, η «εξαγωγή» του αρχικού σήματος από το σήμα λήψης αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, η οποία ανάλογα με τις συνθήκες μπορεί να είναι έως και ακατόρθωτη.

[1] [9]



Σχήμα 1.12: Παράγοντες υποβάθμισης σήματος

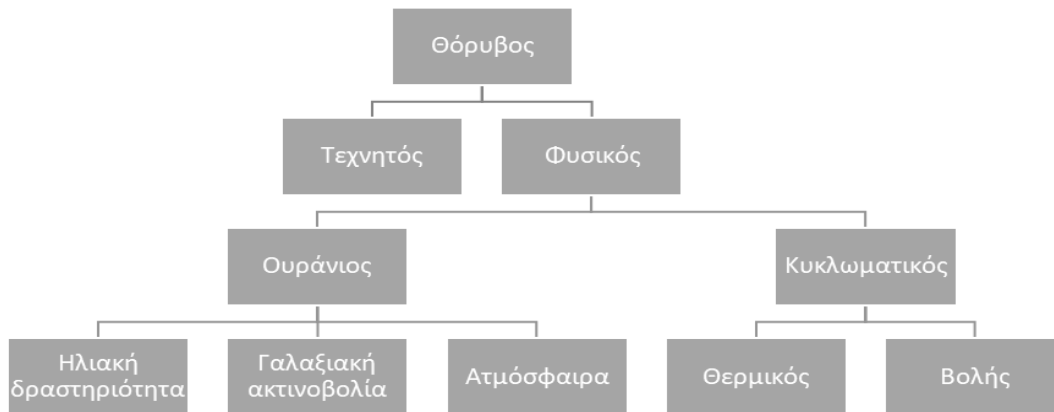
1.3.2 Θόρυβος

1.3.2.1 Είδη θορύβου

Όπως αναφέρθηκε στην Εν.1.1.1 ο θόρυβος $n(t)$ αποτελεί μια ανεπιθύμητη οντότητα ίδιας φύσης με το σήμα που δυσχεραίνει την επίδοση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος και αποτελεί βασικό παράγοντα της αξιοπιστίας του. Ο θόρυβος μπορεί να οφείλεται σε πηγές εξωτερικές ή εσωτερικές ως προς το σύστημα ενδιαφέροντος και ταξινομείται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, το φυσικό και τον τεχνητό θόρυβο.

Ο τεχνητός θόρυβος οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα και προκαλείται από μηχανήματα και συσκευές. Συνήθως είναι κρουστικής μορφής και εξασθενεί γρήγορα. Αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά με τη χρήση καταστολέων θορύβου στα μηχανήματα και τις συσκευές καθώς επίσης και μέσω κατάλληλων αλγορίθμων του συστήματος μετάδοσης.

Ο φυσικός θόρυβος διακρίνεται στον ουράνιο θόρυβο και τον κυκλωματικό θόρυβο. Ο ουράνιος θόρυβος, η αντιμετώπιση του οποίου απασχολεί μόνο τις ασύρματες επικοινωνίες, οφείλεται στην ηλιακή ατμόσφαιρα, τη γαλαξιακή ακτινοβολία και την ατμόσφαιρα και εισέρχεται στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα μέσω της κεραίας λήψης. Ο κυκλωματικός θόρυβος, που αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή θορύβου για ένα δέκτη, οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων σε ένα παθητικό στοιχείο (θερμικός θόρυβος) και στην τυχαία διακύμανση παραγωγής φορέων σε ένα ενεργό στοιχείο (θόρυβος βολής).



Σχήμα 1.13: Ταξινόμηση ειδών θορύβου

1.3.2.2 Παράμετροι περιγραφής θορύβου

Ο θόρυβος περιγράφεται μέσω της ισχύος του N , η οποία μαθηματικά δίνεται από τη σχέση (1.2).

$$N = \frac{\overline{n^2(t)}}{R} \quad (1.2)$$

Στο πεδίο της συχνότητας, ο θόρυβος περιγράφεται μέσω της δίπλευρης φασματικής πυκνότητας ισχύος (Power Spectral Density – PSD) $S_n(f)$, η οποία δείχνει πώς κατανέμεται η ισχύς του θορύβου στις διάφορες συχνότητες και συνδέεται με την ισχύ του θορύβου μέσω της σχέσης

$$N = 2 * \int_{f_c - \frac{\Delta f}{2}}^{f_c + \frac{\Delta f}{2}} S_n(f) df \quad (1.3)$$

όπου f_c είναι η κεντρική συχνότητα του φάσματος του θορύβου και Δf το εύρος ζώνης του.

Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο μέγεθος που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR) που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του επιθυμητού σήματος S προς την ισχύ του θορύβου N που το συνοδεύει στο ίδιο εύρος ζώνης συχνοτήτων και εκφράζεται συνήθως σε dB μέσω της σχέσης

$$SNR = \log_{10}(S/N) \quad (1.4)$$

Αξίζει να διευκρινιστεί η διαφορά μεταξύ του SNR το οποίο μπορεί να μετρηθεί και να εκτιμηθεί σε διάφορα σημεία μίας ζεύξης, του SNR κατωφλίου (SNR Threshold - SNR_{TH}) που είναι η ελάχιστη τιμή του SNR που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος και του περιθωρίου του SNR (SNR Margin – SNR_M) που περιγράφει τον πρόσθετο θόρυβο που μπορεί να αντιμετωπίσει η ζεύξη διατηρώντας σταθερό το ρυθμό μετάδοσης και το ποσοστό λαθών (Bit Error Ratio -BER).

Το θεώρημα των Hartley-Shannon

Σύμφωνα με το θεώρημα των Hartley-Shannon, η χωρητικότητα ενός καναλιού C (ισοδύναμα ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτό το κανάλι) πεπερασμένου εύρους ζώνης B που χαρακτηρίζεται από προσθετικό θόρυβο Gauss δίνεται από τη σχέση:

$$C = B * \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (1.5)$$

Το θεώρημα αυτό αν και περιορίζεται για την περίπτωση διαύλου AWGN (Εν. 1.3.2.3), μπορεί να εφαρμοστεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, αφού στα περισσότερα συστήματα τηλεπικοινωνιών το κανάλι μπορεί να μοντελοποιηθεί από ένα κανάλι τύπου Gauss.

Από το ανωτέρω θεώρημα προκύπτουν δύο πολύ σημαντικά συμπεράσματα. Πρώτον, μέσα από αυτό προκύπτει η μέγιστη δυνατή τιμή του ρυθμού μετάδοσης αξιόπιστων δεδομένων. Έτσι, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος πρέπει να αποσκοπεί η χωρητικότητα C να πλησιάζει την τιμή της εξίσωσης (1.5) υπό αποδεκτό ρυθμό σφαλμάτων. Δεύτερον, φαίνεται καθαρά η σχέση ανταλλαγής (tradeoff) μεταξύ εύρους ζώνης, σηματοθορυβικού λόγου και ρυθμού μετάδοσης. Για παράδειγμα, η σχέση που υπάρχει μεταξύ εύρους ζώνης και σηματοθορυβικού λόγου είναι αντίστροφη. Ως εκ τούτου, για να μπορέσει να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός μετάδοσης, όταν μειώνεται ένα από τα δύο αυτά μεγέθη, τότε πρέπει να αυξάνεται το άλλο.

Πρέπει να αναφερθεί ότι, στις τηλεπικοινωνίες, κάθε πρόβλημα σχεδίασης ανάγεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων που θα οδηγήσουν στη βέλτιστη απόδοση του συστήματος με το μικρότερο δυνατό κόστος. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη διαχείριση της σχέσης ανταλλαγής, ένα παράδειγμα της οποίας αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Με δεδομένο ότι η βελτίωση της τιμής μίας παραμέτρου συνεπάγεται τη χειροτέρευση κάποιας ή κάποιων άλλων, δεν μπορεί να επιτευχθεί κανένας στόχος χωρίς κόστος, τεχνολογικό ή οικονομικό. Για παράδειγμα, για τη μείωση του ποσοστού λαθών είναι απαραίτητη είτε η αύξηση του εύρους ζώνης μετάδοσης που αποτελεί πολύτιμο και ακριβό πόρο είτε η μείωση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης.

1.3.2.3 Λευκός θόρυβος

Η πλήρης ονομασία του είναι *λευκός προσθετικός θόρυβος Gauss* (Additive White Gaussian Noise - AWGN). Αποτελεί ανθρώπινη επινόηση με στόχο να περιγράψει την επίπτωση τυχαίων διαδικασιών. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις λευκού θορύβου αποτελούν ο θερμικός θόρυβος και ο θόρυβος που προέρχεται από την ηλιακή δραστηριότητα και την κοσμική ακτινοβολία. Χαρακτηρίζεται ως λευκός καθώς έχει την ισχύ του ισοκατανεμημένη σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων, ως προσθετικός γιατί προστίθεται στο επιθυμητό σήμα και Γκαουσιανός καθώς ως τυχαία διαδικασία ακολουθεί κανονική κατανομή (ή αλλιώς Γκαουσιανή κατανομή) με μηδενική μέση τιμή.

1.3.2.4 Ζωνοπερατός θόρυβος

Ως ζωνοπερατός θόρυβος ορίζεται ο θόρυβος που διαθέτει μη μηδενική φασματική πυκνότητα ισχύος σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων W συμμετρικό περί μη μηδενική κεντρική συχνότητα ω_0 . Στην περίπτωση όπου το εύρος ζώνης του θορύβου είναι πολύ μικρότερο από την κεντρική συχνότητα ($W \ll \omega_0$), τότε ο ζωνοπερατός θόρυβος χαρακτηρίζεται επιπλέον ως θόρυβος στενής ζώνης. Τέλος, στην περίπτωση όπου ο ζωνοπερατός θόρυβος έχει άπειρο εύρος ζώνης μετατρέπεται οριακά σε λευκό θόρυβο.

[1] [19] [20]

1.3.3 Εξασθένηση στα χάλκινα καλώδια

Οι παράγοντες που καθορίζουν την εξασθένηση είναι η συχνότητα λειτουργίας, το υλικό, η διατομή και το μήκος του αγωγού ή των αγωγών. Συγκεκριμένα, η εξασθένηση στα χάλκινα ζεύγη του τηλεφωνικού δικτύου οφείλεται σε δύο παράγοντες, το επιδερμικό φαινόμενο και την απώλεια του διηλεκτρικού υλικού.

Σύμφωνα με το επιδερμικό φαινόμενο, αύξηση της συχνότητας λειτουργίας προκαλεί ανομοιογενή κατανομή της πυκνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επί της διατομής του αγωγού, εξαιτίας της οποίας η ενεργός διατομή του αγωγού μειώνεται στις υψηλές συχνότητες, οπότε αυξάνονται οι απώλειες.

Η απορρόφηση μέρους της ισχύος του σήματος από το μονωτικό υλικό που περιβάλλει τον αγωγό προκαλεί την απώλεια διηλεκτρικού. Το μέγεθος της απώλειας αυτής εξαρτάται από το είδος και την ποιότητα του διηλεκτρικού και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η εξασθένηση περιγράφεται σε dB μέσω της σχέσης (1.6), όπου η $H(f)$ είναι η μαθηματική έκφραση της συνάρτησης μεταφοράς του διαύλου και περιγράφει τη συμπεριφορά του καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα.

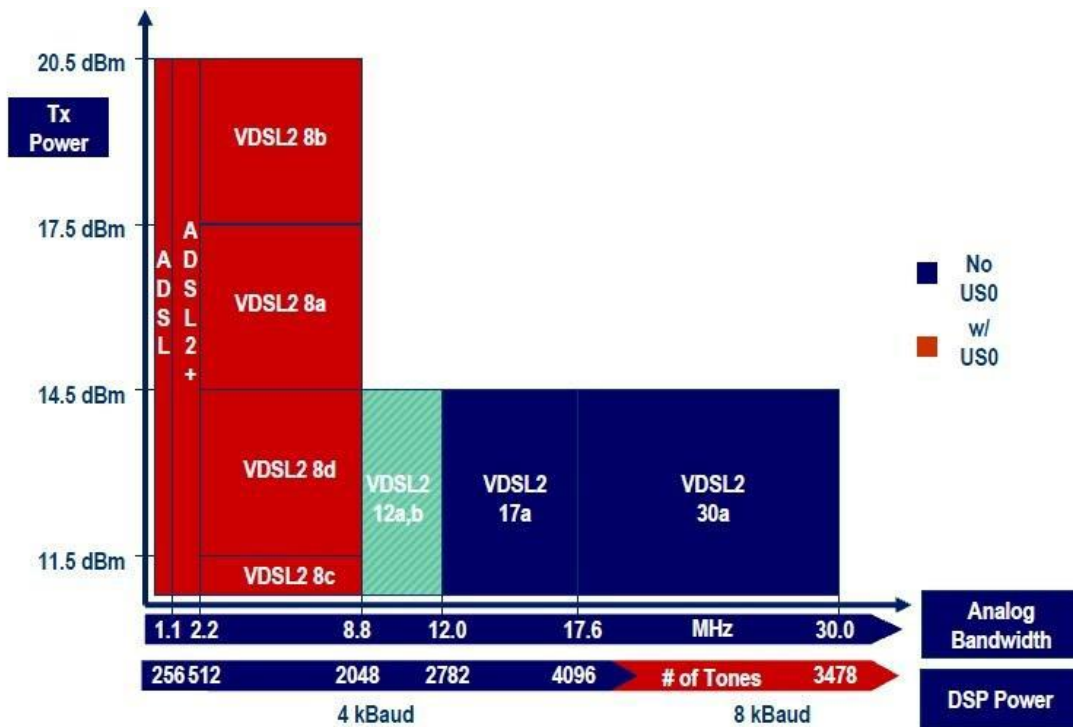
$$L = 10 * \log_{10} |H(f)|^2 \quad (1.6)$$

[9]

1.3.4 Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή αλλιώς η H/M διαφωνία (crosstalk) αναφέρεται στην ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μεταξύ υψίσυχνων σημάτων που μεταδίδονται σε γειτονικά ζεύγη. Οφείλεται στη σύζευξη των πεδίων που προκαλούνται περί τα αντίστοιχα ζεύγη συνεστραμμένων αγωγών και εξαρτάται από το μήκος κατά το οποίο συνυπάρχουν τα αμοιβαίως παρεμβάλλοντα σήματα καθώς και από τη συχνότητα.

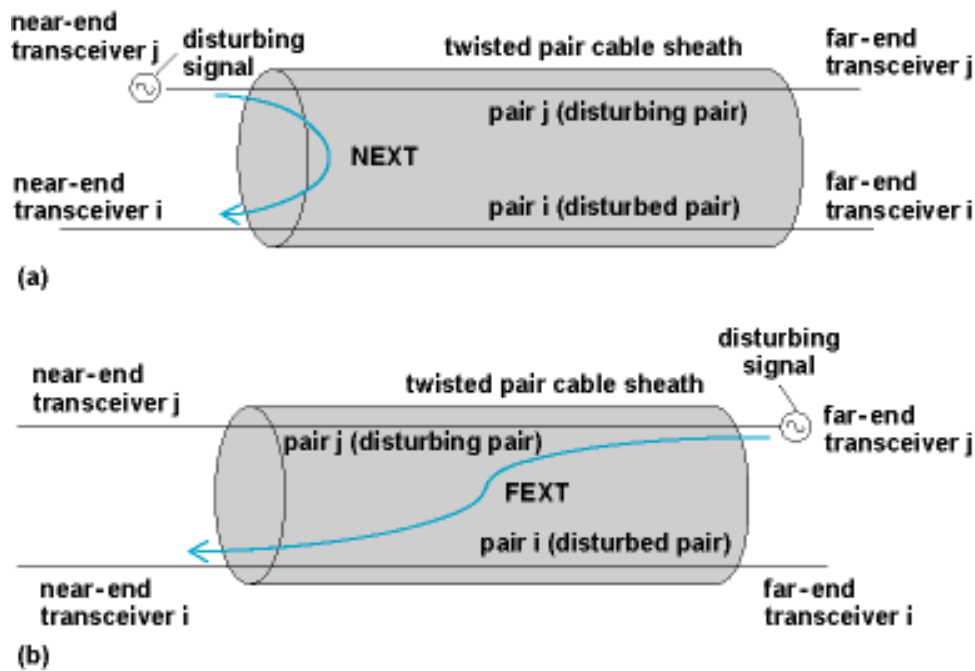
Είναι φανερό ότι τεχνολογίες με επικαλυπτόμενες φασματικές περιοχές παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Ειδικότερα, τεχνολογίες με υψηλότερη ισχύ εκπομπής παρεμβάλλουν εντονότερα σε τεχνολογίες με χαμηλή ισχύ εκπομπής όταν αυτές πραγματοποιούνται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ο μηχανισμός της παρεμβολής γίνεται άμεσα αντιληπτός παρατηρώντας στο Σχ.1.14 τη φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος το οποίο κάθε τεχνολογία ευρυζωνικής πρόσβασης xDSL εγγχεί στο μέσο διάδοσης.



Σχήμα 1.14: Φασματική πυκνότητα ισχύος τεχνολογιών DSL

Τηλεδιαφωνία – παραδιαφωνία

Όταν η παρεμβολή προκαλείται στο αντίθετο άκρο της γραμμής μετάδοσης από αυτό όπου εγχέεται το σήμα, η παρεμβολή ονομάζεται τηλεδιαφωνία (Far End Crosstalk - FEXT). Όταν το σημείο έγχυσης και το σημείο πρόκλησης της παρεμβολής ταυτίζονται, η παρεμβολή ονομάζεται παραδιαφωνία (Near End Crosstalk - NEXT).



Σχήμα 1.15: Τηλεδιαφωνία - παραδιαφωνία

Επιπλέον, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή μπορεί να προκαλείται είτε μεταξύ όμοιων τεχνολογιών (self-crosstalk), είτε μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών (alien-crosstalk). Σημαντικό χαρακτηριστικό των παρεμβολών είναι ότι δρουν αθροιστικά. Συνεπώς, το μέγεθος της συνολικής παρεμβολής εξαρτάται από το ποσοστό πλήρωσης του καλωδίου. Κυρίαρχη είναι η παρεμβολή μεταξύ αγωγών του ίδιου καλωδίου, η οποία εξαρτάται και από τη σχετική θέση εντός του καλωδίου των ζευγών συνεστραμμένων αγωγών, που παρεμβάλλονται αμοιβαία. Αποδεικνύεται ότι η παρεμβολή είναι αρκετά ισχυρότερη μεταξύ σημάτων των οποίων τα συνεστραμμένα ζεύγη βρίσκονται στην ίδια αστεροτετράδα. Επίσης, η εξασθένηση στην οποία υπόκειται το σήμα παρεμβολής λόγω της διάδοσής του στο χάλκινο μέσο καθιστά, για μεγάλα μήκη βρόχου, την τηλεδιαφωνία λιγότερο επιβλαβή από την παραδιαφωνία. Ωστόσο, για ορισμένα μήκη βρόχου, τα δύο είδη παρεμβολής θεωρούνται εξίσου ισχυρά και επιβαρυντικά. [9]

1.3.5 Παραμόρφωση

Η παραμόρφωση κατά τη μετάδοση οφείλεται στην εξάρτηση των διαύλων από τη συχνότητα, που οδηγεί σε διαφορετική μεταχείριση των φασματικών συνιστωσών των σημάτων. Στις ενσύρματες επικοινωνίες η παραμόρφωση κατά τη μετάδοση αποτελεί κύριο παράγοντα αλλοίωσης του σήματος και οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι η καθυστέρηση ομάδας που εμφανίζει ένα ενσύρματο μέσο, δηλαδή η διαφορετική ταχύτητα μετάδοσης των φασματικών συνιστωσών του σήματος. Ο δεύτερος είναι η παραμόρφωση πλάτους, η διαφορετική εξασθένηση που εμφανίζει το μέσο στις διάφορες συχνότητες.

Επίσης, παραμόρφωση υφίσταται ένα σήμα και κατά την επεξεργασία του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση φίλτρων που αποκόπτουν τμήματα του φασματικού περιεχομένου του σήματος (παραδείγματος χάριν αποκοπή φασματικών «ουρών» για να μην υπάρχει φασματική επικάλυψη με κάποια άλλο σήμα που καταλαμβάνει πολύ κοντινές συχνότητες). [9]

1.3.6 Ανακλάσεις

Όταν δεν υπάρχει κατάλληλος τερματισμός της γραμμής μεταφοράς, κατά την πρόσπτωση του H/M κύματος σε αυτό δημιουργείται ένα ανακλώμενο H/M κύμα, το οποίο όχι μόνο φέρει τμήμα της ισχύος που ιδανικά θα ελάμβανε ο τερματισμός (άρα επιφέρει επιπλέον απώλεια ισχύος) αλλά μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα μετάδοσης. Με κατάλληλο τερματισμό των γραμμών μεταφοράς μπορεί να εξαιρεθεί η επίδραση των ανακλάσεων. [1]

1.3.7 Μεταβολές μήκους διάδοσης

Συχνά, οι μεταβολές της θερμοκρασίας επιφέρουν μεταβολή του μήκους ενός ενσύρματος μέσου μετάδοσης. Η μείωση του μήκους επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης, ενώ η αύξηση οδηγεί σε μείωση του. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να προκληθεί πρόβλημα στο συγχρονισμό μεταξύ πομπού και δέκτη. [1]

1.4 Βιβλιογραφία

- [1] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ, Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_\(telecommunications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_(telecommunications))
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- [4] Χρήστος Ι. Μπούρας, “Ευρυζωνικές τεχνολογίες”, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πάτρα 2009
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Network_topology
- [6] <https://sites.google.com/site/eisagogestadiktyayypologiston1/home/eide-diktyon>
- [7] http://anamorfosi.teicm.gr/ekp_yliko/e-notes/Data/commnets/main.htm#id109
- [8] Andrew S. Tanenbaum – David J. Wetherall, “Δίκτυα υπολογιστών», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2011
- [9] Λόουελ – Παναγιώτης Γ. Δήμος, «Διαχείριση Φάσματος και Έγχυσης Ισχύος στο Ελληνικό Δίκτυο Πρόσβασης Χαλκού», Διπλωματική εργασία
- [10] <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>
- [11] Κ. Αρβανίτης – Γ. Κολυβάς – Σ. Ούτσιος, «Τεχνολογία δικτύων επικοινωνιών», ΙΤΥΕ Διόφαντος, 2012
- [12] <https://slideplayer.gr/slide/2023884/>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted_pair
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial_cable
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber
- [16] <http://moxdfendu0.tripod.com/Fiber%20to%20the%20home%20architecture.htm>
- [17] «ΕΝΣΥΡΜΑΤΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΕΓΧΥΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ», Παρουσίαση από την ΕΕΤΤ στο ΕΜΠ, 2016
- [18] Χ. Καψάλης – Π. Κωπτής, «Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις», Εκδόσεις Τζιόλα, 2011
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_white_Gaussian_noise
- [20] http://moag.phys.uoa.gr/moag_gr/sites/default/files/moag_files/Telecom_Chapter_5.pdf

2 ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

2.1 Ευρυζωνικότητα

Η υπηρεσία που χειρίζεται πολλούς τύπους μέσων και τους παρουσιάζει στο χρήστη συγχρονισμένους ονομάζεται υπηρεσία πολυμέσων. Οι απαιτήσεις που συνεπάγεται η υποστήριξη αυτού του είδους υπηρεσιών οδήγησαν στην ανάπτυξη της ευρυζωνικότητας, η οποία αποτελεί συνδυασμό υποδομής και ψηφιακών υπηρεσιών που προσφέρουν στον πολίτη πολλές δυνατότητες.

Ως ευρυζωνικότητα ορίζεται με ευρεία έννοια ως το προηγμένο, εφικτό και καινοτόμο από πολιτική, κοινωνική, οικονομική και τεχνολογική άποψη περιβάλλον αποτελούμενο από:

- την παροχή γρήγορων συνδέσεων στο Διαδίκτυο σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, με ανταγωνιστικές τιμές (με τη μορφή καταναλωτικού αγαθού), χωρίς εγγενείς περιορισμούς στα συστήματα μετάδοσης και τον τερματικό εξοπλισμό των επικοινωνούντων άκρων
- την κατάλληλη δικτυακή υποδομή που: α) επιτρέπει την κατανομημένη ανάπτυξη υπαρχόντων και μελλοντικών δικτυακών εφαρμογών και πληροφοριακών υπηρεσιών, β) παρέχει τη δυνατότητα αδιάλειπτης σύνδεσης των χρηστών σε αυτές γ) ικανοποιεί τις εκάστοτε ανάγκες των εφαρμογών σε εύρος ζώνης, αναδραστικότητα και διαθεσιμότητα, και δ) είναι ικανή να αναβαθμίζεται συνεχώς και με μικρό επιπλέον κόστος ώστε να εξακολουθεί να ικανοποιεί τις ανάγκες όπως αυτές αυξάνονται και εξελίσσονται με ρυθμό και κόστος που επιτάσσονται από την πρόοδο της πληροφορικής και της τεχνολογίας επικοινωνιών
- τη δυνατότητα του πολίτη να επιλέγει: α) ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές σύνδεσης που ταιριάζουν στον εξοπλισμό του, β) μεταξύ διαφόρων δικτυακών εφαρμογών και γ) μεταξύ διαφόρων υπηρεσιών πληροφόρησης και ψυχαγωγίας και με πιθανή συμμετοχή του ίδιου του πολίτη στην παροχή περιεχομένου, εφαρμογών και υπηρεσιών
- το κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο αποτελούμενο από πολιτικές, μέτρα, πρωτοβουλίες, άμεσες και έμμεσες παρεμβάσεις, αναγκαίες για την ενδυνάμωση της καινοτομίας, την προστασία του ανταγωνισμού, και την εγγύηση της σοβαρής ισορροπημένης οικονομικής ανάπτυξης, ικανής να προέλθει από τη γενικευμένη συμμετοχή στην Ευρυζωνικότητα και την Κοινωνία της Πληροφορίας.

Οι προοπτικές που ανοίγονται τόσο στη ζωή των πολιτών όσο και στο δημόσιο και ιδιωτικό τομέα γίνονται εμφανείς παρατηρώντας τους τομείς στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή οι ευρυζωνικές υπηρεσίες. Ενδεικτικά:

- Στον τομέα της εκπαίδευσης: τηλεμάθηση (e-learning)
- Στον τομέα της υγείας: τηλεϊατρική (e-health)
- Στον τομέα της εξυπηρέτησης του πολίτη: εφαρμογές e-government που παρέχουν τη δυνατότητα απομακρυσμένης εξυπηρέτησης του πολίτη οποιαδήποτε ημέρα και ώρα
- Στον τομέα του επιχειρείν: αυξημένες δυνατότητες για επιχειρηματίες και πελάτες, νέα ψηφιακά προϊόντα, νέες θέσεις εργασίας

- Στον τομέα της επικοινωνίας: προσφορά υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων και ποιότητας με πολύ χαμηλό κόστος
- Στον τομέα της ενημέρωσης και της ψυχαγωγίας: IPTV (τηλεόραση μέσω δικτύων IP – Internet Protocol Television), VoD (Video on Demand)

Οι ευρυζωνικές τεχνολογίες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις ενσύρματες που αποτελούνται από τεχνολογίες xDSL και δίκτυα οπτικών ινών και τις ασύρματες που περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως: WiFi, WiMAX, UMTS.

[1] [2] [3] [4]

2.2 Ενσύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες

2.2.1 Ψηφιακές συνδρομητικές τεχνολογίες βρόχου

Ο όρος ψηφιακή γραμμή συνδρομητή (Digital Subscriber Line - DSL) αναφέρεται συνολικά στα διάφορα είδη ψηφιακής συνδρομητικής τεχνολογίας, τα οποία παρέχουν πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας ως μέσο τις κοινές τηλεφωνικές γραμμές. Καθώς η πραγματοποίηση κλήσεων φωνής δεσμεύει μόνο ένα μικρό τμήμα του εύρους ζώνης των χάλκινων δισύρματων καλωδίων του τηλεφωνικού δικτύου (από 0 έως 4kHz), το υπόλοιπο διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων αξιοποιήθηκε από αυτήν την οικογένεια τεχνολογιών για την παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στους τελικούς χρήστες, διατηρώντας παράλληλα τη δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης φωνής πάνω από την ίδια γραμμή. Οι διάφορες DSL τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί επιτυγχάνουν διαφορετική μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων.

Ανάλογα με το αν επιτρέπουν ή όχι ίσο ρυθμό λήψης και αποστολής δεδομένων, οι τεχνολογίες αυτής της οικογένειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε συμμετρικές και μη συμμετρικές (Πιν.2.1). Επιπλέον, υπάρχουν τεχνολογίες που υποστηρίζουν τόσο συμμετρικούς όσο και ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης και τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών ρυθμών (Πιν.2.1). Οι συμμετρικές τεχνολογίες επιλέγονται συνήθως στις επιχειρήσεις, ενώ οι ασύμμετρες προτιμώνται για εφαρμογές όπως είναι η πλοήγηση στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απόλυτος. [1] [4] [5]

Συμμετρικές τεχνολογίες	Ασύμμετρες τεχνολογίες	Τεχνολογίες που υποστηρίζουν συμμετρικούς & ασύμμετρους ρυθμούς
HDSL, HDSL2, HDSL4 (High-bitrate DSL)	ADSL, ADSL2, ADSL2+ (Asymmetric DSL)	RADSL, (Rate Adaptive DSL)
2B1Q SDSL (2B1Q Symmetric DSL)	UDSL (G.Lite) (Universal DSL)	VDSL, VDSL2 (Very High-Speed DSL)
ETSI SDSL (ETSI Symmetric DSL)		
SHDSL (Single-pair High-speed DSL)		

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών DSL

2.2.2 Δίκτυα παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών

2.2.2.1 Παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω του δικτύου χαλκού

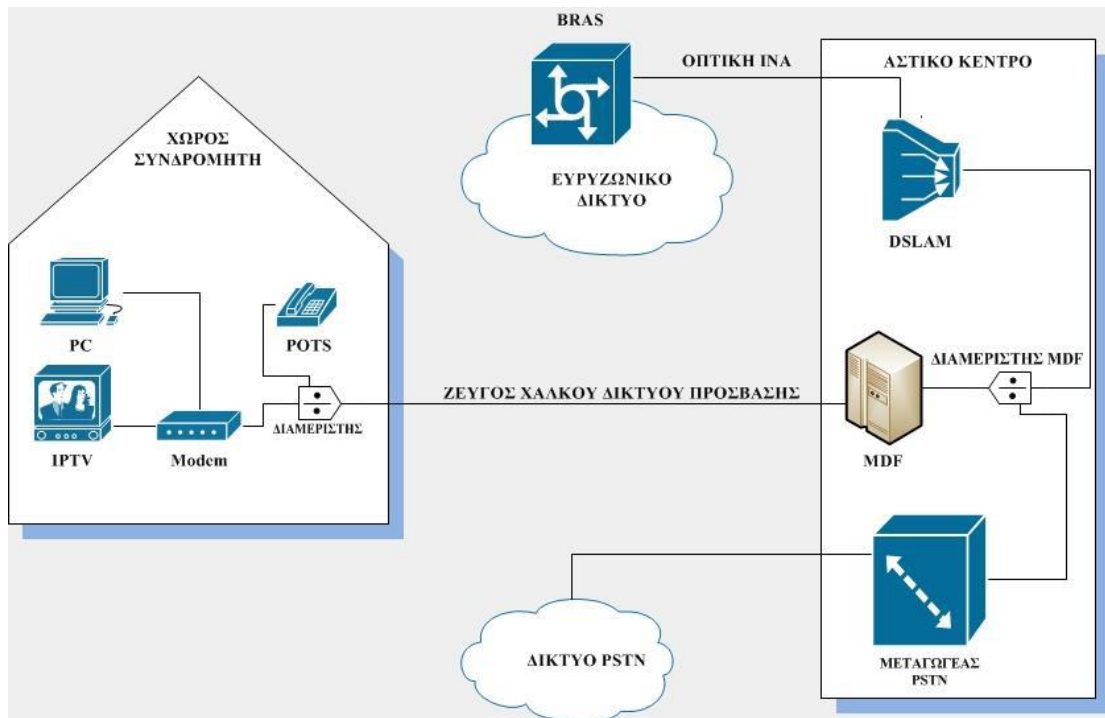
Η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών xDSL μέσω του δικτύου χαλκού απαιτεί την ύπαρξη του κατάλληλου εξοπλισμού τόσο στο αστικό κέντρο και στο χώρο του συνδρομητή. Στο Σχ. 2.1 παρουσιάζονται τα κύρια μέρη αυτής της τοπολογίας.

Στο αστικό κέντρο υπάρχει ο *πολυπλέκτης ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών πρόσβασης* (Digital Subscriber Line Access Multiplexer - DSLAM) που αναλαμβάνει την πολύπλεξη ενός αριθμού συνδρομητικών DSL γραμμών και την προώθηση αυτών μέσω οπτικής ίνας, ως ενιαίου καναλιού δεδομένων στον *ευρυζωνικό εξυπηρετητή απομακρυσμένης πρόσβασης* (Broadband Remote Access Server - BRAS) όπου ταυτοποιείται η ταυτότητα του συνδρομητή και δρομολογείται η κίνηση προς το δίκτυο κορμού του παρόχου. Λόγω της σύνδεσης μεταξύ DSLAM (εγκατεστημένου στο ΑΚ) και BRAS μέσω οπτικής ίνας, η τοπολογία αυτή ονομάζεται FTTE_x (Fiber To The Exchange). Το σήμα της παραδοσιακής τηλεφωνίας προέρχεται από τον μεταγωγέα PSTN ή ISDN. Στον κύριο κατανομητή, μέσω ενός διαχωριστή (splitter), το τηλεφωνικό σήμα και το σήμα xDSL καταλαμβάνουν το αντίστοιχο φασματικό περιεχόμενο της γραμμής του συνδρομητή. Στην περίπτωση τηλεφωνίας PSTN τα πρώτα 4kHz μεταφέρουν το τηλεφωνικό σήμα και οι συχνότητες άνω των 138kHz διατίθενται για την παροχή xDSL υπηρεσιών. Στην περίπτωση τηλεφωνίας ISDN η τηλεφωνική υπηρεσία καταλαμβάνει τα πρώτα 80kHz. Κατ' αυτόν τον τρόπο, υλοποιείται η παροχή τηλεφωνίας και ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω ενός μόνο ζεύγους χάλκινων αγωγών.

Η διαδικασία μέσω της οποίας το σήμα φθάνει από το ΑΚ σε κάθε συνδρομητή έχει περιγραφεί στην Εν.1.1.3. Στο χώρο του συνδρομητή, ένας διαχωριστής (splitter) αναλαμβάνει αντίστοιχα το διαχωρισμό/ένωση του τηλεφωνικού σήματος από το σήμα xDSL. Στη συνέχεια, ένα modem/router αναλαμβάνει τη μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντιστρόφως (modem) και την ενσύρματη ή ασύρματη μετάδοσή του σε όλες τις συνδεδεμένες συσκευές (router).

2.2.2.2 Παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω δικτύου NGA

Όπως γίνεται εμφανές από το Σχ.2.1 η μεγάλη απόσταση μεταξύ του σημείου έγχυσης του DSL σήματος και του συνδρομητή οδηγεί σε αρκετά μειωμένες επιδόσεις (χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης, υποβαθμισμένο σήμα). Η ανάπτυξη των δικτύων NGA, που αναλυτικά παρουσιάστηκαν στην Εν.1.2.2.4, έχει ως στόχο να επιλύσει το πρόβλημα αυτό, ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη των μέγιστων δυνατών επιδόσεων κάθε τεχνολογίας. Οι οπτικές ίνες αντικαθιστούν τμήματα του δικτύου χαλκού οπότε, ανάλογα με την αρχιτεκτονική FTT_x, μειώνεται η απόσταση στην οποία χρησιμοποιείται ο χαλκός ως μέσο μετάδοσης του σήματος και, κατά συνέπεια, μετριάζονται οι παράγοντες που υποβαθμίζουν την ποιότητα και τη μετάδοση του σήματος που οφείλονται στην επιλογή του χαλκού ως μέσο μετάδοσης. [6]



Σχήμα 2.1: Τοπολογία δικτύου παροχής xDSL υπηρεσιών

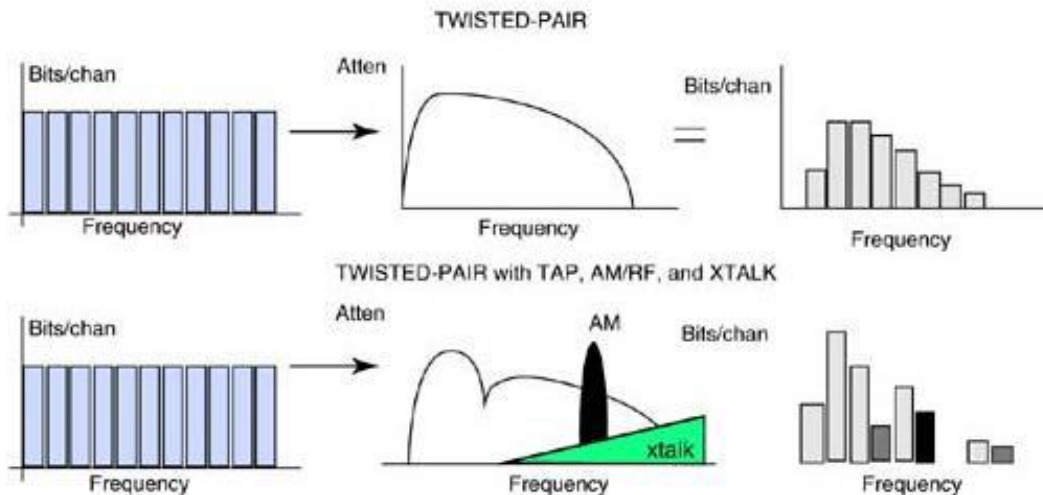
2.2.3 Διακριτή πολυτονική διαμόρφωση

Η διακριτή πολυτονική διαμόρφωση (Discrete Multi-Tone modulation – DMT modulation) εφαρμόζεται σε όλες τις DSL τεχνολογίες. Πρόκειται για μέθοδο πολυδιαυλικής διαμόρφωσης σχεδόν πανομοιότυπη με την ορθογωνική διαμόρφωση διαίρεσης συχνότητας, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα. Η βασική διαφορά μεταξύ της ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας και της διακριτής πολυτονικής διαμόρφωσης είναι ότι η δεύτερη χρησιμοποιεί την τεχνική *bit loading* για τον έλεγχο της φασματικής πυκνότητας ισχύος, δεδομένου ότι οι συνθήκες που επικρατούν στο διάλογο μεταβάλλονται αργά.

Η βασική ιδέα των τεχνικών πολυδιαυλικής διαμόρφωσης είναι ο διαχωρισμός της ροής ψηφίων σε πολλές επιμέρους ροές και η μετάδοσή τους σε αντίστοιχο πλήθος υποδιαύλων, όπου τα πολλαπλά υποφέροντα επιλέγεται να είναι ορθογώνια μεταξύ τους υπό ιδανικές συνθήκες διάδοσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά η διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference - ISI) και, επιπλέον, εξασφαλίζεται ανθεκτικότητα σε παρεμβολές στενής ζώνης⁴.

Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής αποτελεί το ότι το μεταδιδόμενο σήμα απαλλάσσεται από την επίδραση φαινομένων επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα, όπως είναι για παράδειγμα η εξασθένηση που εισάγει το χάλκινο καλώδιο. Καθώς κάθε υποκανάλι επηρεάζεται κατά διαφορετικό τρόπο από τέτοια φαινόμενα, δεν επηρεάζεται η μετάδοση του συνόλου του σήματος αλλά μόνο τμημάτων του, όπως φαίνεται από το Σχ.2.2.

⁴ Είδος παρεμβολών, των οποίων το εύρος ζώνης είναι πολύ μικρότερο από το εύρος ζώνης του σήματος

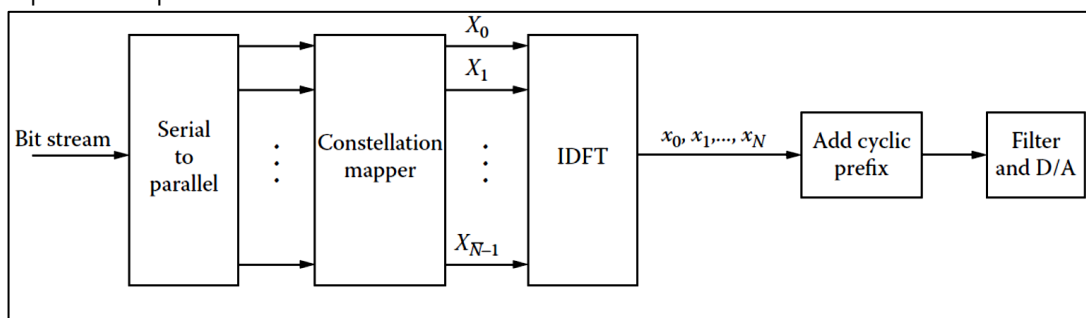


Σχήμα 2.2: Πλεονέκτημα DMT διαμόρφωσης

Συγκεκριμένα, το συνολικό διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων W χωρίζεται σε $K=W/Df$ κανάλια, όπου Df το εύρος ζώνης κάθε καναλιού. Το σήμα σε κάθε κανάλι διαμορφώνεται με φέρουσα συχνότητα την κεντρική συχνότητα f_k του εύρους ζώνης που αντιστοιχεί στο κανάλι αυτό.

Στη γενική περίπτωση, η διαδικασία της πολυτονικής διαμόρφωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα, όπως φαίνεται και στο μπλοκ διάγραμμα του Σχ.2.3. Κατά τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης, τα βήματα ακολουθούνται με την αντίστροφη σειρά.

1. Αποθήκευση της ροής των bits στον ενταμιευτή και διαμοιρασμός τους στα υποκανάλια μέσω κατάλληλου bit loading αλγορίθμου. Ο αριθμός των bits που ανατίθενται σε κάθε υποκανάλι (bit loading) δεν είναι ο ίδιος, καθώς εξαρτάται από το επίπεδο εξασθένησης κάθε υποκαναλιού.
2. Κωδικοποίηση των bits στα αντίστοιχα σύμβολα μέσω της επιλεγμένης τεχνικής διαμόρφωσης. Η διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation) χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των DSL τεχνολογιών.
3. Εφαρμογή του αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform – IDFT) με τη χρήση κάποιου αλγορίθμου FFT (Fast Fourier Transform) για τη μεταφορά των συμβόλων από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου.
4. Προσθήκη κυκλικού προθέματος (cyclic prefix).
5. Μετατροπή της πληροφορίας από ψηφιακή σε αναλογική μορφή για τη μετάδοση.



Σχήμα 2.3: Μπλοκ διάγραμμα DMT διαμορφωτή

Bit Loading

Μέσω της τεχνικής bit loading, σε κάθε υποκανάλι ανατίθεται ο βέλτιστος αριθμός bit βάσει του SNR που εκτιμάται στην αντίστοιχη συχνότητα. Για παράδειγμα, στα υψίσυχνα κανάλια, όπου το σήμα υπόκειται σε μεγάλη εξασθένηση με αποτέλεσμα το SNR να είναι χαμηλό, ο αριθμός των bits που ανατίθεται σε αυτά είναι μικρός.

Quadrature Amplitude Modulation

Η διαμόρφωση QAM είναι είδος ψηφιακής πολυσταθμικής διαμόρφωσης. Κατά την ψηφιακή πολυσταθμική διαμόρφωση, ομάδες ψηφίων (τα λεγόμενα σύμβολα) αντιστοιχίζονται σε αναλογικά σήματα που μεταδίδονται μέσω του διαύλου. Η μία από τις δύο γενικές κατηγορίες αυτού του τύπου διαμόρφωσης είναι η διαμόρφωση φάσης/πλάτους, όπου τα προς αποστολή ψηφία μεταδίδονται διαμορφωμένα στο πλάτος ή τη φάση του σήματος. Η δεύτερη είναι η διαμόρφωση συχνότητας, όπου τα προς αποστολή ψηφία αντιστοιχίζονται σε διαφορετικές τιμές της φέρουσας συχνότητας του σήματος.

Γενικά, k ψηφία πληροφορίας δυαδικής μορφής ($b \in \{0,1\}$) αντιστοιχίζονται σε $M=2^k$ σύμβολα της μορφής $m_i = \{b_1, \dots, b_k\}$ όπου $\{m_1, \dots, m_M\}$ είναι το σύνολο των συμβόλων. Στη συνέχεια, κάθε σύμβολο m_i , το οποίο πρέπει να μεταδοθεί σε διάστημα T , αντιστοιχίζεται μονοσήμαντα σε ένα αναλογικό σήμα $s_i(t)$ το οποίο επιλέγεται από ένα σύνολο σημάτων $\{s_1(t), \dots, s_M(t)\}$ και έχει πεπερασμένη ενέργεια

$$E = \int_0^T s_i^2(t) dt \text{ όπου } i = 1, \dots, M \quad (2.1)$$

Η διαδικασία αυτή της μονοσήμαντης αντιστοίχισης συνιστά την πολυσταθμική ψηφιακή διαμόρφωση.

Μπορεί να αποδειχθεί ότι κάθε σύνολο M πραγματικών σημάτων πεπερασμένης ενέργειας $\{s_1(t), \dots, s_M(t)\}$ που ορίζονται στο χρονικό διάστημα $[0, T)$ μπορεί να περιγραφεί ως γραμμικός συνδυασμός $N \leq M$ πραγματικών ορθοκανονικών συναρτήσεων βάσης $\{\varphi_1(t), \dots, \varphi_N(t)\}$. Δηλαδή το σήμα $s_i(t)$ μπορεί να περιγραφεί ως υπέρθεση αυτών των συναρτήσεων βάσης υπό τη μορφή:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^N s_{ij} \varphi_j(t) \text{ με } 0 \leq t < T \quad (2.2)$$

όπου

$$s_{ij} = \int_0^T s_i(t) \varphi_j(t) dt \quad (2.3)$$

η προβολή του σήματος $s_i(t)$ επί της συνάρτησης βάσης $\varphi_j(t)$ και

$$\int_0^T \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (2.4)$$

Σε πολλές περιπτώσεις (όπως στις τεχνικές ζωνοπερατής διαμόρφωσης), ως συναρτήσεις βάσεις επιλέγονται οι συνημιτονοειδείς συναρτήσεις

$$\varphi_1(t) = \cos(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.5)$$

$$\varphi_2(t) = \sin(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.6)$$

Με αντικατάσταση των (2.5) και (2.6) στη (2.2) προκύπτει η ισοδύναμη ζωνοπερατή παράσταση ενός σήματος ως υπέρθεση της συμφασικής (In-phase) και της ορθογωνικής (Quadrature) συνιστώσας του, με τη μορφή

$$s_i(t) = s_{i1} \cos(2\pi f_c t + \psi) + s_{i2} \sin(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.7)$$

Οι συναρτήσεις βάσης μπορεί να περιλαμβάνουν και παλμούς μορφοποίησης βασικής ζώνης $g(t)$ για την απόδοση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών στο διαμορφωμένο σήμα. Στην περίπτωση αυτή, η (2.7) λαμβάνει τη μορφή:

$$s_i(t) = s_{i1}g(t) \cos(2\pi f_c t + \psi) + s_{i2}g(t) \sin(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.8)$$

Στη ζωνοπερατή διαμόρφωση, το τελικό διαμορφωμένο σήμα έχει τη μορφή:

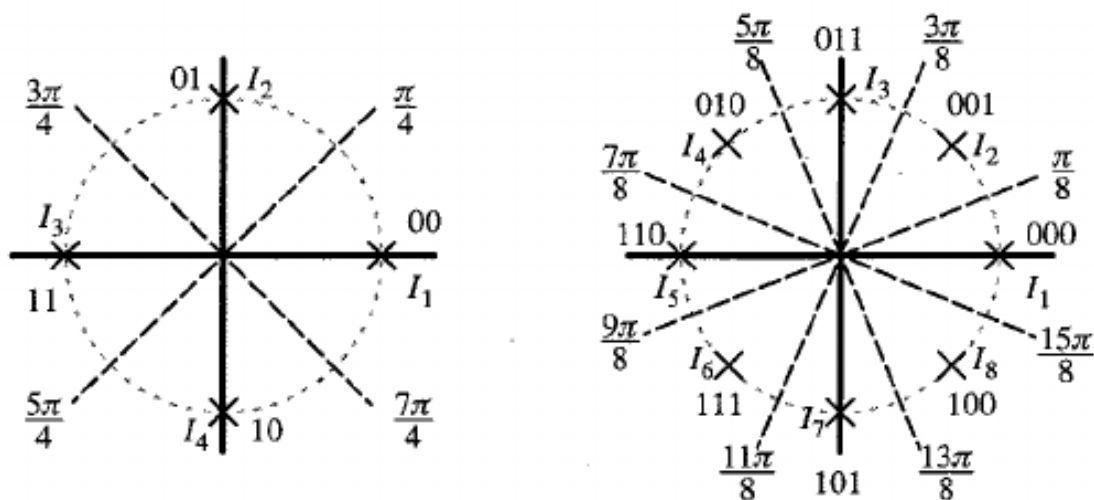
$$s_i(t) = \alpha(t) \cos(2\pi f_c t + \psi + \theta(t)) \quad (2.9)$$

η οποία με χρήση τριγωνομετρικών σχέσεων αναδιατάσσεται στη μορφή:

$$s(t) = \alpha(t) \cos \alpha(t) \cos(2\pi f_c t + \psi) + \alpha(t) \sin \alpha(t) \sin(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.10)$$

όπου $s_i(t)=\alpha(t)\cos\theta(t)$ η συμφασική συνιστώσα και $s_q(t)=\alpha(t)\sin\theta(t)$ η ορθογωνική συνιστώσα.

Η γεωμετρική παράσταση όλων των σημάτων $s_i(t)$ μέσω των διανυσμάτων συντελεστών τους $s_i(t)=(s_{i1}, \dots, s_{iN}) \in \mathbb{R}^N$ σχηματίζει τον *αστερισμό* των σημάτων, με τα σημεία του αστερισμού να είναι τα s_i . Στόχος του δέκτη του σήματος $r(t)$ είναι να κάνει τη βέλτιστη εκτίμηση ως προς το σήμα $s(t)$ που έχει μεταδοθεί ώστε, εν συνεχεία, να κάνει τη βέλτιστη εκτίμηση \hat{m}_i του μηνύματος m_i που έχει μεταδοθεί μέσω του $s(t)$. Με διαφορετική διατύπωση, στόχος του δέκτη είναι να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα λανθασμένου μηνύματος. Υπό αυτή την προϋπόθεση, ορίζονται μαθηματικά οι περιοχές απόφασης, οι οποίες αποτελούνται από το σύνολο των σημείων που θα «μεταφραστούν» στο μήνυμα m_i ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα λάθους. Στο Σχ.2.4 φαίνονται τα σημεία των αστερισμών και οι περιοχές απόφασης για τις διαμορφώσεις QPSK (Quadrature Phase Shift Key) και 8PSK.



Σχήμα 2.4: Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση QPSK και 8PSK

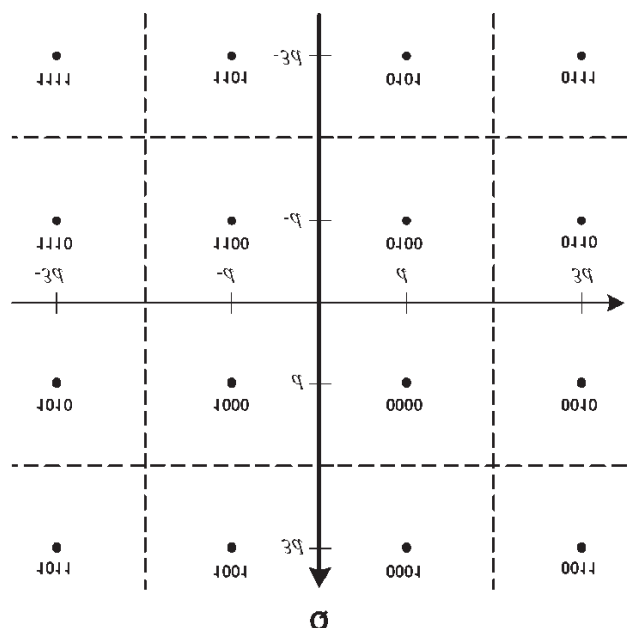
Κατά κανόνα, μία λανθασμένη απόφαση ως προς το σύμβολο που μεταδόθηκε σημαίνει ότι έχει επιλεγεί κάποιο γειτονικό του. Συνεπώς, κατά την αντιστοίχιση των συμβόλων με τα σημεία του αστερισμού επιλέγεται τα γειτονικά σύμβολα να διαφέρουν μεταξύ τους μόνο κατά ένα ψηφίο (όπως συμβαίνει υιοθετώντας την αντιστοίχιση Gray). Με αυτόν τον τρόπο, μία λάθος απόφαση σε επίπεδο συμβόλου ισοδυναμεί με μόνο ένα λανθασμένο ψηφίο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του αριθμού των συμβόλων (που προκύπτει από την αύξηση του αριθμού των bits ανά σύμβολο) συνεπάγεται πύκνωση των σημείων του αστερισμού, με αποτέλεσμα να μειώνεται το εύρος κάθε περιοχής απόφασης και να αυξάνεται η πιθανότητα λάθους. Η αντιστάθμιση της δυσμενούς αυτής επίπτωσης επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της ισχύος εκπομπής η οποία αυξάνει την απόσταση μεταξύ των σημείων του αστερισμού. όμως, η αύξηση της ισχύος εκπομπής υπόκειται σε περιορισμούς λόγω κόστους και πρόκλησης παρεμβολών. Εναλλακτικά, πρέπει να αυξηθεί η διορθωτική ικανότητα του συστήματος ώστε να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά τα αυξημένου πλήθους λάθη. Και στην περίπτωση αυτή, η αύξηση της διορθωτικής ικανότητας συνεπάγεται την αύξηση του πολυτίμου και περιορισμένου εύρους ζώνης.

Η διαμόρφωση MQAM (Multiple QAM) διαθέτει 2 βαθμούς ελευθερίας, καθώς τα ψηφία πληροφορίας αντιστοιχίζονται στις μεταβολές τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του διαμορφωμένου σήματος, το οποίο έχει τη μορφή

$$s_i(t) = A_i \cos \theta_i g(t) \cos(2\pi f_c t + \psi) + A_i \sin \theta_i g(t) \sin(2\pi f_c t + \psi) \quad (2.11)$$

Η MQAM προσφέρει υψηλότερη φασματική απόδοση (Ρυθμός μετάδοσης / Εύρος ζώνης) σε σχέση με άλλες τεχνικές της ίδιας οικογένειας, καθώς διαθέτει την ικανότητα μετάδοσης περισσότερων ψηφίων ανά σύμβολο, διατηρώντας την ίδια μέση ενέργεια συμβόλου ($E = A_i^2$). Επίσης, η μέση ενέργεια δεν είναι ίδια για όλα τα σύμβολα, όπως συμβαίνει και σε άλλες τεχνικές της ίδιας οικογένειας. Επιλέγοντας, συνήθως, $M=L^2$, ο αστερισμός της MQAM είναι τετραγωνικός και οι περιοχές απόφασης εμφανίζουν τη μορφή τετραγωνικού πλέγματος.



Σχήμα 2.5: Περιοχές απόφασης για τη διαμόρφωση 16QAM

Cyclic Prefix

Το κυκλικό πρόθεμα είναι ένα μικρό τμήμα του τέλους του συμβόλου που επαναλαμβάνεται στην αρχή με στόχο την περαιτέρω προστασία από διασυμβολική παρεμβολή αλλά και για τη διευκόλυνση στην επεξεργασία του σήματος στο πεδίο της συχνότητας.

[1] [6] [7] [8] [9] [10] [32] [33]

2.2.4 Συνοπτική αναφορά σε τεχνολογίες που προηγήθηκαν xDSL

Για πολλές δεκαετίες το δίκτυο χαλκού χρησιμοποιούνταν μόνο για τη μετάδοση φωνής. Ωστόσο, το εύρος ζώνης που προσφέρουν τα χάλκινα καλώδια είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για τη μετάδοση της φωνής (μόνο 4kHz). Έτσι, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες που επέτρεπαν την αποδοτικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Αρχικά, για την πρόσβαση στο Διαδίκτυο χρησιμοποιήθηκαν οι συνδέσεις dial-up. Αυτές αξιοποιούσαν τη λειτουργία του υπάρχοντος δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής καθιστώντας, ωστόσο, αδύνατη την ταυτόχρονη χρήση της τηλεφωνικής σύνδεσης για κλήσεις παράλληλα με τη σύνδεση στο Διαδίκτυο. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε το ψηφιακό δίκτυο ενοποιημένων υπηρεσιών το οποίο επέτρεπε την ταυτόχρονη ψηφιακή μετάδοση φωνής αλλά και δεδομένων πάνω από το υπάρχον τηλεφωνικό δίκτυο. Το ISDN βασικού ρυθμού (Basic Rate ISDN - BRI) παρείχε συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 160Kbps σε απόσταση μέχρι 5.5km.

Αργότερα, μέσω της οικογένειας τεχνολογιών xDSL, δόθηκε η δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω μίας μόνο τηλεφωνικής γραμμής, επιτρέποντας παράλληλα την πραγματοποίηση κλήσεων αξιοποιώντας τις χαμηλές συχνότητες για τη μετάδοση φωνής (μέχρι 4kHz) και τις υψηλότερες για τη μετάδοση ψηφιακής πληροφορίας, διαχωρίζοντας αυτές με κατάλληλα φίλτρα που εγκαθίστανται στις δύο άκρες της γραμμής.

[4] [6] [11]

2.2.5 HDSL (High-bitrate DSL)

Το HDSL αποτελεί την πρώτη τεχνολογία DSL που αναπτύχθηκε, η οποία πετυχαίνει συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης (1.544 Mbps ή 2.048 Mbps) πάνω από δύο ή τρία συνεστραμμένα ζεύγη χαλκού (σε ορισμένες περιπτώσεις και πάνω από 1). Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται συμμετρικά στις 2 ή 3 γραμμές, κάθε μία από τις οποίες λειτουργεί ως μία ζεύξη 2 δρόμων, η οποία υπόκειται σε καταστολή ηχούς. Επικρατέστερη είναι η υλοποίηση πάνω από 2 ζεύγη. Σε αυτήν την περίπτωση, η διαθέσιμη υπηρεσία φθάνει σε απόσταση 3,7km χωρίς χρήση επαναληπτών.

Με τη χρήση πολλαπλών γραμμών αυξάνεται αντίστοιχα και η μέγιστη απόσταση μετάδοσης, καθώς το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται από κάθε συνεστραμμένο ζεύγος είναι μικρότερο από αυτό που θα χρησιμοποιούνταν από ένα μόνο ζεύγος, με αποτέλεσμα το σήμα να υποφέρει από χαμηλότερη εξασθένηση ανά χιλιόμετρο μετάδοσης. Επίσης, η λειτουργία σε μικρότερο εύρος ζώνης διευκολύνει τη φασματική συμβατότητα με άλλα ήδη υπάρχοντα συστήματα.

Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών χάλκινων ζευγών ανά χρήστη συνεπάγεται τη μείωση του αριθμού των χρηστών που μπορεί να εξυπηρετηθεί από δεδομένο πλήθος ζευγών χάλκινων καλωδίων.

Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εκδοχές του HDSL είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (Pulse Amplitude Modulation – PAM) τεσσάρων επιπέδων. Κατά την PAM, οι τιμές των ληφθέντων δειγμάτων της πληροφορίας ενσωματώνονται στο πλάτος μίας σειράς παλμών (στην κοντινότερη από τις διαθέσιμες στάθμες πλάτους). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η τεχνική 2B1Q όπου διαδοχικά δείγματα των 2 bits αντιστοιχίζονται σε 1 από τις 4 διαθέσιμες στάθμες σήματος, πετυχαίνοντας έτσι τους προαναφερθέντες ρυθμούς μετάδοσης σε αποστάσεις έως 4 χιλιομέτρων χωρίς τη χρήση επαναληπτών.

Αργότερα, αναπτύχθηκαν οι τεχνολογίες HDSL2 και HDSL4, οι οποίες οδήγησαν σε καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας λόγω των καινοτομιών που εισήγαγαν, όπως για παράδειγμα η λειτουργία πάνω από ένα μόνο συνεστραμμένο ζεύγος (HDSL2), οι κώδικες για τη διόρθωση λαθών και η χρήση διαφορετικών και επικαλυπτόμενων φασματικών σχημάτων για την άνω και κάτω ζεύξη.

Άλλες ενδιαφέρουσες επεκτάσεις του HDSL αποτέλεσαν οι τεχνολογίες:

- 2B1Q SDSL (χρήση ενός ζεύγους χάλκινων καλωδίων – δυνατότητα λειτουργίας με πολλούς διαφορετικούς συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης)
- ETSI SDSL (επαγγελματίες χρήστες - μετάδοση 3 bits ανά σύμβολο - δυνατότητα λειτουργίας με πολλούς διαφορετικούς συμμετρικούς ρυθμούς μετάδοσης ακέραιων πολλαπλασίων των 64Kbps με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 2,304Mbps)
- SHDSL (υψηλής ταχύτητας ψηφιακή συνδρομητική γραμμή πάνω από ένα ζεύγος χάλκινων καλωδίων)

[5] [6] [34]

2.2.6 ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούσαν υπηρεσίες όπως το video on demand, αλλά και για τεχνολογίες εύρωστες στο δυσμενές περιβάλλον διάδοσης του δικτύου χαλκού, οδήγησαν στην ανάπτυξη του ADSL. Αξιοποιώντας το κοινό τηλεφωνικό δίκτυο πρόσβασης το ADSL παρείχε ρυθμό μετάδοσης κάτω ζεύξης 8 Mbps και άνω ζεύξης 1 Mbps, πάνω από ένα μόνο συνεστραμμένο ζεύγος.

Οι συχνότητες που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι 138 – 1104kHz για την κατερχόμενη ζεύξη και 25 – 138kHz για την ανερχόμενη ζεύξη. Συνολικά, χρησιμοποιούνται 255 υποκανάλια (τόνοι) με απόσταση 4.3125kHz μεταξύ τους. Το πρώτο κανάλι χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του τηλεφωνικού σήματος, τα επόμενα 5 για τη διασφάλιση ότι η μετάδοση αυτή δεν θα επηρεαστεί από το ADSL σήμα, τα υποκανάλια 7-32 για την ανερχόμενη ζεύξη και τα υποκανάλια 33-256 για την κατερχόμενη.

Για την κωδικοποίηση της πληροφορίας χρησιμοποιείται διακριτή πολυτονική διαμόρφωση (DMT), ενώ για το διαχωρισμό των συχνοτήτων άνω και κάτω ζεύξης χρησιμοποιείται η τεχνική της αμφιδρόμησης διαίρεσης συχνότητας (FDD).

Η μέθοδος διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι η QAM και ο μέγιστος αριθμός bits που μπορούν να ανατεθούν ανά τόνο είναι 15 με χρήση της 32768QAM ($32768 = 2^{15}$). Για να θεωρηθεί ένας τόνος λειτουργικός (ικανός να μεταφέρει δεδομένα) πρέπει ο σηματοθορυβικός του λόγος να ξεπερνά τα 6dB. Δεδομένου ότι 3dB σηματοθορυβικού λόγου αντιστοιχούν σε 1 bit, ο ελάχιστος αριθμός bit που μπορούν να κωδικοποιηθούν ανά υποκανάλι είναι δύο.

ADSL.lite – ADSL2 – ADSL2+

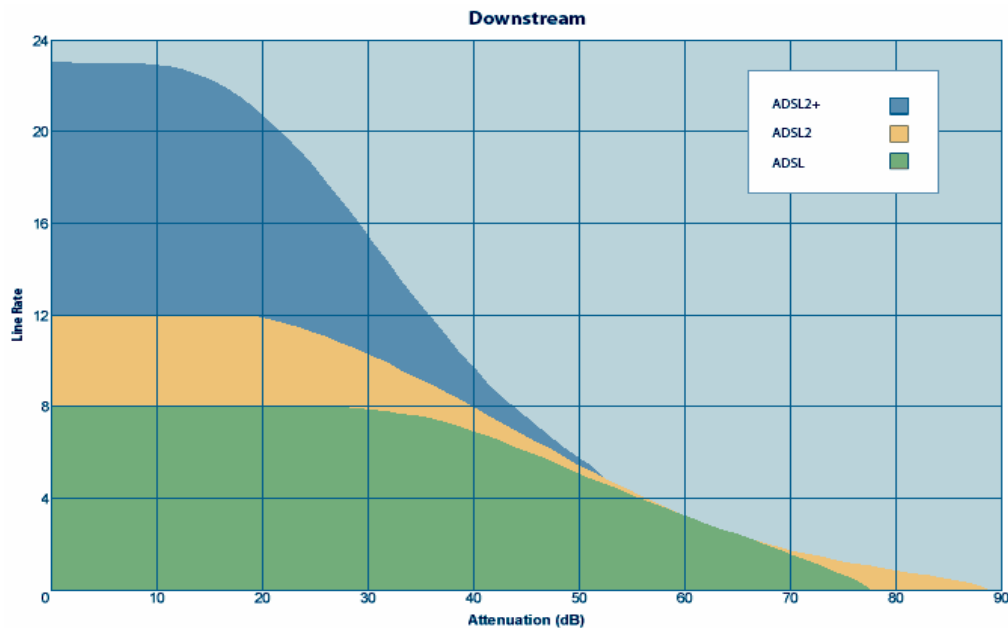
Το πρότυπο ADSL.lite που προτάθηκε στη συνέχεια, έφερε πολλές απλοποιήσεις τόσο στον τρόπο λειτουργίας όσο και εγκατάστασης, θυσιάζοντας όμως παράλληλα μεγάλο μέρος της ταχύτητας (1.5Mbps/0.5Mbps).

Αργότερα, παρουσιάστηκε από την ITU το πρότυπο ADSL2, με κύρια διαφορά από το ADSL ότι πετύχαινε την ίδια ποιότητα υπηρεσίας για μεγαλύτερα μήκη βρόχου. Οι βελτιώσεις, πολλές εκ των οποίων ήταν προαιρετικές, περιλάμβαναν:

- Τη λειτουργικότητα τόνων και με 1 μόνο bit (3dB SNR) για εύρωστη μετάδοση σε μεγαλύτερα μήκη βρόχων
- Την υποχρεωτική χρήση κωδικοποίησης trellis
- Μηχανισμούς όπως το online bit swapping και το SRA
- Αλλαγές στην κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών
- Δυνατότητα χρήσης της ζώνης μετάδοσης φωνής για μετάδοση πρόσθετης πληροφορίας.
- Διάφορους μηχανισμούς όπως το RFI notching για την αντιμετώπιση των παρεμβολών
- Βελτιωμένους μηχανισμούς έναρξης συμπεριλαμβανομένης της επιλογής για γρήγορη έναρξη (fast initialization mode)
- Μεταβαλλόμενο μήκος επικεφαλίδας (overhead) για την επίτευξη υψηλότερου ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης
- Δυνατότητα συνένωσης (bonding) πολλών γραμμών ADSL

Ωστόσο, η μεγάλη βελτίωση επιτεύχθηκε με τη χρήση του προτύπου ADSL2+ στο οποίο διπλασιάστηκε το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης από το 1.1 στα 2.2MHz επιτυγχάνοντας ταχύτητες κάτω ζεύξης μέχρι 24Mbps (Σχ.2.6) και άνω ζεύξης μέχρι 1.4Mbps ανάλογα με την απόσταση του DSLAM από τον τελικό χρήστη. Επιπλέον, η δυνατότητα ελέγχου της φασματικής πυκνότητας ισχύος της κάτω ζεύξης μέσω του spectral shaping προσέφερε μεγαλύτερη ευελιξία σε περιπτώσεις όπου έπρεπε να ικανοποιηθούν ιδιαίτερες φασματικές προϋποθέσεις (συμβατότητα με άλλες υπηρεσίες, συμμόρφωση με κανονισμούς).

[1] [5] [7] [10]



Σχήμα 2.6: Ρυθμοί μετάδοσης (σε Mbps) ADSL, ADSL2, ADSL2+ συναρτήσει της εξασθένησης

2.2.7 VDSL (Very high speed Digital Subscriber Line)

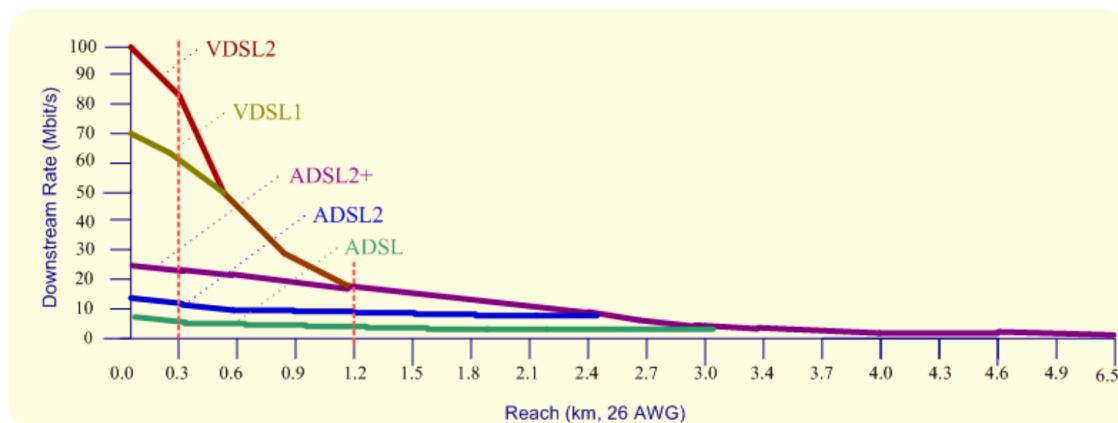
Στη συνέχεια, η ITU εξέδωσε το πρότυπο VDSL, το οποίο αποτελεί την πλέον εξελιγμένη τεχνολογία της οικογένειας xDSL. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αξιοποιεί αρχιτεκτονική παρόμοια του υβριδικού δικτύου οπτικών ινών και χαλκού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες από το αστικό κέντρο μέχρι ένα σημείο αρκετά κοντά στο χώρο του χρήστη (αρχιτεκτονική FTTC). Στο σημείο αυτό, εγκαθίσταται η οπτική τερματική συσκευή, συνήθως μέσα σε κάποια υπαίθρια καμπίνα. Από το σημείο εκείνο μέχρι και το χώρο του χρήστη χρησιμοποιείται η τεχνολογία VDSL πάνω από το δισύρματο χάλκινο καλώδιο.

Το VDSL επιτυγχάνει συμμετρικές ταχύτητες 13 ή 26 Mbps, ή ασύμμετρες 52Mbps για την κάτω ζεύξη και 6.4Mbps για την άνω ζεύξη πάνω από ένα μόνο συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων. Διευκρινίζεται ότι οι ανώτατες ταχύτητες κάτω ζεύξης επιτυγχάνονται μόνο σε μικρές αποστάσεις. Για την επίτευξη των υψηλών αυτών ταχυτήτων, το VDSL χρησιμοποιεί μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων από το ADSL που φθάνει τα 12Mbps. Η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι και πάλι η διακριτή πολυτονική διαμόρφωση, ενώ για την πολύπλεξη άνω και κάτω ζεύξης χρησιμοποιείται αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας όπως στο ADSL.

Χρησιμοποιώντας συχνότητες μέχρι τα 30MHz, η δεύτερη γενιά VDSL2 κατέστησε εφικτές ταχύτητες μέχρι 50Mbps για την άνω ζεύξη και 100Mbps για την κάτω ζεύξη. Η πλέον πρόσφατη εκδοχή προτυποποιήθηκε από την ITU μόλις το 2015 ως ένα επιπλέον προφίλ του VDSL2 (VDSL2 profile 35b⁵), σύμφωνα με το οποίο είναι δυνατή η επίτευξη ταχυτήτων 330Mbps για την κάτω και 65Mbps για την άνω ζεύξη για μήκη βρόχου μικρότερα από 250m. Σε μεγαλύτερα μήκη βρόχου γίνεται χρήση του προφίλ 17b του VDSL2.

⁵ Συχνά απαντώνται οι συνώνυμοι όροι Vplus & Supervectoring οι οποίοι αποτελούν εμπορικές ονομασίες των προϊόντων VDSL2 35b vectoring των εταιριών Huawei & Nokia

Στο Σχ.2.7 παρουσιάζονται οι επιδόσεις (ταχύτητα κάτω ζεύξης) των διαφόρων τεχνολογιών ADSL και VDSL συναρτήσει της απόστασης. Είναι φανερό ότι σε απόσταση μικρότερη των 300m η ταχύτητα που επιτυγχάνει το VDSL2 είναι εμφανώς υψηλότερη από αυτή των υπολοίπων τεχνολογιών. Ωστόσο, σε απόσταση 1.2km παρέχει την ίδια ταχύτητα με το VDSL1 και το ADSL2+ ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις, εμφανίζει την ίδια επίδοση με το ADSL2+.



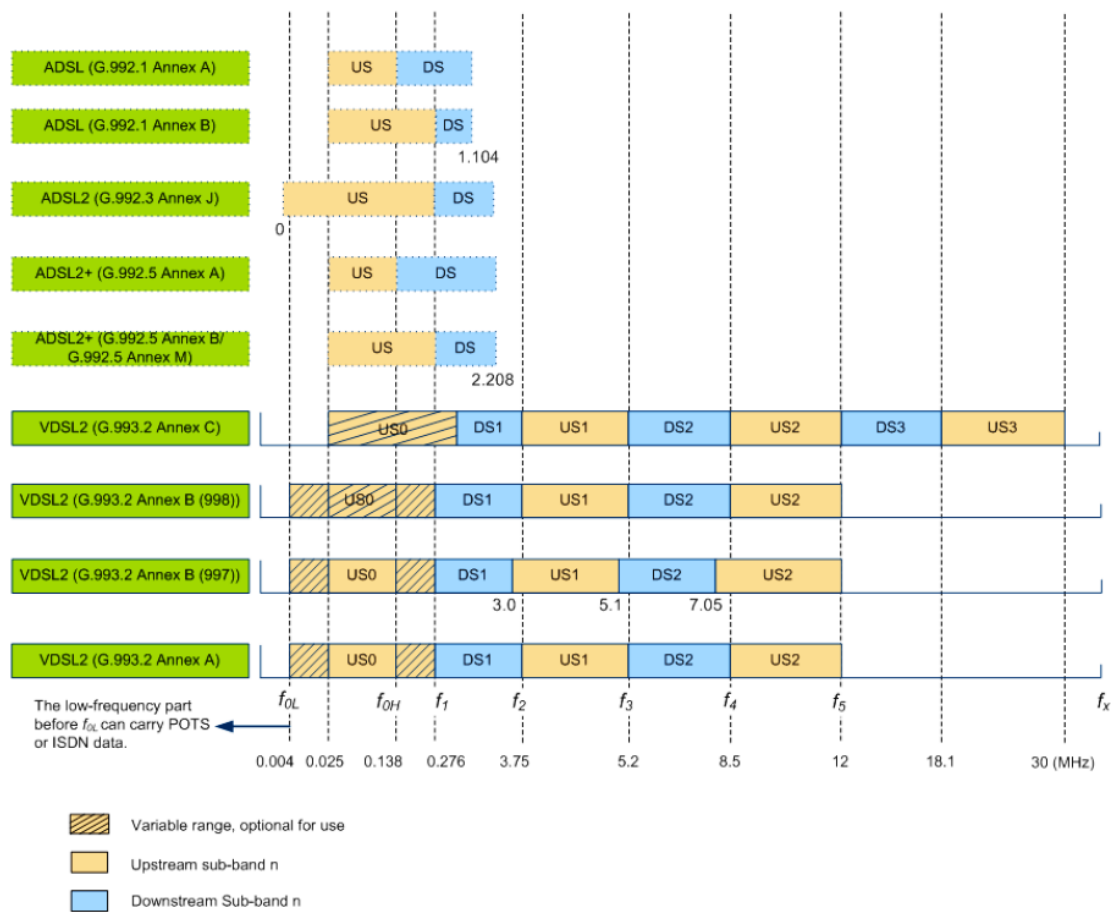
Σχήμα 2.7: Επιδόσεις τεχνολογιών ADSL και VDSL συναρτήσει της απόστασης

Η διαθεσιμότητα πολλών προφίλ συνδυασμένη με τη δυνατότητα ελέγχου της φασματικής πυκνότητας ισχύος έγχυσης, επιτρέπει την κατάλληλη επιλογή χαρακτηριστικών του σήματος σε αντιστοιχία με το σημείο έγχυσης του σήματος στο δίκτυο (Αστικό Κέντρο - ΑΚ, Υπαίθριος Κατανεμητής - ΥΚ, Χώρος Συνδρομητή - ΧΣ). Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η ελαχιστοποίηση της παρεμβολής του σήματος VDSL2 στα σήματα των υπολοίπων τεχνολογικών επιλογών. Στον Πιν.2.2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των προφίλ λειτουργίας του VDSL2.

PROFILE	8a	8b	8c	8d	12a	12b	17a	30a
Bandwidth (MHz)	8.5	8.5	8.5	8.5	12	12	17.664	30
Number of Tones	1972	1972	1972	1972	2783	2783	4096	3479
Tone spacing (kHz)	4.3125	4.3125	4.3125	4.3125	4.3125	4.3125	4.3125	8.625
Max. Downstream frequency (MHz)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	15.5	18.1
Max aggregate downstream transmit power (dBm)	+17.5	+20.5	+11.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5
Max. Upstream frequency (MHz)	5.2	5.2	5.2	5.2	12	12	17.7	30
Max aggregate upstream transmit power (dBm)	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5	+14.5
Σημείο έγχυσης	ΑΚ	ΑΚ	ΑΚ	ΑΚ	ΑΚ/ΥΚ	ΑΚ/ΥΚ	ΥΚ	ΧΣ

Πίνακας 2.2: Προφίλ VDSL2

Στο Σχ.2.8 φαίνεται αναλυτικά ο διαμορισμός του φάσματος που χρησιμοποιούν ορισμένες από τις DSL τεχνολογίες στην άνω και κάτω ζεύξη. Το διαθέσιμο φάσμα μοιράζεται σε ζώνες συχνοτήτων με συμμετρικό ή ασύμμετρο τρόπο. Στα διάφορα παραρτήματα των προτύπων των DSL τεχνολογιών περιγράφεται με ακρίβεια η κατανομή του φάσματος καθώς και οι συνθήκες υπό τις οποίες χρησιμοποιείται. Ενδεικτικά, στο παράρτημα A του προτύπου G.993.2 (πρότυπο για το VDSL2) ορίζονται οι ζώνες συχνοτήτων για την Αμερική, στο Β για την Ευρώπη και στο C για την Ιαπωνία. Με διαφορετικό κριτήριο διαφοροποίησης των παραρτημάτων στο ADSL, στο παράρτημα Β του προτύπου G.992.1 (πρότυπο για το ADSL) οι χαμηλότερες συχνότητες χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών ISDN, ενώ στο παράρτημα Α χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση φωνής (POTS⁶).



Σχήμα 2.8: Κατανομή συχνοτήτων στην άνω και κάτω ζεύξη των τεχνολογιών DSL. Στο τέλος του κεφαλαίου (Εν.1.3.9), στον Πιν.2.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των ADSL και VDSL τεχνολογιών.

[1] [5] [6] [12] [13]

⁶ Plain Old Telephone Service

2.3 Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι τεχνολογιών xDSL

2.3.1 Εισαγωγή

Όλες οι τεχνολογίες της οικογένειας DSL συνοδεύονται από υποστηρικτικούς μηχανισμούς που αποσκοπούν στην επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας, την ελαχιστοποίηση λαθών, στην αντιμετώπιση των δυσμενών συνθηκών μετάδοσης μέσω του ενσύρματου διαύλου αλλά και την προσαρμογή σε ιδιαίτερες συνθήκες (συμμόρφωση με κανονισμούς, αρμονική συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες). Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικότεροι από τους μηχανισμούς αυτούς, ενώ στο τέλος του Κεφ.2, στους πίνακες της Εν.2.3.9 φαίνεται σε ποιες τεχνολογίες είναι διαθέσιμοι (Πιν.2.6) και σε ποιες περιπτώσεις εφαρμόζονται (Πιν.2.7).

2.3.2 Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για διόρθωση λαθών μετάδοσης

2.3.2.1 Κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών

Η πληροφορία στις τεχνολογίες DSL είναι υπό ψηφιακή μορφή, δηλαδή σε μορφή 0 και 1 (δυναδικά ψηφία – bits). Σε μια ιδιαίτερα απλουστευμένη περιγραφή, η ψηφιακή πληροφορία χωρίζεται σε πακέτα πλήθους n bits που αποτελούνται από 2 τμήματα: το τμήμα που περιέχει k bits πληροφορίας (payload) και το τμήμα της επικεφαλίδας (header) που περιέχει $n-k$ bits πρόσθετης πληροφορίας. Ενδεικτικά, στην επικεφαλίδα μπορεί να περιλαμβάνονται bits που υποδηλώνουν τον προορισμό της πληροφορίας, την προτεραιότητα στη μετάδοση του πακέτου και bits που επιτρέπουν την ανίχνευση και διόρθωση λαθών μετάδοσης (βλ. Εν.2.3.2.2 και Εν.2.3.2.3).

Η εισαγωγή πλεονάζουσας πληροφορίας με δομημένο και στοχευμένο τρόπο ώστε η μετάδοση να καταστεί περισσότερο εύρωστη στις δυσμενείς συνθήκες του διαύλου ονομάζεται κωδικοποίηση. Γίνεται αντιληπτό ότι η μετάδοση κωδικοποιημένης ψηφιακής πληροφορίας απαιτεί χαμηλότερο SNR λήψης σε σχέση με τη μετάδοση ακωδικοποιητής πληροφορίας για την επίτευξη της ίδιας πιθανότητας λάθους. Η διαφορά των SNR που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένου BER χωρίς και με κωδικοποίηση, αντίστοιχα, ονομάζεται κέδρος κωδικοποίησης. Ωστόσο, η εισαγωγή πλεονάζουσας πληροφορίας μειώνει τον ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης (R_u), δηλαδή το ρυθμό μετάδοσης της χρήσιμης πληροφορίας, σύμφωνα με τη σχέση

$$R_u = \alpha * R_b \quad (2.12)$$

όπου

$$\alpha = k/n \quad (2.13)$$

ο ρυθμός κώδικα και R_b είναι ο ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης σε bps.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι κωδικοποίησης για τη διόρθωση λαθών, η συνελικτική και η block κωδικοποίηση. Η συνελικτική κωδικοποίηση πραγματοποιείται σχηματίζοντας τη συνέλιξη των ψηφίων πληροφορίας με την απόκριση ενός καταχωρητή ολίσθησης πεπερασμένων καταστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η αντιμετώπιση λαθών που οφείλονται σε λευκό θόρυβο εισάγοντας μικρή επιβάρυνση σε bits. Ωστόσο, είναι δύσκολη η διόρθωση σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποια μεγαλύτερη σε διάρκεια ριπή θορύβου.

Οι block κώδικες εφαρμόζονται σε μπλοκ που αποτελούνται από ομάδες ψηφίων σταθερού μήκους και παράγουν μία κωδική λέξη για κάθε τέτοια ομάδα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η διόρθωση πολλών διαδοχικών λαθών που οφείλεται σε κάποια ριπή θορύβου με αντίτιμο την αύξηση είτε της καθυστέρησης είτε του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης. [35]

2.3.2.2 Cyclic Redundancy Check (CRC)

Ο έλεγχος κυκλικού πλεονασμού αποτελεί είδος block κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της ύπαρξης λαθών (error detection code) και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις (σύνθετοι CRC κώδικες) για τη διόρθωση. Υπολογίζεται για τα δεδομένα του προς αποστολή πλαισίου μία τιμή ελέγχου (check value) μικρού μεγέθους η οποία προσκολλάται στο πλαίσιο και αποστέλλεται μαζί με αυτό. Συνήθως η τιμή ελέγχου είναι το υπόλοιπο της διαίρεσης modulo 2 του δυαδικού πολυωνύμου που αντιστοιχεί στη σειρά δυαδικών ψηφίων του πλαισίου με καθορισμένο πολυώνυμο γεννήτρια. Κατά τη λήψη, επαναλαμβάνεται ο ίδιος υπολογισμός και, στη συνέχεια, συγκρίνονται οι δύο τιμές ελέγχου. Αν είναι διαφορετικές, συμπεραίνεται ότι έχει γίνει λάθος κατά τη μετάδοση και ο δέκτης αποστέλλει αίτημα για εκ νέου αποστολή των δεδομένων. Αν οι τιμές είναι ίδιες, συμπεραίνεται ότι δεν έχει γίνει λάθος και η επεξεργασία του ληφθέντος σήματος συνεχίζεται κανονικά. Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις όπου ενώ οι τιμές ελέγχου είναι ίδιες, έχουν γίνει λάθη κατά τη μετάδοση τα οποία απλώς δεν ανιχνεύθηκαν. [15] [36]

2.3.2.3 Forward Error Correction (FEC) μέσω κωδικοποίησης Reed Solomon

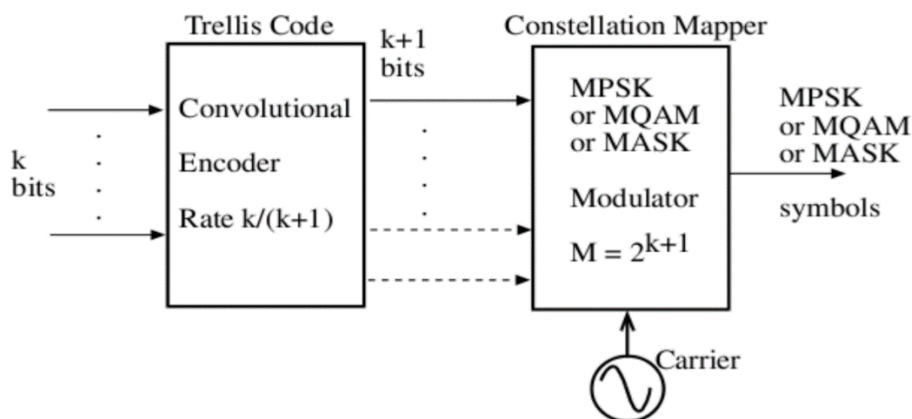
Μέσω της κατάλληλης προσθήκης πλεοναζόντων ψηφίων, η κωδικοποίηση FEC επιτρέπει την ανίχνευση και τη διόρθωση συγκεκριμένου πλήθους λαθών ανά κωδική λέξη, οπότε δεν είναι αναγκαία η εκ νέου αποστολή της κωδικής λέξης. Η κωδικοποίηση Reed Solomon (RS) χρησιμοποιείται ευρέως στις DSL τεχνολογίες και ανήκει στην οικογένεια των μη δυαδικών block κωδικοποιήσεων. Σε αυτή την οικογένεια, K σύμβολα πληροφορίας μετατρέπονται σε κωδικές λέξεις μήκους N συμβόλων. Τα σύμβολα πληροφορίας σχηματίζονται βάσει ενός μη δυαδικού αλφάβητου μεγέθους 2^k , όπου κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε k ψηφία. Η κωδικοποίηση Reed Solomon έχει δυνατότητα διόρθωσης $t=0.5*(N-K)$ λανθασμένων συμβόλων ανά κωδική λέξη συμβόλων με συχνότερα απαντώμενες τις τιμές $N=2^k-1$ και $K=0, \dots, N-1$. Στις DSL τεχνολογίες η κωδικοποίηση συνδυάζεται με την τεχνική της ανάδευσης (Ev.2.3.3.2) για τη βελτίωση της απόδοσής της σε περιπτώσεις καταίγισμου λαθών. [7]

2.3.2.4 Κωδικοποιημένη διαμόρφωση

Η κωδικοποιημένη διαμόρφωση (Coded Modulation – CM) είναι τεχνική που στοχεύει στην από κοινού βελτιστοποίηση της διαδικασίας της κωδικοποίησης και της διαμόρφωσης οδηγώντας σε σημαντικά κέρδη κωδικοποίησης χωρίς την ανάγκη αύξησης του εύρους ζώνης. Όταν η κωδικοποιημένη διαμόρφωση συνδυάζεται με συνελκτικούς κώδικες ονομάζεται κωδικοποιημένη διαμόρφωση trellis (Trellis Coded Modulation – TCM) ενώ όταν συνδυάζεται με block κώδικες ονομάζεται κωδικοποιημένη διαμόρφωση lattice.

Το δομικό διάγραμμα της TCM παρουσιάζεται στο Σχ.2.9. Εισάγονται στον κωδικοποιητή k ψηφία και εξάγονται $k+1$ τα οποία εισέρχονται σε ένα διαμορφωτή MPSK (Multiple Phase Shift Keying) ή MAPSK (Multiple Amplitude Phase Shift Keying) ή MQAM, ο οποίος αντιστοιχίζει τους 2^k συνδυασμούς ψηφίων εισόδου σε $M=2^{k+1}$ σημεία του αστερισμού του. Διπλασιάζονται δηλαδή τα σημεία του αστερισμού χωρίς να αυξάνεται η ισχύς, με αποτέλεσμα να πυκνώνει ο αστερισμός, οπότε, φαινομενικά, χειροτερεύει η επίδοση.

Ωστόσο, αν, διατηρώντας το εύρος ζώνης σταθερό, το κέρδος κωδικοποίησης που επιτυγχάνεται είναι μεγαλύτερο από την πρόσθετη ισχύ που απαιτείται για να μείνει σταθερή η πιθανότητα λανθασμένου ψηφίου τότε η τεχνική αυτή θεωρείται αποτελεσματική. [7]



Σχήμα 2.9: Δομικό διάγραμμα της κωδικοποιημένης διαμόρφωσης trellis

2.3.2.5 Scrambling (περίπλεξη)

Τα δεδομένα που μεταδίδονται συχνά περιέχουν πολλά διαδοχικά ίδια ψηφία (00...00 ή 11...11). Τέτοιου είδους ακολουθίες μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές σε γειτονικές γραμμές. Ως εκ τούτου, πρέπει να προηγείται της μετάδοσης κατάλληλη επεξεργασία αυτών των ροών μέσω της διαδικασίας της περίπλεξης (αντικατάσταση ή μετακίνηση των ροών). Με αυτόν τον τρόπο προσδίδονται στο προς μετάδοση σήμα συγκεκριμένες ιδιότητες οπότε και αποφεύγονται τυχόν αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρουν οι συγκεκριμένες ακολουθίες. Η περίπλεξη προηγείται της κωδικοποίησης FEC. [14]

2.3.2.6 Άλλες τεχνικές

Η προσθήκη κυκλικού προθέματος (Εν.2.2.3), η ανάδευση (Εν.2.3.3.2) καθώς επίσης και οι τεχνικές που αναλύθηκαν στην Εν.2.3.2. περιλαμβάνονται και εφαρμόζονται στη διαδικασία της διαμόρφωσης και κωδικοποίησης της πληροφορίας με συγκεκριμένη σειρά και παραμέτρους που περιγράφονται αναλυτικά στα πρότυπα των DSL τεχνολογιών. Οι αντίστροφες διαδικασίες αυτών πραγματοποιούνται με αντίστροφη σειρά κατά την αποδιαμόρφωση και αποκωδικοποίηση κατά τη λήψη.

2.3.3 Προστασία από τον κρουστικό θόρυβο

2.3.3.1 Ο κρουστικός θόρυβος

Ο κρουστικός θόρυβος (impulsive noise) έχει τη μορφή ριπών μεγάλου πλάτους, μεγάλου εύρους ζώνης και μικρής διάρκειας. Συνήθως, προκαλείται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχεται από πηγές όπως γραμμές ισχύος, διακόπτες, αστραπές ή λαμπτήρες φθορισμού και προέρχεται από την πλευρά του χρήστη όταν στο χώρο του υπάρχει πληθώρα ηλεκτρικών συσκευών που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Λόγω του ότι ο κρουστικός θόρυβος προκαλεί απότομες και ισχυρές μεταβολές στο SNR λήψης, αποτελεί βασική αιτία υποβάθμισης της ποιότητας της DSL υπηρεσίας.

Χωρίς την κατάλληλη εφαρμογή αντίμετρων, πλήθος διαδοχικών πακέτων μπορεί να επηρεαστεί σε τέτοιο βαθμό ώστε η προς μετάδοση πληροφορία να μην μπορεί να ανακτηθεί, οπότε να πρέπει να ζητηθεί η αναμετάδοση των πακέτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται, ενώ υπάρχει περίπτωση ακόμη και απώλειας του συγχρονισμού του δέκτη, οδηγώντας σε σημαντική υποβάθμιση της παρεχόμενης υπηρεσίας. Στον Πιν.2.3 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τριών ειδών κρουστικού θορύβου.

	REIN	PEIN	SHINE
Διάρκεια ριπών	100μs	1-10ms	>10ms
Επαναλαμβανόμενος	NAI	OXI	OXI

Πίνακας 2.3: Είδη κρουστικής μορφής θορύβου

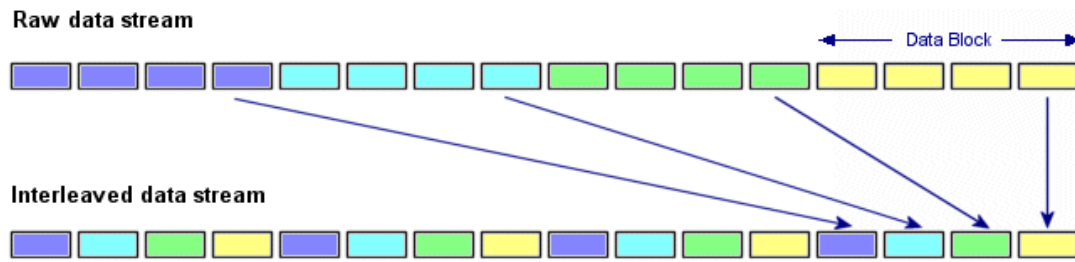
REIN: Repetitive Electrical Impulsive Noise

PEIN: Prolonged Electrical Impulsive Noise

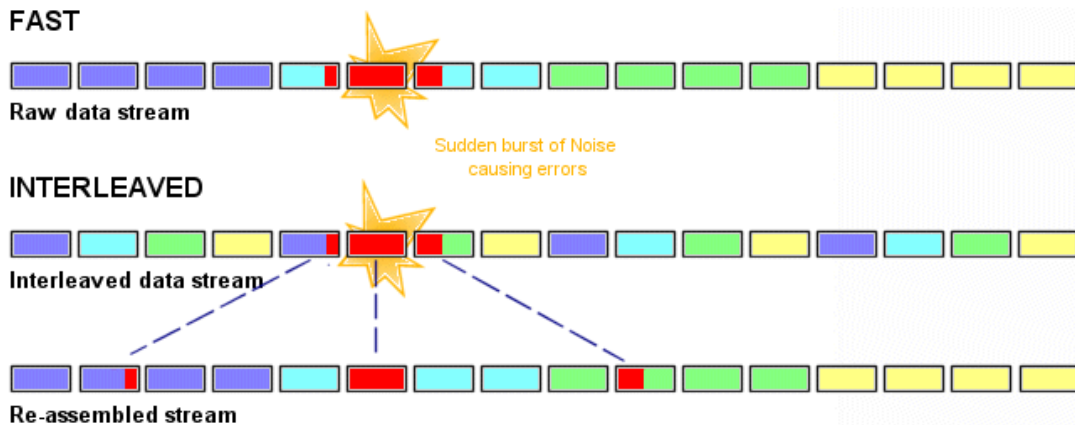
SHINE: Single High-level Impulse Noise Event [17] [18]

2.3.3.2 Ανάδευση (interleaving)

Η διαδικασία της ανάδευσης αποτελεί τεχνική που αποσκοπεί στο να καταστήσει τη διαδικασία της διόρθωσης λαθών αποτελεσματικότερη σε περιπτώσεις εμφάνισης κρουστικού θορύβου. Η κεντρική ιδέα περιλαμβάνει τον τεμαχισμό των πακέτων σε μικρότερα και την αναδιάταξή τους με τέτοιο τρόπο ώστε τα τμήματα κάθε πακέτου να μην βρίσκονται διαδοχικά το ένα μετά το άλλο αλλά να είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχ.2.10. Κατά τη λήψη, πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία ώστε να αναδημιουργηθεί η αρχική σειρά. Με αυτόν τον τρόπο, σε περίπτωση εμφάνισης ριπής θορύβου, επηρεάζεται ένα μικρό τμήμα του ή των πακέτων (Σχ.2.11) με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα απώλειας ολόκληρων πακέτων και να είναι δυνατή η διόρθωση των λαθών χωρίς να είναι απαραίτητη η εκ νέου αποστολή των πακέτων (μπορεί να χρειαστεί η εκ νέου αποστολή μόνο ενός τμήματος). Μειονέκτημα της τεχνικής της ανάδευσης/διαστρωμάτωσης αποτελεί η χρονική καθυστέρηση που απαιτείται για την ανασύνθεση των τεμαχισμένων πακέτων. [18]



Σχήμα 2.10: Διαδικασία διαστρωμάτωσης



Σχήμα 2.11: Επίδραση κρουστικής μορφής θορύβου

2.3.3.3 Impulse Noise Protection (INP)

Η παράμετρος της προστασίας από κρουστικό θόρυβο εισήχθη με το ADSL2. Η τιμή της δηλώνει τον αριθμό των συνεχόμενων DMT (Discrete Tone Modulation) συμβόλων που μπορούν να διορθωθούν από τον FEC κώδικα κατά την αποανάδευση ανεξάρτητα από το πλήθος των λαθών που προκαλείται σε κάθε σύμβολο. Στην ουσία, πρόκειται για παράμετρο που προσδιορίζει τη διορθωτική ικανότητα της γραμμής. Για παράδειγμα, αν η τιμή της παραμέτρου είναι 3 αυτό σημαίνει ότι μία ριπή θορύβου που διαρκεί 3 DMT σύμβολα μπορεί να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα από το πόσα λάθη υπάρχουν σε κάθε σύμβολο. [18] [20]

2.3.3.4 Impulse Noise Monitor (INM)

Η τεχνική της παρακολούθησης κρουστικού θορύβου εισήχθη στις DSL τεχνολογίες, ώστε βάσει των χαρακτηριστικών του θορύβου να είναι εφικτή η ανάθεση βέλτιστων τιμών στις ρυθμιζόμενες παραμέτρους που σχετίζονται με την προστασία από θόρυβο, όπως είναι η ελάχιστη προστασία από θόρυβο (minimum INP) και η μέγιστη καθυστέρηση ανάδευσης (maximum interleaving delay) η οποία δηλώνει το άνω όριο κατά το οποίο είναι επιτρεπτό να καθυστερήσει η μετάδοση εξαιτίας της πρόσδοσης διορθωτικής ικανότητας στο σήμα μέσω της ανάδευσης. [13] [17]

2.3.3.5 Physical Layer Retransmission (G.INP)

Η λειτουργία αυτή, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη σύσταση της ITU G.998.4, αποσκοπεί στη μείωση των λαθών και την αντιμετώπιση της αστάθειας της σύνδεσης που οφείλεται σε ριπές θορύβου τύπου REIN και SHINE μέσω της επανεκπομπής των πακέτων που έχουν επηρεαστεί. Βελτιώνει την αποδοτικότητα του συστήματος, διότι η προστασία και η ισχύς αυτής παραμετροποιούνται δυναμικά εξασφαλίζοντας το βέλτιστο δυνατό trade-off μεταξύ προστασίας και ρυθμαπόδοσης.

Με τη βοήθεια της επανεκπομπής φυσικού επιπέδου βελτιώνεται η παράμετρος INP, ενώ παράλληλα διατηρείται υψηλός ο ρυθμός μετάδοσης και χαμηλή η καθυστέρηση μετάδοσης. Πλεονεκτήματα της λειτουργίας αυτής είναι:

- Η παροχή υψηλότερης προστασίας σε σχέση με το συνδυασμό κωδικοποίησης Reed Solomon και ανάδευσης
- Μικρότερη επιβάρυνση σε bits πλεονασμού για το ίδιο επίπεδο θορύβου, άρα υψηλότερο ωφέλιμο ρυθμό μετάδοσης
- Μείωση του ρυθμού μετάδοσης λόγω επαναποστολής συμβαίνει μόνο σε περίπτωση κρουστικής μορφής θορύβου που οδηγεί σε λάθη κατά τη μετάδοση
- Η ευελιξία της λειτουργίας επιτρέπει την αποτελεσματική αντιμετώπιση πολλών ειδών και συνδυασμών κρουστικού θορύβου (REIN, SHINE και συνδυασμοί αυτών) [13]

2.3.4 Προστασία από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων

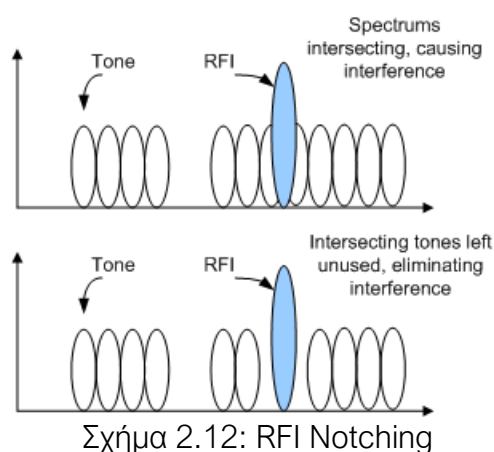
2.3.4.1 Παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων

Η παρεμβολή ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Interference - RFI) συνιστά ένα από τα βασικά αίτια υποβάθμισης της ποιότητας του DSL σήματος, λόγω της φασματικής επικάλυψης σημάτων με φασματικό περιεχόμενο που ανήκει στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων με τα σήματα των τεχνολογιών DSL (των οποίων το φασματικό περιεχόμενο ανήκει στην ίδια περιοχή). Καίτοι η παρεμβολή RFI αποτελεί παρεμβολή στενής ζώνης λόγω του συγκριτικά πολύ μικρότερου φάσματος των παρεμβαλλόντων σημάτων σε σχέση με το DSL σήμα, είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών μηχανισμών για την αντιμετώπισή της. Οι παρεμβολές RFI οφείλονται κυρίως στη ραδιοφωνία AM και στις εκπομπές ραδιοερασιτεχνών (amateur radio). Ενώ όλες οι DSL τεχνολογίες επηρεάζονται από τη ραδιοφωνία AM, οι εκπομπές ραδιοερασιτεχνών επηρεάζουν μόνο τις τεχνολογίες ADSL2+, VDSL και VDSL2 δεδομένου ότι η ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας του εκκινεί από συχνότητες άνω των 1.8MHz.

Οι τεχνικές αντιμετώπισης του RFI μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Υπάρχουν οι αναλογικές μέθοδοι καταστολής, που εφαρμόζονται πριν από τον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα του δέκτη. Λόγω της μορφής τους, τα σήματα που προέρχονται από την εκπομπή ραδιοερασιτεχνών μπορεί να οδηγήσουν τον μετατροπέα σε κορεσμό (απομάκρυνση από την περιοχή γραμμικής λειτουργίας). Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ανάγκη είτε για αλλαγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας του μετατροπέα, είτε για εφαρμογή των αντίμετρων πριν από αυτό το στάδιο κάνοντας χρήση αναλογικών καταστολέων. Ωστόσο, εξαιτίας της αναλογικής φύσης του σήματος σε αυτό το στάδιο, η λειτουργία των αναλογικών καταστολέων χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος, έλλειψη ευελιξίας και εξάρτηση από τη μη γραμμική συμπεριφορά του αναλογικού κυκλώματος. Προς τούτο, υπάρχει η ανάγκη για εναλλακτική κατηγορία τεχνικών καταστολής που εφαρμόζονται μετά τη μετατροπή του σήματος λήψης σε ψηφιακό, οπότε και ονομάζονται ψηφιακές μέθοδοι. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η βέλτιστη αντιμετώπιση του RFI επιτυγχάνεται μέσω (ενεργών) μεθόδων που επιτρέπουν την συνεχή παρακολούθηση του σήματος παρεμβολών, οπότε και προσαρμόζουν την τιμή των διαφόρων παραμέτρων αντιστάθμισης κατάλληλα, είτε μία φορά κατά την εκκίνηση της υπηρεσίας, είτε πολλές φορές κατά τη διάρκεια της σταθερής λειτουργίας, εφόσον οι παρεμβολές μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου.

2.3.4.2 RFI Notching

Η βασική ιδέα της τεχνικής RFI notching, η οποία παρουσιάστηκε με το VDSL στοχεύοντας στην αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του RFI, είναι η αδρανοποίηση ορισμένων τόνων, όπως φαίνεται στο Σχ.2.12. Οι τόνοι βρίσκονται εκατέρωθεν των κεντρικών συχνοτήτων των παρεμβαλλόντων σημάτων. Με αυτόν τον τρόπο μετριάζεται η επίδραση του RFI. Αξίζει να σημειωθεί ότι, καθώς η φασματική πυκνότητα ισχύος των τόνων αυτών δεν μηδενίζεται, οι τόνοι αυτοί είναι ενδεχομένως σε θέση να μεταφέρουν ένα μικρό αριθμό bits. Στην περίπτωση όπου η παρεμβολή είναι ιδιαίτερα ισχυρή και η μέθοδος αυτή αποτύχει, χρησιμοποιείται η μέθοδος tone blackout (Εν.2.3.4.3) για την αντιμετώπιση των παρεμβολών. [5] [13]



Σχήμα 2.12: RFI Notching

2.3.4.3 Tone Blackout

Στην περίπτωση όπου σε ένα τμήμα του φάσματος του DSL σήματος υπάρχει θόρυβος έντονης και διαρκούς διακύμανσης, μέσω της τεχνικής του tone blackout απαγορεύεται στη φασματική ζώνη αυτή να μεταδίδονται δεδομένα, εξαλείφοντας με αυτόν τον τρόπο την παρεμβολή. Στην ουσία, απενεργοποιούνται οι αντίστοιχοι τόνοι και δεν μεταφέρουν καθόλου ισχύ και κανένα bit. Επίσης, η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση κατά την οποία ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για κάποιον ειδικό σκοπό, οπότε πρέπει να αποφευχθεί η παρεμβολή σε αυτές. [13]

2.3.4.4 Bit Swapping

Online Reconfiguration (OLR)

Οι υπηρεσίες DSL είναι υπηρεσίες που παραμένουν πάντα σε λειτουργία (χαρακτηρίζονται από μόνιμο συγχρονισμό) και οι περισσότερες συνδέσεις διατηρούνται για μεγάλες χρονικές περιόδους. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμών που επιτρέπουν την προσαρμογή των μόντεμ στις μεταβαλλόμενες συνθήκες θορύβου και καναλιού κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης. Συνήθως, μεταβάλλεται η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου, πιθανώς λόγω της ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης άλλων συστημάτων DSL ή ίσως λόγω της εμφάνισης ή της αλλαγής της ραδιοσυχνότητας εισόδου. Μέσω των τεχνικών ORL είναι εφικτή η τροποποίηση ορισμένων παραμέτρων ενόσω η DSL σύνδεση είναι ενεργή χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για λάθη ή διακοπή της υπηρεσίας.

Bit Swapping

Η τεχνική του bit swapping χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση των παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων, όπως και σε άλλες περιπτώσεις (θόρυβος διάρκειας της τάξης των ms, στενού εύρους ζώνης, μικρής έντασης που μεταβάλλεται αργά). Πρόκειται για μία μέθοδο OLR που αποσκοπεί στη διατήρηση του συγχρονισμού μιας σύνδεσης αντιμετωπίζοντας τις επιπτώσεις των ξαφνικών ριπών θορύβου χωρίς τη μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης. Ο πίνακας κατανομής των bits (Bit Allocation Table - BAT) παρέχει την αρχική κατανομή bits (bit allocation) στα υποκανάλια της άνω και της κάτω ζεύξης κατά την έναρξη λειτουργίας της σύνδεσης. Κατά τη διάρκεια της σύνδεσης σε κάθε άκρο της γραμμής παρακολουθούνται τα λάθη που γίνονται (error performance). Όταν το άκρο που λειτουργεί ως πομπός σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή αποστέλλει δεδομένα και το άκρο που λειτουργεί ως δέκτης ανιχνεύσει ότι ο λόγος σήματος προς θόρυβο σε κάποιο υποκανάλι έχει πέσει κάτω από συγκεκριμένο κατώφλι, αναζητεί άλλο υποκανάλι όπου μπορούν να μεταδοθούν ένα ή περισσότερα πρόσθετα bits, διατηρώντας σταθερό το συνολικό αριθμό bits του πίνακα κατανομής. Μέσω του καναλιού ελέγχου, ο δέκτης αποστέλλει αίτημα στον πομπό για να αλλάξει η κατανομή των bits. Αν ο πομπός δεν απαντήσει, δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή. Αν απαντήσει, ακολουθεί διαπραγμάτευση και τελικά προσαρμογή πομπού και δέκτη στη συμφωνηθείσα κατανομή των bits.

Όταν αλλάζει ο αριθμός των bits σε ένα υποκανάλι, είναι πιθανό να πρέπει να αλλάξει η ισχύς για να μπορέσει να διατηρηθεί το ίδιο περιθώριο θορύβου και η ίδια διορθωτική ικανότητα (error performance). Σε περιπτώσεις μεγάλων αστερισμών, η υποστήριξη επιπλέον bit απαιτεί μερικά dB αύξησης της χρήσης ισχύος έγχυσης για τη μετάδοσή τους. Αντίστοιχα, η αφαίρεση ενός bit από το κανάλι σημαίνει ότι η ισχύς μπορεί να μειωθεί κατά τον ίδιο βαθμό χωρίς να πρέπει να αλλάξει το περιθώριο θορύβου. Ως εκ τούτου, ο μηχανισμός bit swapping πρέπει να περιλαμβάνει πρόσθετο μηχανισμό αλλαγής της ισχύος των υποκαναλιών. [10] [13]

2.3.5 Προστασία από θόρυβο

Οι τεχνικές που περιγράφονται σε αυτήν την ενότητα (SRA, SOS, VN) όπως και η τεχνική του bit swapping που αναλύθηκε στην Εν.2.3.4.4 χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση ποικιλίας μορφών θορύβου που διαφέρουν ως προς τη διάρκεια, το εύρος ζώνης, την ένταση αλλά και την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλονται όπως φαίνεται στον Πιν.2.4.

Μορφή θορύβου \ Αντίμετρο	Bit Swapping	SRA	SOS	VN
Διάρκεια	Microseconds	Seconds	Milliseconds/ Seconds	Seconds
Φάσμα	Στενό	Ευρύ	Ευρύ	Ευρύ
Ένταση	Μικρή	Μικρή	Μεγάλη	Σταθερή
Μεταβολή	Αργή	Αργή	Γρήγορη	

Πίνακας 2.4: Αντίμετρα στις διάφορες μορφές θορύβου

2.3.5.1 Seamless Rate Adaptation (SRA)

Η απρόσκοπτη προσαρμογή ρυθμού μετάδοσης (SRA) είναι μία τεχνική που εφαρμόζεται κυρίως στα κανάλια των οποίων οι συνθήκες μεταβάλλονται αργά με το χρόνο και πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της μετάδοσης (OLR). Ο στόχος της είναι η διατήρηση του περιθωρίου θορύβου της σύνδεσης μέσα σε συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αναπροσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης βάσει των τρεχουσών παρατηρήσεων του περιθωρίου θορύβου. Η αλλαγή του ρυθμού μετάδοσης απαιτεί όπως είναι λογικό τη συνεχή παρακολούθηση του περιθωρίου θορύβου.

Όταν οι συνθήκες του διαύλου δεν είναι ευνοϊκές (παρατηρούνται αυξημένα επίπεδα θορύβου) και η μέθοδος του bit swapping (Εν.2.3.4.4) δεν μπορεί να διατηρήσει το ποσοστό των λαθών κάτω από το επιτρεπτό όριο, μέσω του SRA μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης, ενώ όταν οι συνθήκες βελτιωθούν, ο ρυθμός αυξάνεται, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Προφανώς, μειωμένος ρυθμός μετάδοσης αντιστοιχεί σε αυξημένο περιθώριο θορύβου και αντιστρόφως. Καθώς οι μεταβολές στο ρυθμό μετάδοσης δεν οδηγούν σε επαναπροσαρμογή λειτουργίας (retraining) ή σε διακοπή της υπηρεσίας (service interruption), η περιγραφείσα διαδικασία χαρακτηρίζεται ως απρόσκοπτη (seamless). Ωστόσο, υπάρχει περίπτωση η χειροτέρευση των συνθηκών θορύβου να συμβεί τόσο απότομα, ώστε η επαναπροσαρμογή λειτουργίας να είναι απαραίτητη.

Όταν το περιθώριο θορύβου πέσει κάτω από συγκεκριμένο όριο, ο εξοπλισμός του χρήστη (Customer Premises Equipment - CPE) αποστέλλει μήνυμα στο DSLAM ζητώντας τη μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Όσο ο ρυθμός μειώνεται, το περιθώριο θορύβου αυξάνεται και μόλις φθάσει μία οριακή τιμή, τότε ο ρυθμός σταθεροποιείται. Αντίστροφα, όταν το περιθώριο θορύβου υπερβεί συγκεκριμένο όριο ο εξοπλισμός του χρήστη αποστέλλει μήνυμα στο AK ζητώντας την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Όσο ο ρυθμός αυξάνεται, το περιθώριο θορύβου μειώνεται και μόλις φθάσει μία οριακή τιμή, τότε ο ρυθμός σταθεροποιείται. [13]

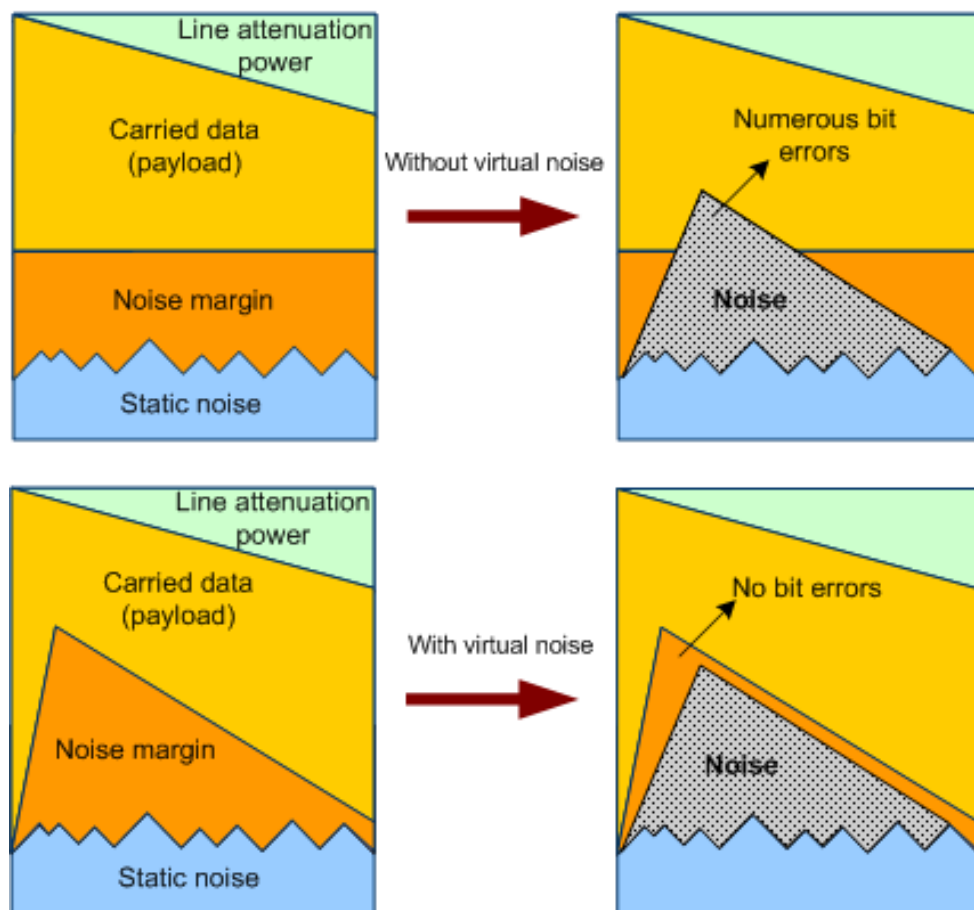
2.3.5.2 SOS (Save Our Showtime)

Η τεχνική SOS χρησιμοποιείται στην περίπτωση απότομης αύξησης του θορύβου και ανήκει και αυτή στην οικογένεια των μηχανισμών OLR. Οι αλλαγές των παραμέτρων που πραγματοποιούνται μέσω αυτής της τεχνικής δεν οδηγούν σε εμφάνιση εσφαλμένων πλαισίων κατά τη μετάδοση ούτε και διακοπή της παρεχόμενης υπηρεσίας. Όταν αυξάνεται απότομα ο θόρυβος, μειώνεται σημαντικά η τιμή του SNR λήψης σε πολλά υποκανάλια και, συνεπώς, αυξάνεται το ποσοστό λαθών. Ως εκ τούτου, αν δεν εφαρμοστεί κάποιο αντίμετρο, θα ενεργοποιηθεί η διαδικασία της επαναπροσαρμογής λειτουργίας και η υπηρεσία θα διακοπεί. Μέσω του SOS παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας σε χαμηλότερο ρυθμό σε σχέση με αυτόν που υπήρχε πριν από την εμφάνιση των δυσμενών αυτών συνθηκών χωρίς να διακοπεί η υπηρεσία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης του αριθμού των bits που είχαν αρχικά κατανεμηθεί σε μία ομάδα υποκαναλιών (ώστε να αυξηθεί ξανά το SNR και να πέσει το ποσοστό λαθών κάτω από το επιτρεπτό όριο). Όταν ο θόρυβος εξαιρεθεί, ο ρυθμός μετάδοσης επανέρχεται στο προηγούμενο επίπεδο. Η όλη διαδικασία ολοκληρώνεται σε λιγότερο χρόνο από τη διαδικασία του SRA. [13] [17]

2.3.5.3 Εικονικός θόρυβος (Virtual Noise – VN)

Η μέθοδος του εικονικού θορύβου έχει ως στόχο τη δημιουργία μίας μάσκας θορύβου η οποία θα προσεγγίζει πολύ τις πραγματικές μεταβολές του θορύβου εξασφαλίζοντας καλύτερες επιδόσεις και μεγαλύτερη σταθερότητα στη γραμμή. Χωρίς τη χρήση της VN μάσκας, υπάρχει ο κίνδυνος είτε να υπερεκτιμηθεί το περιθώριο θορύβου (το οποίο παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της μετάδοσης), οδηγώντας σε αναίτια χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, είτε να υποτιμηθεί, οδηγώντας σε αυξημένο ποσοστό λαθών όπως φαίνεται στο Σχ.2.13. Για τον καθορισμό μιας αποτελεσματικής μάσκας εικονικού θορύβου (η οποία ορίζεται μέσω *break points*) απαιτείται η συλλογή πληροφοριών σχετικά με το θόρυβο για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στην πράξη, κατά το συγχρονισμό γίνεται μέτρηση του θορύβου στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων και, βάσει της μέτρησης αυτής, ακολουθεί ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης και της κατανομής των bits (bit allocation) για κάθε υποκανάλι. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται ένα σχήμα εικονικού θορύβου για κάποιο από τα κανάλια, τότε λαμβάνεται και αυτό υπόψη. Τέλος, καίτοι τα πρότυπα ορίζουν λεπτομερώς τον τρόπο με τον οποίο ο εικονικός θόρυβος πρέπει να εκφράζεται, την ακριβή του μορφή ορίζουν κάθε φορά οι πάροχοι στον ενεργό εξοπλισμό ανάλογα με τις εκάστοτε σηματοθορυβικές συνθήκες. [13] [17] [25]



Σχήμα 2.13: Επίδραση θορύβου με ή χωρίς την εφαρμογή μάσκας εικονικού θορύβου

2.3.6 Προστασία από παρεμβολές

2.3.6.1 Echo cancellation

Λόγω των ατελειών της υβριδικής διεπαφής, η οποία μετατρέπει στο ΑΚ το συνεστραμμένο ζεύγος αμφίδρομων καλωδίων σε ένα σύστημα 4 μονοκατευθυντικών καλωδίων, υπάρχουν αναντιστοιχίες στις αντιστάσεις με αποτέλεσμα ένα δημιουργείται ηχώ του. Η ηχώ αποτελεί βασική πηγή παρεμβολής, μολονότι η προέλευσή της είναι γνωστή. Καίτοι το υβριδικό κύκλωμα προσπαθεί αυτόνομα να μειώσει τη λαμβανόμενη ηχώ, δεν είναι επαρκές, οπότε και απαιτείται η χρήση προσαρμοζόμενων καταστολέων ηχούς. [5] [27]

2.3.6.2 PSD Masking

Η «απόκρυψη» φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD masking) είναι μία μέθοδος ελέγχου της ισχύος έγχυσης. Μέσω της μάσκας PSD ορίζεται η μέγιστη επιτρεπτή ισχύς έγχυσης σε κάθε συχνότητα. Για τον καθορισμό της μάσκας, προσδιορίζονται αρχικά οι τιμές της PSD σε ένα σύνολο συχνοτήτων (τα λεγόμενα breakpoints – οριακά σημεία) και οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με την εφαρμογή της μαθηματικής μεθόδου της παρεμβολής (interpolation). Σε ορισμένα πρότυπα της ITU ορίζονται τρία είδη φασματικών μασκών η οριακή μάσκα (limit PSD mask), η μάσκα που ελέγχεται από τη βάση πληροφοριών διαχείρισης (MIB PSD mask, MIB-Management Information Base) και μάσκα μετάδοσης (transmit PSD mask).

Η οριακή μάσκα προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή της φασματικής πυκνότητας ισχύος για όλες τις συχνότητες (τόσο για τη ζώνη διέλευσης⁷ όσο και για τη ζώνη αποκοπής⁸). Ορίζεται ξεχωριστά για την άνω και κάτω ζεύξη, όπως επίσης και για κάθε διαφορετικό προφίλ λειτουργίας (όπως στην περίπτωση του VDSL2).

Η MIB PSD μάσκα καθορίζεται από τον πάροχο μόνο για τη ζώνη διέλευσης και αποσκοπεί στον περιορισμό της ισχύος σε επίπεδα χαμηλότερα (ή το πολύ ίσα) από αυτά που ορίζει η οριακή μάσκα. Υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί μάσκα μόνο για μία από τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης ή ακόμα και για ένα τμήμα μόνο του εύρους ζώνης διέλευσης. Η χρήση της μάσκας αυτής προσφέρει την ευελιξία στους παρόχους να ελέγξουν την ισχύ (και να μειώσουν τις ενδεχόμενες παρεμβολές) με βάση διάφορα κριτήρια που δεν λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της οριακής μάσκας. Τέτοια κριτήρια είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ή η συνύπαρξη με άλλες φασματικά επικαλυπτόμενες τεχνολογίες (οι περιορισμοί λόγω των παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων δεν λαμβάνονται υπόψη από αυτή τη μάσκα).

Η μάσκα μετάδοσης προκύπτει επιλέγοντας σε κάθε συχνότητα την ελάχιστη τιμή της ισχύος μεταξύ αυτών που ορίζουν η οριακή μάσκα, η ελεγχόμενη μάσκα και ορισμένοι περιορισμοί που επιβάλλονται από τον πάροχο. [13] [23]

⁷ Το τμήμα του φάσματος συχνοτήτων στο οποίο επιτρέπεται να μεταδίδονται δεδομένα. Μπορεί να αποτελείται από πολλά μη διαδοχικά τμήματα του φάσματος.

⁸ Το τμήμα του φάσματος συχνοτήτων στο οποίο δεν επιτρέπεται να μεταδίδονται δεδομένα.

2.3.6.3 PSD shaping (Διαμόρφωση φασματικής πυκνότητας ισχύος)

Η μέθοδος PSD shaping αποσκοπεί στην αντιμετώπιση της παρεμβολής που προκαλείται ανάμεσα σε γραμμές του ίδιου καλωδίου, διαμορφώνοντας τη φασματική πυκνότητα ισχύος των γραμμών κατά τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή σχέση μεταξύ της αύξησης της ταχύτητας της γραμμής που υφίσταται την παρεμβολή και της μείωσης της ταχύτητας της γραμμής που προκαλεί την παρεμβολή. Για τον έλεγχο της PSD της άνω ζεύξης, εφαρμόζεται ο μηχανισμός UPBO ενώ για τον έλεγχο στην κάτω ζεύξη εφαρμόζεται ο μηχανισμός DPBO. Στην πράξη, οι ανωτέρω μηχανισμοί προσαρμόζουν μέσω συγκεκριμένων παραμέτρων τη μάσκα φασματικής πυκνότητας ισχύος της ζεύξης σε κατάλληλα επίπεδα ισχύος ώστε να επιτυγχάνεται ο προαναφερθείς στόχος.

Downstream Power Back-off (DPBO)

Η τεχνική αυτή έχει οριστεί της συστάσεις της ITU-T για το ADSL2, ADSL2+ και VDSL2. Ο στόχος είναι η μείωση της ισχύος κάτω ζεύξης που εγχέεται στον υπαίθριο καταναμητή ή σε κάποιον ενδιάμεσο καταναμητή στο επίπεδο που θα προέκυπτε αν το σήμα εγχεόταν από το ΑΚ. Ο βαθμός της μείωσης αυτής ελέγχεται από μία συνάρτηση του ηλεκτρικού μήκους του καλωδίου, εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Η μέθοδος αυτή δεν περιορίζει την ισχύ έγχυσης στις υψηλές συχνότητες του απομακρυσμένα εγχεόμενου σήματος, καθώς λόγω της εξασθένησής τους από το μέσο μετάδοσης η παρεμβολή που προκαλούν είναι ανεπαίσθητη.

Upstream Power Back-off (UPBO)

Τα σήματα άνω ζεύξης των τεχνολογιών VDSL και VDSL2 συνήθως προέρχονται από CPEs που απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από το DSLAM. Αν οι εγχύσεις της άνω ζεύξης γίνονταν με την ίδια πυκνότητα φάσματος ισχύος και στο ίδιο επίπεδο ισχύος, τότε οι γραμμές μεγάλου μήκους θα υπέφεραν από υψηλής ισχύος FEXT από τις γραμμές μικρού μήκους. Η εφαρμογή του UPBO αποσκοπεί στη μείωση αυτού του είδους παρεμβολών. Μειώνοντας την ισχύ έγχυσης των CPEs που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από το DSLAM, μειώνεται η τηλεδιαφωνία που προκαλούν στις γραμμές που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από το DSLAM. [6] [17] [28]

2.3.6.4 Άλλες τεχνικές

Για την αντιμετώπιση των παρεμβολών μπορούν να αξιοποιηθούν επίσης οι τεχνικές Bit Swapping (Ev.2.3.4.4), SOS (Ev.2.3.5.2), Virtual Noise (Ev.2.3.5.3) αλλά και το Vectoring που περιγράφεται αναλυτικά στην Ev.1.3.8.2.

2.3.7 Αύξηση ρυθμού μετάδοσης μέσω της τεχνικής Bonding

Με την εφαρμογή του bonding (εικονικής συνένωσης γραμμών) παρέχεται η δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων διατηρώντας την ίδια απόσταση από τον ενεργό εξοπλισμό, είτε της αύξησης της απόστασης για την εξυπηρέτηση πιο απομακρυσμένων πελατών διατηρώντας σταθερό το ρυθμό μετάδοσης. Αυτό πρακτικά επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας δύο (ή και περισσότερες) γραμμές ως μία εικονική ενιαία γραμμή. [13]

2.3.8 Δυναμική διαχείριση φάσματος

2.3.8.1 Εισαγωγή

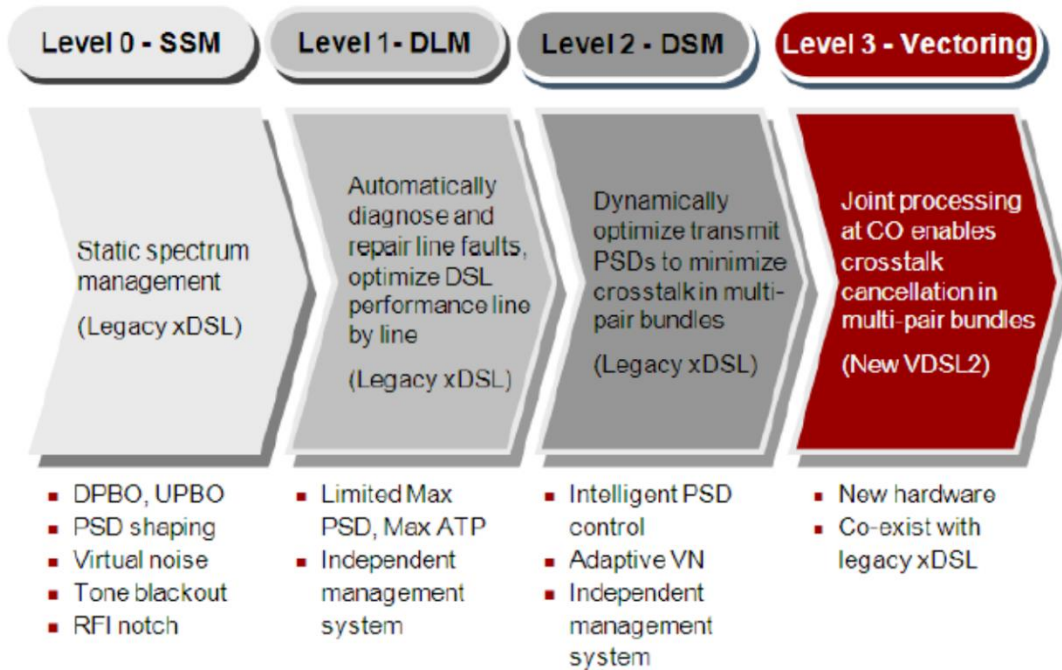
Η δυναμική διαχείριση φάσματος (Dynamic Spectrum Management – DSM) αυξάνει δραματικά την ταχύτητα (αλλά και την ποιότητα) των υπηρεσιών DSL. Όταν είναι δυνατός ο βέλτιστος βαθμός ενδοδιαχείρισης μεταξύ όλων των γειτονικών γραμμών μέσω κάποιου συστήματος διαχείρισης, είναι δυνατή η παροχή ως και 500Mbps σε ένα συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων. Ακόμα και με μικρό ή μέτριο συντονισμό ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται σημαντικά.

Η επίδοση οποιουδήποτε xDSL συστήματος εξαρτάται από το δίαυλο μετάδοσης και από τα επίπεδα θορύβου στο άκρο του διαύλου που λειτουργεί ως δέκτης. Η συνολική αθροιστική παρενόχληση προκαλείται από το λευκό θόρυβο Gauss, τον κρουστικό θόρυβο, από τα AM ραδιοσήματα καθώς και από τις παρεμβολές που προκαλούνται από τις γραμμές που συνυπάρχουν στο ίδιο καλώδιο. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα, δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί σε συγκεκριμένο κανάλι υπό δεδομένα επίπεδα θορύβου δίνεται από τη σχέση (1.5), για να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης πρέπει είτε να αυξηθεί η ισχύς έγχυσης του σήματος είτε να μειωθεί ο θόρυβος (το εύρος ζώνης παραμένει σταθερό). Μέσω της δυναμικής διαχείρισης του φάσματος όλων των γραμμών κατά τρόπο ώστε να μετριάζεται η παρεμβολή που οφείλεται σε γειτονικές γραμμές, βελτιώνεται η απόδοση των πομποδεκτών.

Όλα τα πρότυπα για τις τεχνολογίες DSL ορίζουν καθαρά την ανώτατη φασματική πυκνότητα ισχύος μετάδοσης (PSD Mask, Εν.2.3.6.2). Εφόσον το όριο αυτό δεν υπερβαίνεται, τα xDSL μόντεμ μπορούν να εγγέουν με όποια φασματική πυκνότητα ισχύος επιλέξουν. Με αυτή την προσέγγιση, προκύπτουν δύο σημαντικά προβλήματα:

- (i) Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται δεν είναι οι καταλληλότεροι για τις γραμμές.
- (ii) Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται είναι σημαντικά χαμηλότεροι από αυτούς που θα μπορούσαν να επιτευχθούν με μια δυναμική προσέγγιση (διαρκώς προσαρμοζόμενη στις σηματοθορυβικές συνθήκες), καθώς τα στατικά εύρη φάσματος σχεδιάζονται με βάση το χειρότερο δυνατό σενάριο συνθηκών μετάδοσης (υψηλά επίπεδα θορύβου και παρεμβολών).

Μέσω της δυναμικής διαχείρισης φάσματος όλοι οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται δυναμικά στις γραμμές που συμμετέχουν σε αυτή, βάσει των χαρακτηριστικών που εμφανίζουν οι αντίστοιχοι δίαυλοι και λαμβάνοντας υπόψη τις παρεμβολές που υφίστανται. Με την εγγύηση της φασματικής συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών, η δυναμική διαχείριση φάσματος υπόσχεται ταχύτερη και περισσότερο αξιόπιστη μετάδοση της πληροφορίας. Όπως φαίνεται από το Σχ.2.14, αναγνωρίζονται 4 επίπεδα διαχείρισης φάσματος, με κριτήριο το βαθμό συντονισμού που επιτυγχάνεται μεταξύ των γραμμών μετάδοσης. Εκτός από το επίπεδο 0, τα υπόλοιπα τρία επίπεδα έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι η κατανομή ισχύος και ρυθμού σε κάθε γραμμή ελέγχεται δυναμικά. Οι τεχνικές των τριών πρώτων επιπέδων βρίσκουν εφαρμογή στις παλαιότερες DSL τεχνολογίες, ενώ το Vectoring (επίπεδο 3) εφαρμόζεται στο VDSL2 (και στη πλέον εξελιγμένη DSL τεχνολογία G.Fast – Κεφ.3).



Σχήμα 2.14: Τα επίπεδα διαχείρισης φάσματος

- Στο επίπεδο 0, εντελώς αυτόνομες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επιλογή του φάσματος κάθε γραμμής και η διαχείριση του φάσματος είναι στατική (Static Spectrum Management – SSM). Γίνεται χρήση τεχνικών όπως είναι οι PSD shaping και PSD masking.
- Στο επίπεδο 1 ο προσδιορισμός του φάσματος κάθε διαύλου εξακολουθεί να γίνεται με αυτόνομο τρόπο, καθώς οι παράμετροι κάθε γραμμής παρακολουθούνται και μεταβάλλονται ανεξάρτητα. Η δυναμική διαχείριση φάσματος αυτού του επιπέδου είναι γνωστή υπό τον όρο Δυναμική Διαχείριση Γραμμής (Dynamic Line Management - DLM). Οι τεχνικές DLM παρακολουθούν και βελτιώνουν το ρυθμό μετάδοσης και επιπλέον συμβάλλουν στην απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου.
- Στο επίπεδο 2 η τοπολογία εντός του καλωδίου θεωρείται γνωστή. Ο στόχος της δυναμικής διαχείρισης φάσματος αυτού του επιπέδου είναι η συντονισμένη βελτιστοποίηση της επίδοσης όλων των δισύρματων γραμμών εντός του ίδιου καλωδίου. Για την τροποποίηση παραμέτρων των γραμμών λαμβάνονται υπόψη τόσο οι συνθήκες εντός του καλωδίου (θόρυβος, επιδόσεις γραμμών) όσο και οι παρεμβολές που προκαλούν οι γραμμές μεταξύ τους. Εκτός από τη συντονισμένη τροποποίηση των φασματικών παραμέτρων των γραμμών, στο επίπεδο 2 μπορεί να γίνει χρήση όλων των τεχνικών του επιπέδου 1.
- Στο επίπεδο 3 εφαρμόζονται τεχνικές Vectoring. Λόγω της ιδιαίτερης σημασίας του, το Vectoring παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εν.1.3.8.2. [6] [17]

2.3.8.2 Vectoring

Η μέθοδος καταστολής της διαφωνίας, γνωστή και ως vectoring, αποτελεί πολλά υποσχόμενη τεχνική που αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα των DSL δικτύων πρόσβασης. Η ανάπτυξη της τεχνικής μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, όταν δεν είναι δυνατή η εξάλειψη της διαφωνίας είτε λόγω γραμμών που δεν μπορούν να ελεγχθούν είτε λόγω έλλειψης των κατάλληλων μηχανισμών.

Καθώς πολλά ζεύγη χάλκινων αγωγών συνυπάρχουν στο ίδιο καλώδιο, παρεμβάλλουν το ένα στο άλλο με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονη διαφωνία. Μέσω της πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας επιτυγχάνεται ο φασματικός διαχωρισμός της άνω και της κάτω ζεύξης, οπότε δεν υπάρχει πλέον διαφωνία τύπου NEXT. Όμως, όταν οι πολλαπλοί χρήστες χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες για τη μετάδοση των δεδομένων, η διαφωνία τύπου FEXT συνιστά κύριο περιοριστικό παράγοντα της επίδοσης, μαζί με την εξασθένηση.

Το vectoring αποτελεί τεχνική επεξεργασίας των σημάτων που αποσκοπεί στη μείωση και ορισμένες φορές στην εξάλειψη της τηλεδιαφωνίας, αντιμετωπίζοντας το κανάλι ως ένα σύστημα πολλαπλών εισόδων και εξόδων (MIMO – Multiple Input Multiple Output). Η επίδοση της τεχνικής αυτής περιορίζεται από παράγοντες όπως το πώς επιλέγει κάθε πάροχος να αναπτύξει το δίκτυό του καθώς και από την αδεσμοποίητη πρόσβαση στον τοπικό βρόχο (Εν.1.1.4) η οποία καθιστά αδύνατη τη συνδιαχείριση όλων των γραμμών, καθώς διαφορετικοί πάροχοι ελέγχουν τα διάφορα τμήματα του συνολικού αριθμού των ζευγών στο ίδιο καλώδιο.

Αρχές λειτουργίας vectoring

Έστω Y_n το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης R_x , X_n το σήμα που στέλνει ο πομπός T_x και H_{nn} η συνάρτηση μεταφοράς του n -οστού καναλιού που ανήκει σε ένα καλώδιο N γραμμών. Χωρίς διαφωνία ισχύει

$$Y_n = H_{nn} * X_n \quad (2.14)$$

ενώ με διαφωνία ισχύει

$$Y_n = \sum_{k=1}^N h_{nk} * x_k \quad (2.15)$$

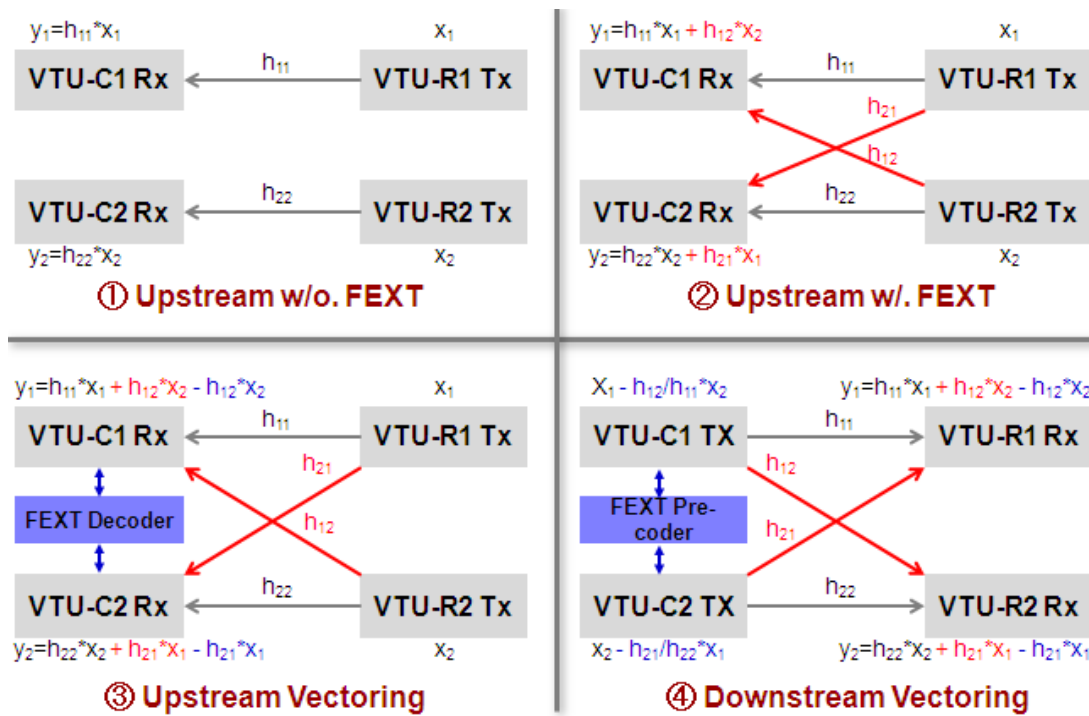
όπου οι όροι $h_{nk} * x_k$ για $n \neq k$ λαμβάνουν υπόψη τη παρεμβολή του καναλιού k στο n .

Για ευκολία θα παρουσιαστεί παράδειγμα της άνω ζεύξης 2 γραμμών DSL ($N = 2$), οπότε το σήμα λήψης σε κάθε περίπτωση αποτελείται από 2 όρους, το χρήσιμο σήμα και το αποτέλεσμα της διαφωνίας:

$$y_1 = h_{11} * x_1 + h_{12} * x_2, \quad (2.16)$$

$$y_2 = h_{22} * x_2 + h_{21} * x_1 \quad (2.17)$$

Σε μία ποιοτική ανάλυση της λειτουργίας του vectoring, στην άνω ζεύξη υπάρχει ο αποκωδικοποιητής FEXT ο οποίος εξάγει όλη την πληροφορία που αφορά τη διαφωνία, την οποία μετά αφαιρεί από το λαμβανόμενο σήμα. Αντίστοιχα, ο κωδικοποιητής στην κάτω ζεύξη εισάγει εκ των προτέρων στο σήμα την πληροφορία FEXT βάσει της διαπραγματεύσεως που έχει προηγηθεί μεταξύ CPE και CO η οποία αλληλοακυρώνεται με την πραγματική διαφωνία οπότε και το σήμα φθάνει στο δέκτη καθαρό. Στο Σχ.2.15 φαίνεται η λειτουργία του vectoring για την άνω και κάτω ζεύξη. Όσο απλοϊκή και αν φαίνεται η κεντρική ιδέα, η υλοποίησή της καλείται να αντιμετωπίσει αυξημένα επίπεδα μαθηματικής πολυπλοκότητας αλλά και άλλους περιορισμούς. [29] [30] [31]



Σχήμα 2.15: Vectoring

2.3.9 Συγκεντρωτική παρουσίαση χαρακτηριστικών DSL τεχνολογιών

Χαρακτ. \ Τεχν.	ADSL	ADSL2	ADSL2+	VDSL	VDSL2 (17a)
Πρότυπο ITU-T	G.992.1	G.992.3	G.992.5	G.993.1	G.993.2
Μέγιστη Ταχύτητα Μετάδοσης (DS/US)	8Mbps/1Mbps	12Mbps/1Mbps	24Mbps/1Mbps	52Mbps/6.4Mbps	100Mbps/50Mbps
Μέγιστη Απόσταση	4km	5km	6km	1,5km	400m
Εύρος ζώνης λειτουργίας	25kHz - 1,1MHz	25kHz - 1,1MHz	25kHz - 2,2MHz	25kHz - 12MHz	25kHz - 17,6MHz
Μέθοδος διαμόρφωσης	DMT	DMT	DMT	DMT	DMT
Αριθμός τόνων	255	255	512	4096 (max)	4096
Φασματική απόσταση τόνων (kHz)	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125
Ρυθμός συμβόλου	4kHz	4kHz	4kHz	4kHz	4kHz
Max bits/σύμβ.	15	15	15	8-15	15
Μέθοδος πολυπλεξής	FDD or echo cancelling	FDD or echo cancelling	FDD or echo cancelling	FDD	FDD

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά λειτουργίας τεχνολογιών DSL

Τεχνική \ Τεχνολ.	ADSL	ADSL2	ADSL2+	VDSL	VDSL2
CRC	✓	✓	✓	✓	✓
FEC with RS	✓	✓	✓	✓	✓
Trellis Coding	(optional)	(optional)	(optional)	✓	(optional)
Interleaving	✓	✓	✓	✓	✓
INP	-	✓	✓	-	✓
INM	-	✓	✓	-	✓
G.INP	-	✓	✓	-	✓
RFI Notching	-	-	-	✓	✓
Tone Blackout (missing tone)	-	✓	✓	✓	✓
Bit Swapping	✓	✓	✓	✓	✓
SRA	-	✓(optional)	✓(optional)	-	✓(optional)
SOS	-	-	-	-	✓
Virtual Noise	-	✓	✓	-	✓
Echo Cancellation	✓	✓	✓	✓	✓
PSD Masking	✓	✓	✓	✓	✓
UPBO	-	-	-	✓	✓
DPBO	-	✓	✓	-	✓
Bonding	-	✓	✓	✓	✓
Vectoring	-	-	-	-	✓

Πίνακας 2.6: Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι DSL τεχνολογιών

ΣΤΟΧΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΤΕΧΝΙΚΗ
Διόρθωση λαθών μετάδοσης	CRC, FEC with RS, Trellis Coding, Interleaving
Προστασία από θόρυβο κρουστικής μορφής	FEC + Interleaving, INM, G.INP
Προστασία από θόρυβο ποικίλων μορφών	Bit Swapping, SRA, SOS, Virtual Noise
Προστασία από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων	RFI Notching, Tone Blackout, Bit Swapping
Προστασία από παρεμβολές μεταξύ γειτονικών γραμμών	PSD Masking, UPBO, DPBO, Bit Swapping, SOS, Virtual Noise, Vectoring
Αύξηση ρυθμού μετάδοσης	Bonding

Πίνακας 2.7: Περιπτώσεις εφαρμογής υποστηρικτικών μηχανισμών DSL τεχνολογιών

2.4 Βιβλιογραφία

- [1] Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, «ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ: Τεχνολογίες και Εφαρμογές με Έμφαση στο Διαδίκτυο», Εκδόσεις Τζιόλα, 2013
- [2] http://www.ebusiness-lab.gr/files/dmdocuments/Ptyxiakes/PDFs/Pouliou_H_Eyryzwnikothta_kai_oi_Efarmoges_ths.pdf
- [3] http://telecomplatform.auth.gr/gr/broadband/broadband_definition.htm
- [4] Χρήστος Ι. Μπούρας, “Ευρυζωνικές τεχνολογίες”, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πάτρα 2009
- [5] Philip Golden, Herve Dedieu, Krista Jacobsen, «Fundamentals of DSL technology», Auerbach Publications, 2006
- [6] Λόουελ – Παναγιώτης Γ. Δήμος, «Διαχείριση Φάσματος και Έγχυσης Ισχύος στο Ελληνικό Δίκτυο Πρόσβασης Χαλκού», Διπλωματική εργασία
- [7] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, Παντελής-Δανιήλ Μ. Αράπογλου, «Ασύρματες επικοινωνίες», Εκδόσεις Τζιόλα, 2014
- [8] <http://www.rfwireless-world.com/Articles/OFDM-vs-DMT.html>
- [9] http://users.ece.utexas.edu/~bevans/courses/rtdsp/lectures/18_ADSL/guner/introadsl.pdf
- [10] https://kitz.co.uk/adsl/adsl_technology.htm
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_access
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/VDSL>
- [13] Huawei Technologies, «VDSL2 special access topic», 2015
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Scrambler>
- [15] https://kitz.co.uk/adsl/error_correction.htm
- [16] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, Χρήστος Ν. Καψάλης, «Δορυφορικές επικοινωνίες», Εκδόσεις Τζιόλα, 2016
- [17] Broadband Forum, TR-197 «DQS: DSL Quality Management Techniques and Nomenclature», 2012
- [18] <https://kitz.co.uk/adsl/interleaving.htm>
- [19] ITU-T Recommendation G.992.1 (ADSL)
- [20] ITU-T Recommendation G.992.3 (ADSL2)
- [21] ITU-T Recommendation G.992.5 (ADSL2+)
- [22] ITU-T Recommendation G.993.1 (VDSL)
- [23] ITU-T Recommendation G.993.2 (VDSL2)
- [24] <https://kitz.co.uk/adsl/retransmission.htm>
- [25] DIGITAL SUBSCRIBER LINE MANAGEMENT USING VIRTUAL NOISE CALCULATION, United States Patent
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Rate-Adaptive_Digital_Subscriber_Line
- [27] Philipp Maria Glatz, Christian Kranzler, «Echo cancellation in DSL SYSTEMS»

- [28] ITU-T Recommendation G.997.1 (Physical layer management for digital subscriber line transceivers)
- [29] George Ginis, and John M. Cioffi, «Vectored Transmission for Digital Subscriber Line Systems», IEEE JOURNAL, 2002
- [30] M. Guenach, J. Maes, M. Timmers, O. Lamparter, J.-C. Bischoff and M. Peeters1, «Vectoring in DSL systems: Practices and Challenges»
- [31] Huawei Technologies, «Vectoring Technology White Paper», 2015
- [32] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ, Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2019
- [33] https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_prefix
- [34] <https://en.wikipedia.org/wiki/2B1Q>
- [35] http://xanthippi.ceid.upatras.gr/courses/advcomm/Presentations/Block_Coding8.pdf
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check

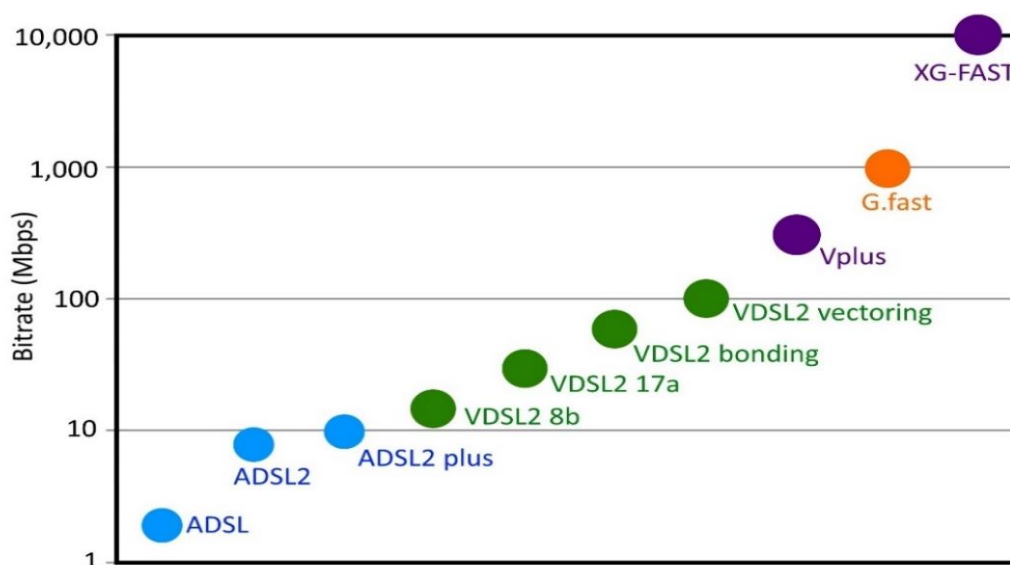
3 G.FAST

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογίας G.fast

Το πρότυπο του G.fast (G for ITU-T G series of recommendations, fast for Fast Access to Subscriber Terminals) αποτελεί την πλέον πρόσφατη τεχνολογία DSL για την παροχή υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων στους συνδρομητές πάνω από το υπάρχον δίκτυο χαλκού. Η έγκριση για τα πρότυπα (ITU-T G.9700, ITU-T G.9701) δόθηκε από την ITU μόλις το 2014. Η τεχνολογία αυτή στοχεύει στην επίτευξη ταχυτήτων έως 1Gbps ή 2Gbps (αθροιστικά για την άνω και κάτω ζεύξη) για μήκη βρόχου μικρότερα των 500m, αξιοποιώντας υψηλές συχνότητες που φθάνουν έως τα 106 ή τα 212MHz.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης καθιστούν αναγκαίες τις βελτιώσεις στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική του δικτύου. Η αύξηση των ταχυτήτων καθίσταται επιτακτική (μεταξύ άλλων) από αναπτυσσόμενες εφαρμογές όπως το cloud computing, big data, video streaming αλλά και από τον ισχυρό ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων. Η αποτελεσματικότερη λύση για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης είναι η αντικατάσταση του υπάρχοντος δικτύου χαλκού από οπτικές ίνες. Ωστόσο, το κόστος σε χρήματα και πόρους είναι τόσο υψηλό ώστε πρακτικά να είναι εφικτή μόνο η σταδιακή επέκταση του δικτύου οπτικών ινών.

Στην περίπτωση του G.fast, η έγχυση της ισχύος γίνεται ακόμα εγγύτερα προς τις εγκαταστάσεις των συνδρομητών, με την ίνα να φθάνει μέχρι το σημείο διανομής (Fiber To The Distribution Point - FTTP). Ταυτόχρονα, αξιοποιείται ένα σημαντικό τμήμα του δικτύου χαλκού ώστε να επιτυγχάνεται ένας εξαιρετικός συμβιβασμός, καθώς, όχι μόνο αυξάνεται σημαντικά ο ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με τις υπάρχουσες DSL τεχνολογίες (Σχ.3.1), αλλά αποφεύγονται οι δυσκολίες που συνεπάγεται η ανάπτυξη ενός δικτύου αποτελούμενου εξ ολοκλήρου από οπτικές ίνες. Η ανάπτυξη του G.fast είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανάπτυξη των συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης 4^{ης} γενιάς (The Fourth Generation Broadband Concept – 4GBB). [1]



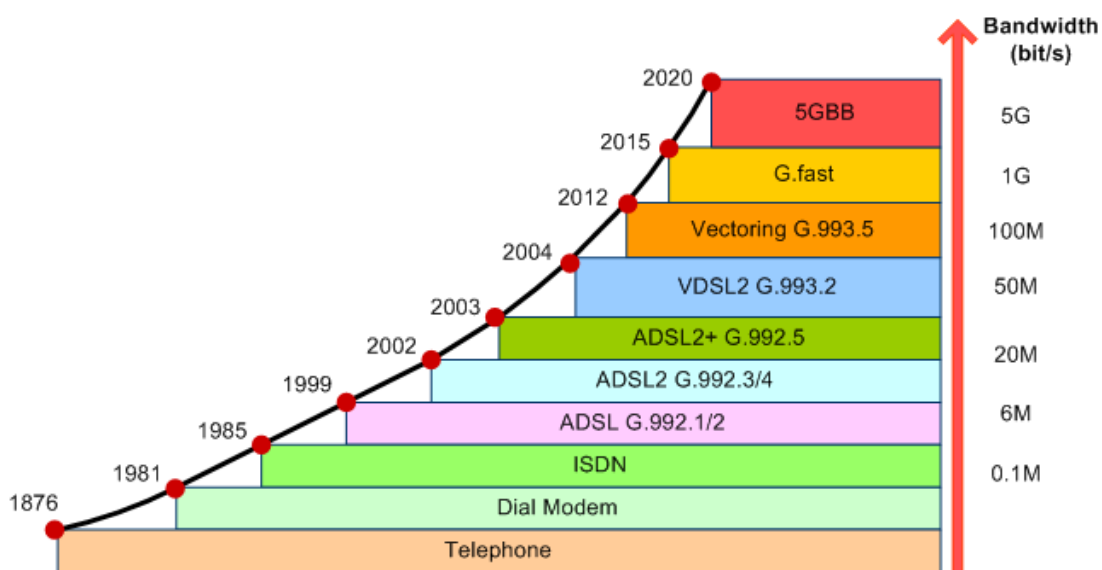
Σχ.3.1: Μείστοι ρυθμοί μετάδοσης DSL τεχνολογιών

3.2 Αρχιτεκτονική – Τοπολογίες δικτύου

3.2.1 Γενιές συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης

Τις τελευταίες 3 δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί 3 γενιές συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης, ενώ βρίσκεται υπό ανάπτυξη η τέταρτη γενιά (4GBB). Βασικό χαρακτηριστικό των δύο πρώτων γενιών είναι ότι η έγχυση της υπηρεσίας γίνεται από το ΑΚ. Η πρώτη γενιά (ISDN) σηματοδότησε την έναρξη μετάδοσης δεδομένων με τη χρήση dial-up modems, ενώ με τη δεύτερη γενιά (με χαρακτηριστικό παράδειγμα το ADSL) άρχισε να αξιοποιείται σημαντικά υψηλότερο εύρος ζώνης από αυτό που χρησιμοποιούνταν για τη μετάδοση φωνής. Επιπλέον, προστέθηκε ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς δεδομένων καθώς το ADSL δεν αποτελεί απλώς μέθοδο ευρυζωνικής πρόσβασης αλλά ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική δικτύου η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ποικίλων υπηρεσιών ευρυζωνικής πρόσβασης. Στα συστήματα τρίτης γενιάς πρόσβασης, όπως το VDSL, ο εξοπλισμός εγκαταστάθηκε σε υπαίθριες εγκαταστάσεις (ΥΚ), μειώνοντας έτσι την απόσταση μεταξύ του σημείου έγχυσης της υπηρεσίας και του συνδρομητή.

Η μετάβαση από τα συστήματα δεύτερης στα συστήματα τρίτης γενιάς οδήγησε στην επέκταση του δικτύου οπτικών ινών από το ΑΚ στους ΥΚ, γεγονός που αποτέλεσε το πρώτο βήμα για την υλοποίηση ενός εκτεταμένου δικτύου FTTH. Ακολουθώντας την ίδια λογική, η τέταρτη γενιά, βασίζεται στην περαιτέρω επέκταση του δικτύου οπτικών ινών μέχρι τα σημεία διανομής (FTTdp). Οι θέσεις των σημείων διανομής βρίσκονται ακολουθώντας τη διαδρομή των συνεστραμμένων ζευγών από το χώρο του συνδρομητή προς το ΑΚ μέχρι το πρώτο σημείο στο οποίο αυτά απομαστεύθηκαν (τυπικά στα 20-200 μέτρα). Από τα ανωτέρω, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το επόμενο λογικό βήμα είναι η μετάβαση στα συστήματα πέμπτης γενιάς με την επέκταση του δικτύου οπτικών ινών μέχρι το χώρο του συνδρομητή (FTTH) προσδοκώντας την επίτευξη ταχυτήτων ως 10Gbps μέσα στα επόμενα 10-15 χρόνια. Στο Σχ.3.2. παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης, ενώ στον Πιν.3.1 συγκεντρώνονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους. [2]



Σχήμα 3.2: Χρονική εξέλιξη συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης

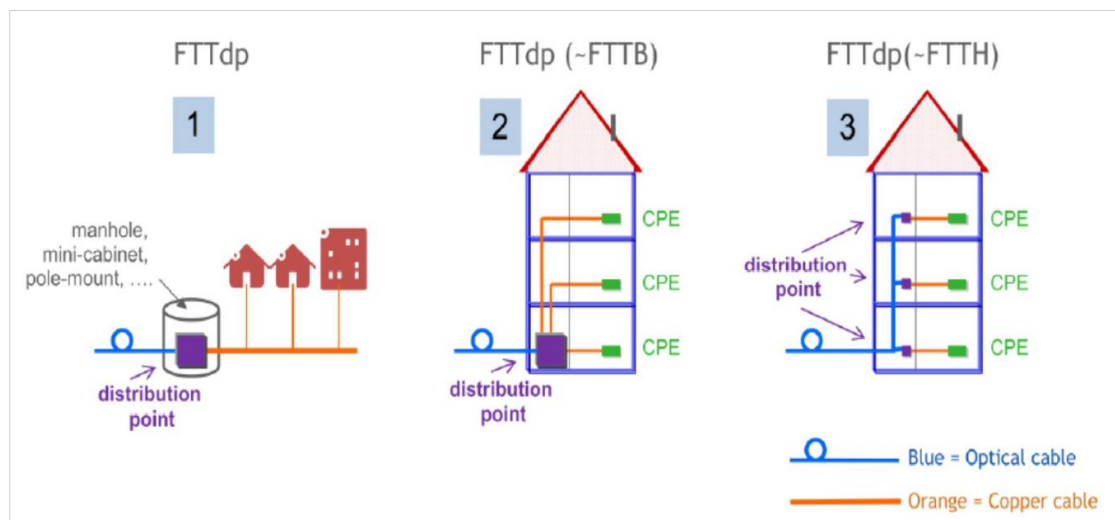
	Ρυθμός Μετάδοσης	Σημείο έγχυσης υπηρεσίας	Παράδειγμα τεχνολογίας	Περίοδος μέγιστης ανάπτυξης
1 ^η Γενιά	160Kbps	Αστικό Κέντρο	ISDN	1995
2 ^η Γενιά	10-20Mbps	Αστικό Κέντρο	ADSL	2005
3 ^η Γενιά	100Mbps	Υπαίθριος Κατανομητής	VDSL	2015
4 ^η Γενιά	1Gbps	Σημείο διανομής	G.fast	2025
5 ^η Γενιά	10Gbps	Χώρος Συνδρομητή	XG.fast	2035

Πίνακας 3.1: Οι 5 γενιές συστημάτων ευρυζωνικής πρόσβασης

3.2.2 Σενάρια εγκατάστασης μονάδων διανομής

Το G.fast είναι μία τεχνολογία 4^{ης} γενιάς, οπότε η έγχυση της υπηρεσίας γίνεται στα σημεία διανομής, όπου και πραγματοποιείται η μετάβαση από την οπτική ίνα στο χάλκινο καλώδιο (FTTdp). Οι επιλογές για την τοποθέτηση των μονάδων διανομής (Distribution Point Unit - DPU), που παρουσιάζονται στο Σχ.3.3, είναι:

1. Σε φρεάτιο (manhole), επί στύλου (pole mounted) ή σε μικρή καμπίνα (mini-cabinet) σε απόσταση 200-300 μέτρων από το συνδρομητή
2. Στην είσοδο (εντός ή εκτός) του κτηρίου
3. Εντός του κτηρίου πολύ κοντά στην πόρτα του συνδρομητή



Σχήμα 3.3: Σενάρια εγκατάστασης των μονάδων διανομής

Με βάση τον αριθμό των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα μόνο σημείο διανομής γίνεται η διάκριση μεταξύ multi-port DPs (σημεία διανομής πολλαπλών θυρών) και single-port PDs (σημεία διανομής μοναδικής θύρας).

Single-port DPs

Η επιλογή διάθεσης μίας οπτικής ίνας ανά συνδρομητή εφαρμόζεται κυρίως σε αγροτικές περιοχές όπου ο πληθυσμός δεν είναι ιδιαίτερα πυκνός. Μέσω της τεχνολογίας G.fast μειώνεται σημαντικά το κόστος εγκατάστασης σε αυτές τις περιοχές. Καίτοι για τη δημιουργία μιας FTTH τοπολογίας δεν είναι απαραίτητη η χρήση χαλκού, στην πράξη, στις ζευξίες που αποτελούνται αμιγώς από οπτικές ίνες παρουσιάζονται μειονεκτήματα που μπορούν να αντισταθμιστούν με τη χρήση του χαλκού.

Ενδεικτικά, είναι η απαραίτητη παρουσία τεχνικού για την εγκατάσταση του εξοπλισμού, προκύπτουν δυσκολίες κατά την εγκατάσταση των οπτικών ινών λόγω περιοριστικών κανονισμών και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των κτηρίων και, επιπλέον, είναι απρόβλεπτοι οι χρόνοι παράδοσης των έργων. Όλα τα ανωτέρω προβλήματα επιλύονται με την εφαρμογή της υβριδικής αρχιτεκτονικής ίνας/χαλκού, όπου η επέκταση της ίνας γίνεται με τη χρήση ενός σημείου διανομής μίας θύρας και ενός χάλκινου καλωδίου μικρού μήκους.

Οι διάφορες εναλλακτικές εφαρμογές αυτής της επιλογής παρουσιάζονται στο Σχ.3.4. Το σημείο διανομής βρίσκεται το πολύ σε απόσταση 100μέτρων από το συνδρομητή, η τροφοδότησή του γίνεται απομακρυσμένα από το συνδρομητή ενώ δεν απαιτείται η εφαρμογή κάποιου μηχανισμού για την καταστολή των παρεμβολών. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιλογή αυτή, ενώ είναι ευκολότερο να εφαρμοστεί από πλευράς υλικού (hardware), είναι η ακριβότερη.

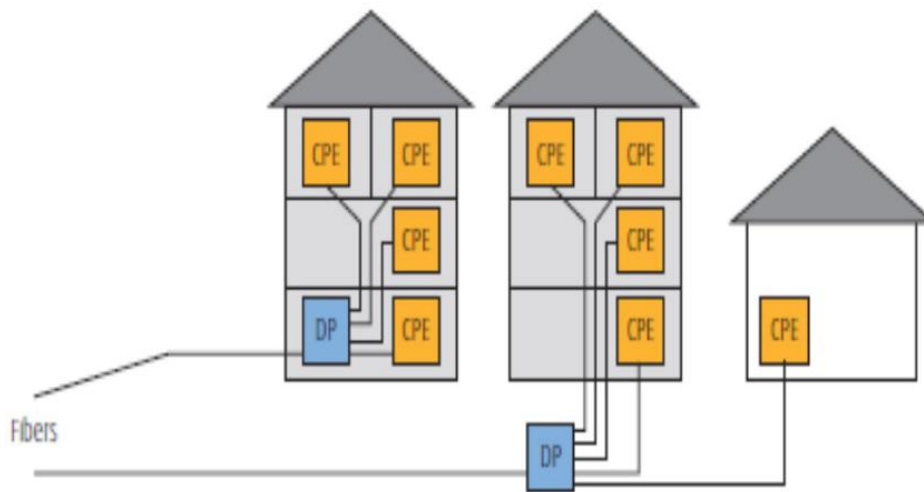


Σχήμα 3.4: Εναλλακτικές τοπολογίες single-port DPs

Multi-port DPs

Η εναλλακτική πολλαπλών θυρών εφαρμόζεται στις πυκνοκατοικημένες περιοχές καθώς και σε κτήρια με μεγάλο αριθμό κατοικιών. Οι επιλογές εγκατάστασης του σημείου διανομής ποικίλλουν (Σχ.3.5). Το βασικό πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής αυτής έναντι της τοπολογίας FTTB είναι η δυνατότητα ανάστροφης τροφοδότησης των μονάδων διανομής (Εν.3.2.4). Η τοποθέτησή τους μπορεί να γίνει πρακτικά σε οποιοδήποτε κατάλληλο σημείο χωρίς να απαιτείται τοπική παροχή ισχύος. Το μήκος του χάλκινου καλωδίου συνήθως είναι μικρότερο από τα 100m ενώ σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις μπορεί να φθάσει τα 250m. Ο αριθμός των συνδρομητών που εξυπηρετούνται από ένα σημείο διανομής είναι μικρός και συνήθως δεν υπερβαίνει τους 16, ωστόσο υπάρχουν λύσεις μέχρι και για 48 συνδρομητές. Οι παρεμβολές μεταξύ των γραμμών των συνδρομητών προκαλούν στενωπό για την επίτευξη του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα παροχής της τεχνολογίας του G.fast μέσω των ίδιων καμπινών που χρησιμοποιούνται στην αρχιτεκτονική FTTC για το VDSL. Βασική προϋπόθεση είναι η αναβάθμιση των καμπινών ώστε να είναι εφικτή η υποστήριξη του G.fast. Στην ουσία, πρόκειται για το ένα από τα δύο σενάρια συνύπαρξης των δύο τεχνολογιών, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην Εν.3.4. [1]



Σχήμα 3.5: Εναλλακτικές τοπολογίες multi-port DPs

3.2.3 Backhaul network

Η σύνδεση μεταξύ των DPUs με το αστικό κέντρο μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Μία κατηγορία επιλογών αποτελούν ορισμένα από τα δίκτυα της οικογένειας PON (Ev.1.2.2), στα οποία γίνεται χρήση της τεχνικής πολύπλεξης διαίρεσης μήκους κύματος (WDM) για το διαχωρισμό της άνω και της κάτω ζεύξης. επίσης, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TDMA (Time Division Multiple Access) για την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων πολλών χρηστών, όπου κάθε σήμα εκπέμπεται σε διαφορετική χρονική θυρίδα (time slot) στο ίδιο πλαίσιο. Στην περίπτωση του EPON, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο Ethernet για τη μετάδοση των δεδομένων. Στον Πιν.3.2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των PONs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση των DPUs με το ΑΚ. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης της τεχνικής PtP Ethernet αλλά και των χάλκινων καλωδίων για την πραγματοποίηση της σύνδεσης αυτής.

	GPON ⁹	XG-PON1 ¹⁰	EPON ¹¹	10G-EPON ¹²
Full Upstream Rate	1,2Gbps	2,5Gbps	1,25Gbps	10Gbps
Full Downstream Rate	2,4Gbps	10Gbps	1,25Gbps	10Gbps
Upstream Wavelength	1310nm	1270nm	1310nm	1260nm-1280nm
Downstream Wavelength	1490nm	1577nm	1490nm	1575nm-1580nm
Split Ration (max. number of subscribers)	1:32 1:64 1:128	1:128	1:16 1:32 1:64	1:16 1:32 1:64
Splitting Method	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA (MPMC ¹³)
Max range	20km	20km	20km	20km

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά PONs

[2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [19]

⁹ GPON: Gigabit PON

¹⁰ XG-PON1: Asymmetric 10 Gigabit PON

¹¹ EPON: Ethernet PON

¹² 10G-EPON: 10 Gigabit EPON

¹³ Multi-point MAC control

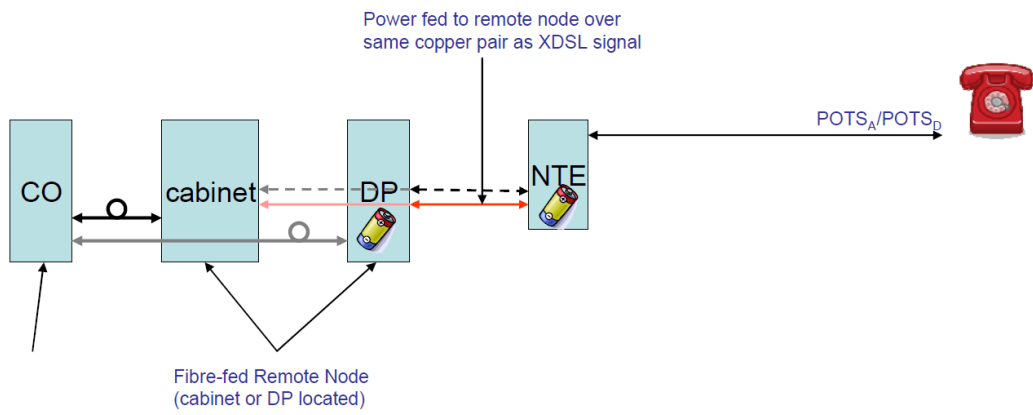
3.2.4 Ανάστροφη τροφοδότηση

Όλες οι εναλλακτικές τοπολογίες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί το G.Fast καταλήγουν στην ύπαρξη πολλών μικρών κόμβων οι οποίοι πρέπει με κάποιο τρόπο να τροφοδοτηθούν. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η τροφοδότηση από το ΑΚ¹⁴, η οποία όμως προϋποθέτει (i) την ύπαρξη και χρήση για το σκοπό αυτό ενός χάλκινου ζεύγους καλωδίων και (ii) την αντιστάθμιση της μη αμελητέας διάχυσης της ισχύος λόγω της μεγάλης απόστασης (power dissipation). Μία δεύτερη εναλλακτική τεχνική αποτελεί η τοπική τροφοδότηση των κόμβων, η οποία όμως συνεπάγεται χρονοβόρες και πολύπλοκες διαπραγματεύσεις μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας και των ιδιοκτητών των κτηρίων, καθώς και πρακτικές δυσκολίες στον καταμερισμό του κόστους τροφοδότησης του εξοπλισμού. Μια τρίτη προσέγγιση είναι αυτή της ανάστροφης τροφοδότησης (reverse powering), σύμφωνα με την οποία, ο τελικός χρήστης είναι υπεύθυνος για την έγχυση της ισχύος. Η προσέγγιση της ανάστροφης τροφοδότησης των κόμβων (Reverse power feeding – RPF), ενώ θεωρητικά είναι απλή, καλείται να αντιμετωπίσει σειρά από πρακτικές δυσκολίες.

1. Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό είναι ότι η ισχύς που μπορεί να λάβει ένα DPU είναι περιορισμένη λόγω των κανονισμών ασφαλείας που θέτουν όρια μέγιστης τάσης και ρεύματος στα σπίτια αλλά και λόγω της απώλειας της ισχύος.
2. Επιπλέον, τα DPUs πρέπει να παραμένουν λειτουργικά ακόμη και στην περίπτωση όπου υπάρχει μόνο μία ενεργή γραμμή. Εξ αυτού συνάγεται ότι η κατανάλωση ισχύος πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερη αλλά και γραμμική σε σχέση με τον αριθμό των ενεργών γραμμών.
3. Ακόμη, προκύπτει το ερώτημα που αφορά τον ορισμό του υπευθύνου για την τροφοδότηση των κυκλωμάτων εντός του DPU που είναι κοινά για όλους τους χρήστες.
4. Επιπροσθέτως, υπάρχει η περίπτωση όπου ζητούνται πληροφορίες από την ONU που βρίσκεται εντός του κόμβου όταν δεν υπάρχουν συνδεδεμένοι χρήστες σε αυτόν (και άρα δεν υπάρχει παροχή ισχύος).
5. Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζουν οι πρόσθετες απαιτήσεις που προκύπτουν για την εξασφάλιση συνύπαρξης με την απλή παλαιά τηλεφωνική υπηρεσία (υπάρχει ανάγκη για αποσύζευξη συνιστώσας σταθερής τάσης και σημάτων χαμηλών συχνοτήτων), αλλά και με την απρόσκοπτη και διαρκή τηλεφωνική υπηρεσία (Lifeline POTS).

Οι ανωτέρω καταστάσεις οδηγούν στην ανάγκη ύπαρξης εφεδρικών μπαταριών οι οποίες τοποθετούνται σε διάφορα σημεία του δικτύου. Ενδεικτικά, όπως φαίνεται στο Σχ.3.6, μπορεί να τοποθετηθεί μία μπαταρία εντός της μονάδας διανομής και άλλη μία εντός της μονάδας που περιέχει τον τερματικό εξοπλισμό του δικτύου (Network Termination Equipment – NTE). [11] [17]

¹⁴ Remote powering (απομακρυσμένη τροφοδότηση)



Σχήμα 3.6: Σενάριο τοποθέτησης μπαταριών υποστήριξης RPF σε DP και NTE

3.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας G.fast

3.3.1 Τα προφίλ του G.fast

Σύμφωνα με τις συστάσεις της ITU και με κριτήριο το χρησιμοποιούμενο εύρος συχνοτήτων, μέχρι σήμερα (04/2019) υπάρχουν δύο προφίλ λειτουργίας για το G.fast. Τα προφίλ 106a και 106b αξιοποιούν συχνότητες από τα 2.2MHz έως τα 106MHz, ενώ το προφίλ 212a έως τα 212MHz. Μερικές από τις βασικότερες από τις παραμέτρους των προφίλ λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πιν.3.3. Η ύπαρξη πολλών προφίλ αποσκοπεί στη διευκόλυνση των παρόχων κατά την προσπάθεια συμμόρφωσης με τις συστάσεις της ITU αναφορικά με το G.fast. Υποστηρίζοντας ένα τμήμα των ρυθμίσεων (αρκεί αυτές να συνιστούν ένα από τα ορισμένα προφίλ λειτουργίας), οι αντίστοιχοι πομποδέκτες θεωρείται ότι συμμορφώνονται με τις συστάσεις της ITU και, έχοντας πλέον μειωμένη την πολυπλοκότητα εφαρμογής (λόγω των μειωμένων απαιτήσεων), οι πάροχοι μπορούν να αναπτύξουν εφαρμογές που για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες προδιαγραφές υπηρεσιών.

Σε όλα τα προφίλ οι ίδιες συχνότητες μπορούν να αξιοποιηθούν για την άνω και κάτω ζεύξη χρησιμοποιώντας την τεχνική αμφιδρόμησης διαίρεσης χρόνου (TDD). Για την αρμονική συνύπαρξη με παλαιότερες τεχνολογίες DSL αλλά και με άλλες υπηρεσίες με τις οποίες υπάρχει φασματική επικάλυψη (όπως είναι η ραδιοφωνία FM) γίνεται χρήση ειδικών τεχνικών, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην Εν.3.3.5. [12] [13]

Παράμετρος \ Προφίλ	G.fast 106a	G.fast 106b	G.fast 212a
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης	2.2MHz - 106MHz	2.2MHz - 106MHz	2.2MHz - 212MHz
Αριθμός τόνων	2048	2048	4096
Φασματική απόσταση τόνων	51.75kHz	51.75kHz	51.75kHz
Ρυθμός συμβόλου	48kHz	48kHz	48kHz
Bits/σύμβολο	12	12	24
Μέγιστη συνολική ισχύς μετάδοσης για την κάτω ζεύξη	+4.0 dBm	+8.0 dBm	+4.0 dBm
Μέγιστη συνολική ισχύς μετάδοσης για την άνω ζεύξη	+4.0 dBm	+8.0 dBm	+4.0 dBm
Συνολικός ρυθμός μετάδοσης (για την άνω και κάτω ζεύξη μαζί)	1000Mbps	1000Mbps	2000Mbps

Πίνακας 3.3: Τιμές βασικών παραμέτρων στα προφίλ του G.fast

3.3.2 Μέθοδος διαμόρφωσης

Ως διαμόρφωση στο G.fast χρησιμοποιείται η τεχνική της διακριτής πολυτονικής διαμόρφωσης (DMT) που έχει αναλυθεί στην Εν.2.2.3. Στα προφίλ 106a και 106b είναι διαθέσιμα 2048 υποκανάλια, ενώ στο προφίλ 212a είναι διαθέσιμα 4096 υποκανάλια. Το εύρος ζώνης κάθε υποκαναλιού (ή ισοδύναμα η φασματική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών τόνων) είναι 51.75kHz. Σε κάθε τόνο εφαρμόζεται MQAM (Εν.2.2.3) διαμορφώνοντας κάθε φορά από 2 έως και 12 bits (σε ορισμένες περιπτώσεις και 13 ή 14) σε ένα σύμβολο.

3.3.3 Μέθοδος πολύπλεξης

Η μέθοδος πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται στο G.fast είναι η αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (TDD). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Εν.1.2.4, στην αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου η άνω και η κάτω ζεύξη αξιοποιούν όλο το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων αλλά η μετάδοση γίνεται σε διαφορετικές χρονοθυρίδες για κάθε ζεύξη. Αντίθετα, στην αμφιδρόμηση διαίρεσης συχνότητας (FDD) που χρησιμοποιείται σε άλλες τεχνολογίες xDSL, τα σήματα άνω και κάτω ζεύξης μεταδίδονται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, οπότε κάθε ζεύξη χρησιμοποιεί διαφορετικό τμήμα του συνολικού διαθέσιμου φάσματος.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα της αμφιδρόμησης διαίρεσης χρόνου είναι η δυνατότητα προσαρμογής του ρυθμού μετάδοσης της άνω και της κάτω ζεύξης μέσω της αλλαγής του αριθμού των χρονοθυρίδων που διατίθεται σε κάθε ζεύξη. Στα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής συγκαταλέγονται η ανάγκη για συγχρονισμό όλων των πομποδεκτών και η ανάγκη ύπαρξης ενός μικρού χρονικού διαστήματος ασφαλείας (gap time) μεταξύ της μετάδοσης της άνω και κάτω ζεύξης. Επιπλέον, στην περίπτωση του G.fast, η χρήση του TDD οδηγεί σε έλλειψη φασματικής συμβατότητας με τις τεχνολογίες ADSL και VDSL οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούν την τεχνική FDD, υπάρχει δηλαδή φασματική επικάλυψη. Ωστόσο, με την αξιοποίηση κατάλληλων τεχνικών οι τεχνολογίες μπορούν να συνυπάρχουν.

Περισσότερες πληροφορίες για την πρακτική εφαρμογή του TDD παρουσιάζονται στην Εν.4.4.3.6.[12][13]

3.3.4 Τεχνικές κωδικοποίησης για τη διόρθωση λαθών μετάδοσης

Οι τεχνικές κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται στο G.fast για τη διόρθωση λαθών μετάδοσης και παρουσιάζονται στον Πιν.3.4 έχουν ήδη αναπτυχθεί στο Κεφ.2 και αναλύονται περαιτέρω στο Κεφ.4.

ΤΕΧΝΙΚΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Έλεγχος κυκλικού πλεονασμού (CRC)	Εφαρμόζεται στις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTU ¹⁵) στο υπόστρωμα TPS-TC	Εν.2.3.2.2 Εν.4.4.1.3
Περίπλεξη (Scrambling)	Εφαρμόζεται στις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTU) στο υπόστρωμα TPS-TC	Εν.2.3.2.5 Εν.4.4.2.3
FEC με κώδικα Reed Solomon	Εφαρμόζεται στις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTU) στο υπόστρωμα TPS-TC	Εν.2.3.2.3 Εν.4.4.2.3
Ανάδευση (Interleaving)	Εφαρμόζεται στις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTU) στο υποεπίπεδο TPS-TC	Εν.2.3.3.2 Εν.4.4.2.3
Κωδικοποιημένη διαμόρφωση Trellis (TCM)	Εφαρμόζεται στις ακολουθίες bits των πλαισίων δεδομένων στο υπόστρωμα PMD	Εν.2.3.2.4 Εν.4.4.3.3
Κυκλική επέκταση (Cyclic Extension)	Εφαρμόζεται στα διαμορφωμένα σύμβολα μετά την εφαρμογή του IDFT στο υπόστρωμα PMD	Εν.2.2.3. Εν.4.4.3.5

Πίνακας 3.4: Τεχνικές κωδικοποίησης του G.fast

¹⁵ Data Transfer Unit

3.3.5 Το κανάλι εύρωστης διαχείρισης

Το κανάλι εύρωστης διαχείρισης (Robust Management Channel - RMC) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών ελέγχου και διαχείρισης με υψηλή ευαισθησία ως προς το χρόνο. Η κωδικοποίηση των RMC μηνυμάτων γίνεται μέσω Reed Solomon και μετά ακολουθεί πολύπλεξη των bytes των RMC πλαισίων με τα bytes των DTUs. [12]

3.3.6 Προστασία από κρουστικό θόρυβο (INP¹⁶)

Στην περίπτωση του G.fast οι δέκτες πρέπει να μπορούν να ανακτούν τις μονάδες μεταφοράς δεδομένων που έχουν λάθη μέσω της αναμετάδοσής τους, (ανεξαρτήτως του αριθμού των λαθών που έχουν εντοπιστεί μέσα στη χρονική διάρκεια ενός συμβόλου DMT) ώστε να μην υπάρχουν λάθη στα ανώτερα στρώματα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουν την απαιτούμενη προστασία απέναντι στο χειρότερο δυνατό περιβάλλον θορύβου κρουστικής μορφής που ορίζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Ελάχιστη INP για ριπές θορύβου τύπου SHINE, εκφρασμένη σε περιόδους συμβόλων (υποχρεωτικές τιμές 0-520 περίοδοι που αντιστοιχούν σε διάρκεια ριπής 0-10ms)
- Ελάχιστη INP για ριπές θορύβου τύπου REIN, εκφρασμένη σε περιόδους συμβόλων (υποχρεωτικές τιμές 0-63 περίοδοι)
- Συχνότητα επανάληψης ριπών θορύβου τύπου REIN, εκφρασμένη σε kHz, με 4 πιθανές τιμές (100, 120, 300, 360 Hz)

Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η εγγύηση της απαιτούμενης προστασίας από θόρυβο κρουστικής μορφής μέσα σε ένα χρονικό όριο (latency bound) το οποίο ορίζεται από την παράμετρο μέγιστης καθυστέρησης (delay_max), πρέπει να ματαιώνεται η έναρξη (initialization).

Το χειρότερο δυνατό περιβάλλον θορύβου υποθέτει μεταξύ άλλων ότι:

- Κάθε εμφάνιση θορύβου κρουστικής μορφής επιβάλλει την αναμετάδοση όλων των μονάδων μεταφοράς δεδομένων που επικαλύπτονται χρονικά με το θόρυβο.
- Κάθε εμφάνιση θορύβου κρουστικής μορφής διαρκεί όσο και η περίοδος ενός συμβόλου.
- Κάθε εμφάνιση θορύβου κρουστικής μορφής τύπου SHINE απέχει χρονικά από την αμέσως επόμενη αρκετά ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα.
- Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εμφάνισης θορύβου κρουστικής μορφής τύπου SHINE και της αμέσως επόμενης τύπου REIN είναι τυχαίο, με αποτέλεσμα να μπορούν και οι δύο να αντιμετωπιστούν ανεξάρτητα.

[13] 9.8.3.3.

¹⁶ Impulse Noise Protection

3.3.7 Φασματική πυκνότητα ισχύος

3.3.7.1 Μάσκες φασματικής πυκνότητας ισχύος

Η μάσκα μετάδοσης της φασματικής πυκνότητας ισχύος (Transmit PSD Mask – TxPSDM) αποτελείται από συνδυασμό των ακόλουθων μασκών:

- Limit PSD mask (LPM)
- Subcarrier mask (SM)
- PSD shaping mask (PSM)
- Notching mask (NM)
- Low-frequency edge stop-band mask (LESM)

Η TxPSDM που εφαρμόζεται στη μονάδα πομποδέκτη του G.fast που βρίσκεται στην ONU (Fast Transceiver Unit, O for Optical Network – FTU-O) ενδέχεται να διαφέρει από την αντίστοιχη μάσκα που εφαρμόζεται στη μονάδα πομποδέκτη του G.fast που βρίσκεται στην πλευρά του πελάτη (Fast Transceiver Unit, R for Remote Side – FTU-R). Η φασματική πυκνότητα ισχύος του εγγεόμενου σήματος δεν επιτρέπεται σε καμία συχνότητα να υπερβαίνει την προαναφερθείσα μάσκα.

Η LPM ορίζει το απόλυτο άνω όριο της TxPSDM (δηλαδή τη μέγιστη τιμή της ισχύος που επιτρέπεται να έχει η TxPSDM σε κάθε συχνότητα), ενώ μέσω των SM, PSM, NM και LESM μειώνεται και διαμορφώνεται η TxPSDM με τη χρήση ορισμένων μηχανισμών, η υποστήριξη των οποίων θεωρείται υποχρεωτική για αμφότερους τους πομποδέκτες FTU-O και FTU-R. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- Απόκρυψη τόνων (subcarrier masking)
- Αποκοπή συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων (notching of specific frequency bands)
- Διαμόρφωση φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD shaping)
- Απόκρυψη άκρου ζώνης αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων (low frequency edge stop-band masking)

Επιπλέον, η TxPSDM πρέπει να συμμορφώνεται με τις ισχύουσες τοπικές και εθνικές απαιτήσεις.

Όταν καθορίζεται η κατάλληλη φασματική πυκνότητα ισχύος που θα χρησιμοποιηθεί σε κάποια ρυθμιστική δικαιοδοσία, οι πάροχοι οφείλουν να χρησιμοποιούν τα διαθέσιμα εργαλεία για να εξασφαλίσουν τη συμμόρφωση με τους εθνικούς και τοπικούς κανονισμούς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Επιπροσθέτως, πρέπει να αποδίδουν ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία δεκτών για την ασφάλεια των υπηρεσιών ζωής που ενδεχομένως να μην είναι άμεσα γειτονικοί στα τερματικά καλώδια δικτύου που μεταφέρουν σήματα G.fast. Παραδείγματα τέτοιων δεκτών είναι τα διάφορα VHF κανάλια αεροναυτικής ραδιοπλοήγησης στη ζώνη των 108-117.975MHz και αεροναυτικά κανάλια έκτακτης επικοινωνίας (121.5MHz) καθώς επίσης και ναυτικά κανάλια έκτακτης επικοινωνίας στις ζώνες συχνοτήτων HF και VHF.

Εκτός από τις προαναφερθείσες μάσκες, στη σύσταση της ITU-T G.9701 ορίζονται δύο επιπλέον μηχανισμοί. Ο πρώτος είναι ένας μηχανισμός διακοπόμενης λειτουργίας (discontinuous operation) ο οποίος επιτρέπει τη δυναμική διακοπή παροχής ισχύος σε συγκεκριμένη σύνδεση όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση, ενώ ο δεύτερος είναι ένας μηχανισμός για την κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (low power mode). Μέσω αυτών των μηχανισμών, είναι δυνατή η περαιτέρω μείωση της ισχύος μετάδοσης μέχρι το επίπεδο στο οποίο να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης αλλά και η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS).

Η μάσκα TxPSDM καθορίζεται σχεδόν σε όλα τα εύρη ζώνης λειτουργίας, εκτός από την ακραία ζώνη αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων και από την περιοχή όπου ορίζονται ζώνες αποκοπής (notches) από την MIB. Στις ζώνες αυτές εφαρμόζονται διαφορετικές μάσκες (Ev.3.3.7.5 - Ev.3.3.7.6). [14]

3.3.7.2 Limit PSD Mask

Η LPM ορίζει το απόλυτο ανώτατο όριο της φασματικής πυκνότητας ισχύος, το οποίο δεν επιτρέπεται να υπερβαίνεται από την TxPSDM. Όλες οι υπόλοιπες μάσκες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της TxPSDM μπορούν να οδηγήσουν μόνο σε μείωση της μάσκας από τα όρια που έχουν καθοριστεί από την LPM. [14]

3.3.7.3 Subcarrier Masking

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την καταστολή της μετάδοσης ενός ή περισσοτέρων τόνων. Η μάσκα τόνων ορίζεται στη βάση δεδομένων διαχείρισης του σημείου διανομής (Distribution Point Management Information Base – DP-MIB) μέσω της παραμέτρου CARMASK. Η ισχύς μετάδοσης όλων των τόνων που προσδιορίζονται στη μάσκα τόνων ορίζεται να είναι μηδενική, ενώ παραβλέπεται κάθε άλλη οδηγία σχετική με την ισχύ μετάδοσης αυτών των τόνων.

Η SM ορίζεται ως ένας αριθμός ζωνών συχνοτήτων προς απόκρυψη. Κάθε εύρος προσδιορίζεται από 2 δείκτες, οι οποίοι δηλώνουν τους αύξοντες αριθμούς του πρώτου και του τελευταίου τόνου προς καταστολή. Εννοείται ότι και όλοι οι ενδιάμεσοι τόνοι υφίστανται την καταστολή. Η ισχύς μετάδοσης όλων αυτών των τόνων λαμβάνει μηδενική τιμή. Μέσω αυτής της μάσκας παρέχεται η δυνατότητα καταστολής τόνων για τη συμμόρφωση με τους τοπικούς κανονισμούς αλλά και τόνων που ορίζουν οι πάροχοι ή οι χρήστες για τη διευκόλυνση τοπικών πρακτικών ανάπτυξης. Ωστόσο, η προστασία των ραδιοφωνικών υπηρεσιών δεν επαφίεται σε αυτήν την τεχνική αλλά γίνεται μέσω της τεχνικής αποκοπής (subcarrier notching - Ev.3.3.7.5). [14]

3.3.7.4 PSD Shaping

Η διαμόρφωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος επιτρέπει τη μείωση της TxPSDM σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος με στόχο τη φασματική συμβατότητα και την αρμονική συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης ή οικιακών δικτύων. Η μάσκα διαμόρφωσης φασματικής πυκνότητας ισχύος ορίζεται στη βάση δεδομένων διαχείρισης του σημείου διανομής (DP-MIB) μέσω της παραμέτρου PSDMASK.

Η PSM ορίζεται στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ του μικρότερου και του μεγαλύτερου τόνου και αποτελείται από ένα ή περισσότερα τμήματα συχνοτήτων. Τα όρια των τμημάτων αυτών ορίζονται μέσω των breakpoints. Μέσα σε κάθε τμήμα η μάσκα μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε να μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των δοθέντων breakpoints (σε dBm/Hz) με τη συχνότητα να εκφράζεται σε γραμμική κλίμακα. Κάθε breakpoint ορίζεται από τον αύξοντα αριθμό του τόνου x_n και την τιμή της PSD εκφρασμένης σε dBm/Hz PSD_n υπό τη μορφή $\{x_n, PSD_n\}$. Ισχύει ότι η τιμή της PSD_1 εφαρμόζεται σε όλους τους τόνους πριν τον x_1 και η PSD_n εφαρμόζεται σε όλους τους τόνους μετά τον x_n . Μία FTU οφείλει να υποστηρίξει τη διαμόρφωση τουλάχιστον 32 breakpoints. Στην περίπτωση όπου η τιμή της SM υπερβαίνει σε κάποια συχνότητα την τιμή της LPM, η TxPSDM λαμβάνει τη χαμηλότερη από τις δύο τιμές. Όλες οι τιμές των breakpoints της SM πρέπει να έχουν τιμή μεγαλύτερη από -90dBm/Hz. [14]

3.3.7.5 Notching of specific frequency bands

Η αποκοπή συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων ή και μεμονωμένων τόνων προς προστασία συγκεκριμένων υπηρεσιών όπως είναι η ραδιοφωνία επιτυγχάνεται με τη χρήση της μάσκας αποκοπής. Οι διεθνείς προς καταστολή ζώνες ραδιοερασιτεχνών αναφέρονται ως IAR (International Amateur Radio) ενώ οι υπόλοιπες προς καταστολή ζώνες αναφέρονται ως RFI ζώνες.

Οι RFI ζώνες προς αποκοπή ορίζονται από τους δείκτες δύο τόνων. Ο πρώτος δείκτης δηλώνει τον πρώτο τόνο προς αποκοπή ενώ ο δεύτερος δείκτης δηλώνει τον τελευταίο τόνο, αντίστοιχα. Μια FTU πρέπει να υποστηρίξει την ταυτόχρονη αποκοπή 32 ζωνών RFI. επίσης, πρέπει να υποστηρίξει την αυτοτελή αποκοπή 13 ζωνών IAR βάσει των εκάστοτε απαιτήσεων. Μέσα σε μία ζώνη αποκοπής όλοι οι τόνοι δεν πρέπει να λειτουργούν και η NM λαμβάνει τιμή κατά 20dB χαμηλότερη από την LPM. Επιπλέον, οι γειτονικοί τόνοι των αποκομμένων τόνων πρέπει να μη λειτουργούν.

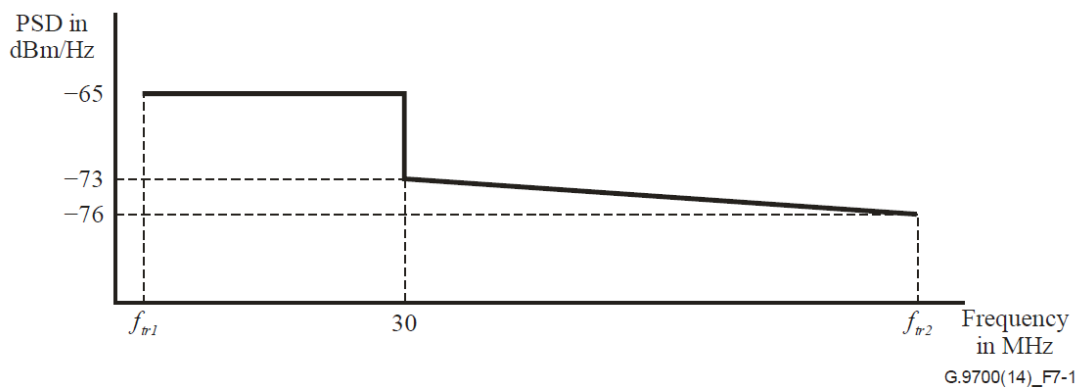
Για κάθε ζώνη προς αποκοπή (notch) ορίζονται 2 είδη μασκών: η PSD μάσκα στενής ζώνης (Narrowband transmit PSD mask – TXPSDM_N) και η PSD μάσκα ευρείας ζώνης (Wideband transmit PSD mask – TXPSDM_W). Η μάσκα TXPSDM_N ορίζεται για την επιβεβαίωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης μέτρησης των 10kHz περί τη συχνότητα ενδιαφέροντος. Η μάσκα TXPSDM_W ορίζεται για την επιβεβαίωση μίας μαθηματικά υπολογισμένης μέσης φασματικής πυκνότητας ισχύος ευρείας ζώνης που έχει αποκτηθεί υπολογίζοντας το μέσο όρο των μετρήσεων στενής ζώνης σε ένα εύρος 1MHz περί τη συχνότητα ενδιαφέροντος. [14]

3.3.7.6 Low Frequency edge stop-band masking

Για τη μάσκα της ζώνης αποκοπής χαμηλών συχνοτήτων ορίζονται δύο μάσκες: η PSD μάσκα στενής ζώνης (TXPSDM_N) και η PSD μάσκα ευρείας ζώνης (TXPSDM_W). Η μάσκα TXPSDM_N ορίζεται για την επιβεβαίωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης μέτρησης των 10kHz περί τη συχνότητα ενδιαφέροντος. Η μάσκα TXPSDM_W ορίζεται για την επιβεβαίωση μίας μαθηματικά υπολογισμένης μέσης φασματικής πυκνότητας ισχύος ευρείας ζώνης που έχει αποκτηθεί υπολογίζοντας το μέσο όρο των μετρήσεων στενής ζώνης σε ένα εύρος 1MHz περί τη συχνότητα ενδιαφέροντος. [14]

3.3.7.7 Οριακές μάσκες των προφίλ του G.fast

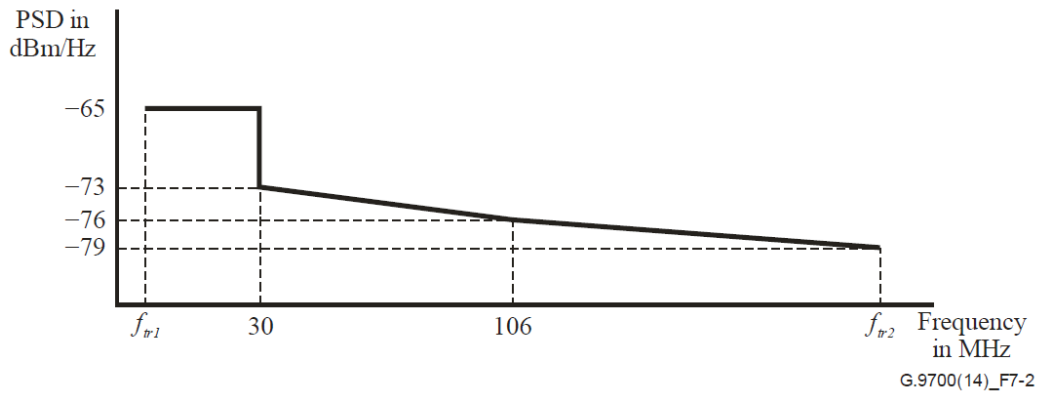
Οι οριακές μάσκες εντός ζώνης των προφίλ των 106MHz και 212MHz παρουσιάζονται στα Σχ.3.7 και Σχ.3.8 αντίστοιχα, με τις παραμέτρους τους να παρουσιάζονται στους Πιν.3.5. και Πιν.3.6. Οι οριακές μάσκες εκτός ζώνης για συχνότητες κάτω και άνω των 106MHz και 212MHz παρουσιάζονται στα Σχ.3.9 και Σχ.3.10 αντίστοιχα, με τις παραμέτρους τους να παρουσιάζονται στους Πιν.3.7. και Πιν.3.8. Σε όλα τα προφίλ, οι τόνοι με αύξοντα αριθμό από 0 ως 39 πρέπει να είναι συνεχώς αποκρυμμένοι (masked) και να μη χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφορίας (οποιοδήποτε τύπου). [14]



Σχήμα 3.7: Οριακή μάσκα εντός ζώνης προφίλ 106MHz

Παράμετρος	Συχνότητα (MHz)	PSD (dBm/Hz)	Περιγραφή
f_{tr1}	2	-65	Η μάσκα για συχνότητες χαμηλότερες της f_{tr1} ορίζεται στο Σχ.3.9
	30	-65	
f_{tr2}	30	-73	Η μάσκα για συχνότητες υψηλότερες της f_{tr2} ορίζεται στο Σχ.3.10
	106	-76	

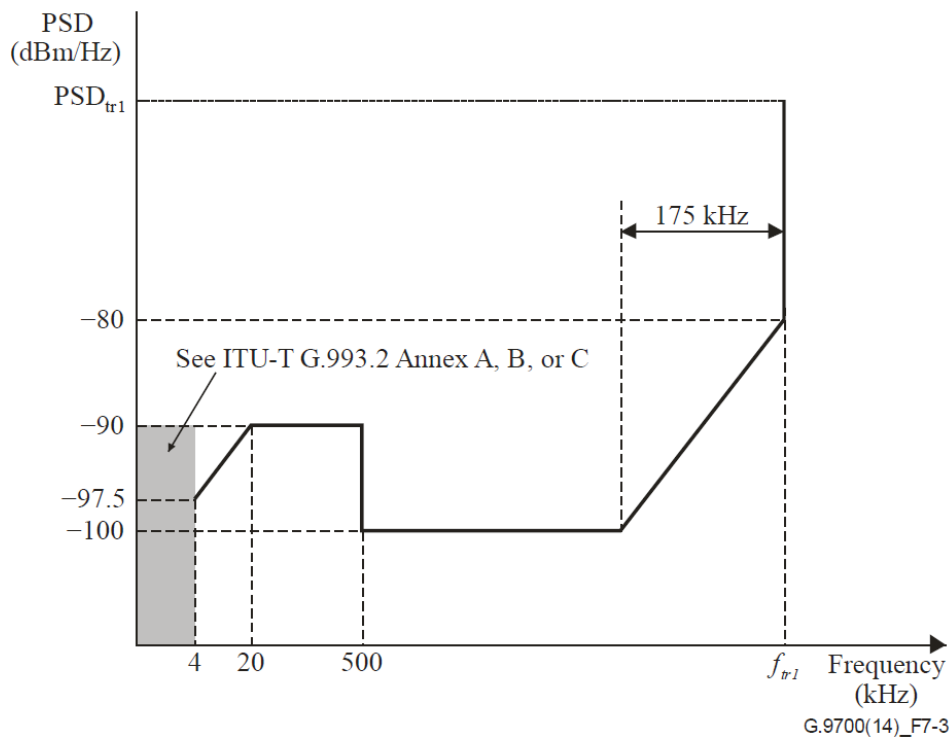
Πίνακας 3.5 Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης προφίλ 106MHz



Σχήμα 3.8: Οριακή μάσκα εντός ζώνης προφίλ 212MHz

Παράμετρος	Συχνότητα (MHz)	PSD (dBm/Hz)	Περιγραφή
f_{tr1}	2	-65	Η μάσκα για συχνότητες χαμηλότερες της f_{tr1} ορίζεται στο Σχ.3.9
	30	-65	
	30	-73	Η μάσκα για συχνότητες υψηλότερες της f_{tr2} ορίζεται στο Σχ.3.10
	106	-76	
f_{tr2}	212	-79	

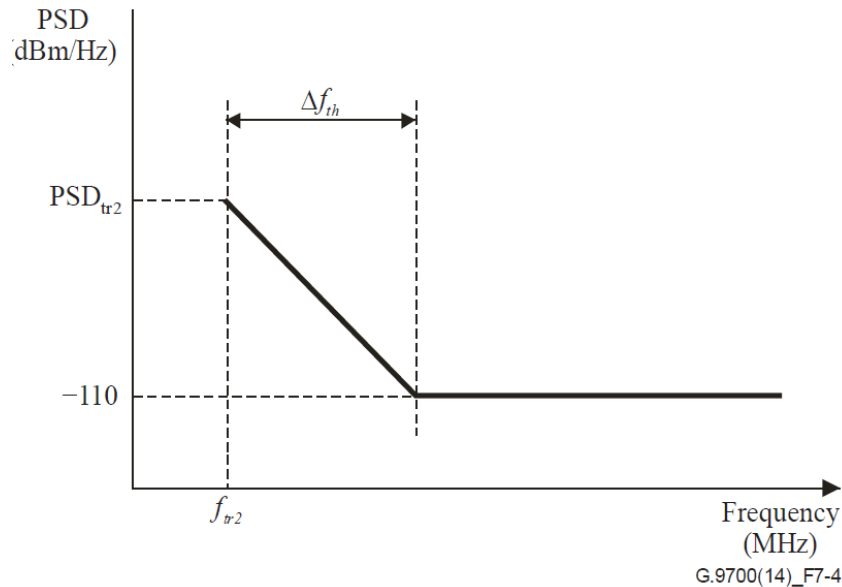
Πίνακας 3.6 Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης προφίλ 212MHz



Σχήμα 3.9: Οριακή μάσκα εκτός ζώνης συχνοτήτων κάτω της f_{tr1}

f_{tr1} (MHz)	PSD_{tr1} (dBm/Hz)	Περιγραφή
2	-65	Η τιμή της PSD στη συχνότητα μετάβασης f_{tr1} πέφτει από την τιμή PSD_{tr1} στην τιμή -80 dBm/Hz. Οι τόνοι που έχουν χαμηλότερη συχνότητα από την f_{tr1} δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων.

Πίνακας 3.7: Παράμετροι οριακής μάσκας εντός ζώνης κάτω της f_{tr1}



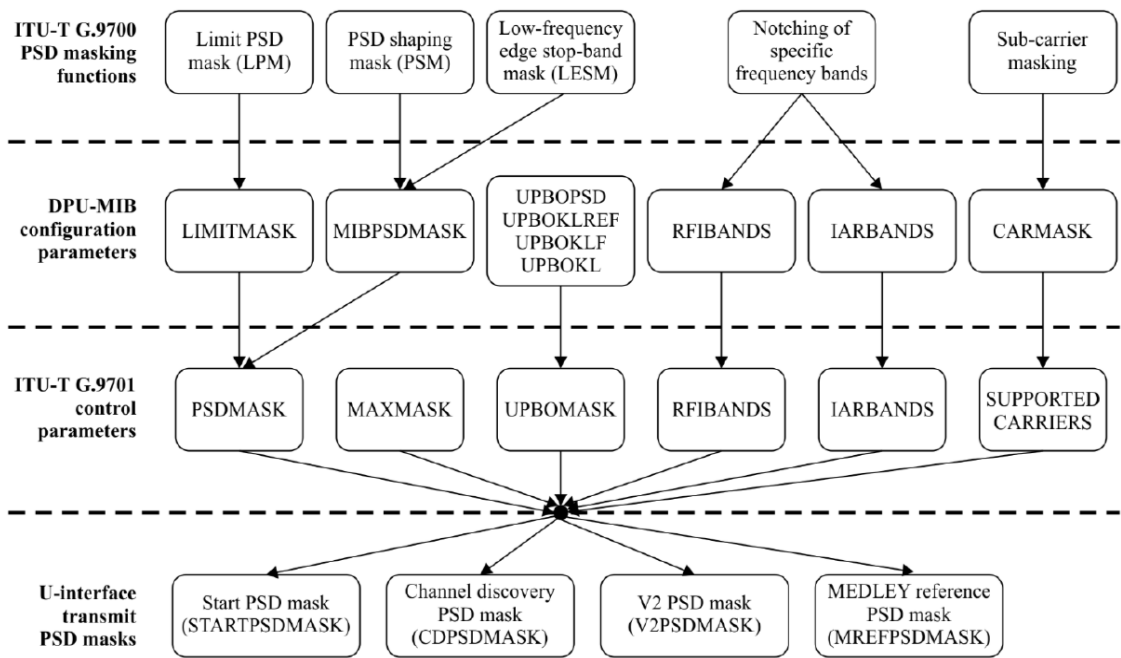
Σχήμα 3.10: Οριακή μάσκα εκτός ζώνης άνω της f_{tr2}

f_{tr1} (MHz)	PSD_{tr1} (dBm/Hz)	Ζώνη μετάβασης Δf_{th} (MHz)	Περιγραφή
106	-76	20	Η τιμή της PSD στη ζώνη μετάβασης υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή. Οι τόνοι που έχουν υψηλότερη συχνότητα από την f_{tr2} δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων.
212	-79	40	

Πίνακας 3.8: Παράμετροι οριακής μάσκας εκτός ζώνης άνω της f_{tr2}

3.3.7.8 Μάσκα μετάδοσης της φασματικής πυκνότητας ισχύος

Οι μηχανισμοί που περιγράφηκαν στις Εν.3.3.7.2 - Εν.3.3.7.6 και παρουσιάζονται στο πρότυπο της ITU G.9700 εφαρμόζονται από τους πομποδέκτες που συμμορφώνονται με το πρότυπο G.9701 μέσω ορισμένων παραμέτρων ελέγχου. Στο Σχ.3.11, φαίνεται η σχέση μεταξύ των μηχανισμών για τη δημιουργία μασκών, των παραμέτρων διαμόρφωσης που ορίζονται από τη βάση διαχείρισης πληροφοριών, των παραμέτρων των πομποδεκτών G.9701 και των τελικών μασκών μετάδοσης.



G.9701(14)Err.1_F7-1

Σχήμα 3.11: Σχέση μεταξύ των μηχανισμών για τη δημιουργία μασκών, των παραμέτρων διαμόρφωσης που ορίζονται από τη βάση διαχείρισης πληροφοριών, των παραμέτρων των πομποδεκτών G.9701 και των τελικών μασκών μετάδοσης

Κάθε FTU οφείλει να περιορίζει τη φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος μετάδοσης εντός των ορίων που θέτουν οι τελικές μάσκες μετάδοσης στο σημείο αναφοράς U. Από τον τρόπο που διαμορφώνονται, εξασφαλίζεται ότι οι τελικές μάσκες δεν υπερβαίνουν την TxPSDM. Η μάσκα που εφαρμόζεται στο προς έγχυση σήμα στο σημείο αναφοράς, αφού έχουν εφαρμοστεί όλες οι μέθοδοι ελέγχου, εξαρτάται από την κατάσταση της γραμμής και είναι διαφορετική κατά τη διάρκεια των διαφορετικών φάσεων της έναρξης (initialization) και της κανονικής λειτουργίας (showtime) (Εν. 3.3.8).

3.3.7.9 UPBO

Ο μηχανισμός της μείωσης ισχύος της κάτω ζεύξης εφαρμόζεται από την FTU-R για τη βελτίωση της αρμονικής συνύπαρξης μεταξύ των συστημάτων που συμμορφώνονται με το πρότυπο G.9701 και λειτουργούν σε διαφορετικά μήκη βρόχου εντός του ίδιου καλωδίου. Ο τρόπος υπολογισμού της μάσκας UPBOMASK ορίζεται αναλυτικά στην Εν.7.3.1.4. του προτύπου G.9701. [13]

3.3.7.10 Ρυθμιζόμενες συχνότητες

Στο G.fast είναι εφικτή η ρύθμιση των συχνοτήτων έναρξης και λήξης (configurable start and stop frequencies) επιτρέποντας μεταξύ άλλων την αρμονική συνύπαρξη με άλλες παλαιότερες τεχνολογίες όπως το VDSL. Η αποφυγή φασματικής επικάλυψης με άλλες τεχνολογίες και επομένως ο προσδιορισμός των διαθέσιμων τόνων λειτουργίας πραγματοποιείται μέσω των τεχνικών masking ή shaping.

3.3.8 Καταστάσεις του εξοπλισμού (states)

- O-SELFTEST (υποχρεωτική): Προσωρινή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O μετά την ενεργοποίηση, κατά την οποία διενεργείται μία εσωτερική δοκιμή (selftest). Ο πομπός και ο δέκτης είναι εκτός λειτουργίας. Αν η εσωτερική δοκιμή κριθεί επιτυχής ακολουθεί μετάβαση στην κατάσταση O-IDLE, διαφορετικά ακολουθεί μετάβαση στην κατάσταση O-UNIT-FAIL.
- O-UNIT-FAIL (υποχρεωτική): Σταθερή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O μετά από μία αποτυχημένη εσωτερική δοκιμή. Πομπός και δέκτης είναι εκτός λειτουργίας. Ο φορέας διαχείρισης λαμβάνει τα αποτελέσματα της δοκιμής από τη μονάδα διαχείρισης της FTU.
- O-IDLE (υποχρεωτική): Σταθερή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O μετά από μία επιτυχημένη εσωτερική δοκιμή. Πομπός και δέκτης είναι εκτός λειτουργίας. Η μονάδα διαχείρισης της FTU περιμένει ένα αίτημα αρχικοποίησης από τον φορέα διαχείρισης.
- O-SILENT (υποχρεωτική): Σταθερή κατάσταση που ορίζεται στο πρότυπο G.994.1, στην οποία εισέρχεται η FTU-O αφότου γίνει αίτημα αρχικοποίησης από το φορέα διαχείρισης. Ο πομπός είναι εκτός λειτουργίας, ενώ ο δέκτης είναι εντός λειτουργίας στην περίπτωση της FTU-R initiated HS. Η μονάδα διαχείρισης της FTU περιμένει αίτημα αρχικοποίησης από το φορέα διαχείρισης για να μεταβεί στην κατάσταση O-INIT/HS στην περίπτωση της FTU-O initiated HS.
- O-INIT/HS (υποχρεωτική): Προσωρινή κατάσταση στην οποία η εισέρχεται για να την πραγματοποίηση της G.994.1 φάσης της αρχικοποίησης. Πομπός και δέκτης λειτουργούν. Αν επιλεγθεί η σιωπηλή περίοδος ή δεν επιλεγθεί καμία κατάσταση, τότε γίνεται μετάβαση ξανά στην κατάσταση O-SILENT1. Αν επιλεγθεί η κατάσταση λειτουργίας, γίνεται μετάβαση στην κατάσταση O-INIT/TRAIN.
- O-INIT/TRAIN (υποχρεωτική): Προσωρινή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O για την πραγματοποίηση άλλων φάσεων της αρχικοποίησης. Πομπός και δέκτης λειτουργούν. Αν πετύχει η αρχικοποίηση γίνεται μετάβαση στην κατάσταση O-SHOWTIME, διαφορετικά γίνεται μετάβαση στην κατάσταση O-DEACTIVATING1.
- O-SHOWTIME (υποχρεωτική): Σταθερή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O για να μεταδώσει δεδομένα του χρήστη. Τεχνικές ORL λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια αυτής της κατάστασης. Σε περίπτωση ικανοποίησης συνθηκών της πολιτικής γρήγορης επανεκπαίδευσης, γίνεται μετάβαση στην κατάσταση O-DEACTIVATING2. Όταν παραχωρείται μετάβαση στην κατάσταση σύνδεσης L3, η FTU-O εισέρχεται στην κατάσταση O-DEACTIVATING1. Η μονάδα διαχείρισης της FTU αναφέρει στο φορέα διαχείρισης τις παραμέτρους επίδοσης της FTU-O.
- O-DEACTIVATING1 (υποχρεωτική): Προσωρινή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O μετά τη μετάβαση γραμμής στην κατάσταση σύνδεσης L3 (Εν.3.3.8.1). Ο πομπός λειτουργεί (μεταδίδει αδρανή σύμβολα στις απαιτούμενες θέσεις όλων των λογικών πλαισίων, οι τιμές Z_i στην είσοδο του προκωδικοποιητή τίθενται 0 αλλά μεταδίδονται σύμβολα προ-αντιστάθμισης για την υποστήριξη της ακύρωσης της τηλεδιαφωνίας κάτω ζεύξης). Ο δέκτης λειτουργεί (για την υποστήριξη της ακύρωσης της τηλεδιαφωνίας άνω ζεύξης και για την αναγνώριση της κατάστασης της FTU-R). Η μονάδα ελέγχου vectoring ενημερώνει τους συντελεστές για την ακύρωση της τηλεδιαφωνίας άνω και κάτω ζεύξης. Αφότου

ολοκληρωθεί, η έξοδος του προκωδικοποιητή τίθεται μηδενική και η FTU-O μεταβαίνει στην κατάσταση O-SILENT.

- O-DEACTIVATING2 (υποχρεωτική): Προσωρινή κατάσταση στην οποία εισέρχεται η FTU-O μετά από αίτημα για γρήγορη επανεκπαίδευση. Ο πομπός λειτουργεί (μεταδίδει αδρανή σύμβολα στις απαιτούμενες θέσεις όλων των λογικών πλαισίων, οι τιμές Z_i στην είσοδο του προκωδικοποιητή τίθενται 0 αλλά μεταδίδονται σύμβολα προ-αντιστάθμισης για την υποστήριξη της ακύρωσης της τηλεδιαφωνίας κάτω ζεύξης). Ο δέκτης λειτουργεί (για την υποστήριξη της ακύρωσης της τηλεδιαφωνίας άνω ζεύξης και για την αναγνώριση της κατάστασης της FTU-R). Η μονάδα ελέγχου vectoring ενημερώνει τους συντελεστές για την ακύρωση της τηλεδιαφωνίας άνω και κάτω ζεύξης. Αφότου ολοκληρωθεί, η έξοδος του προκωδικοποιητή τίθεται μηδενική και η FTU-O μεταβαίνει στην κατάσταση O-INIT/TRAIN.

3.3.9 Link states (Καταστάσεις της διασύνδεσης)

Στο G.fast αναγνωρίζονται 5 καταστάσεις γραμμής: L0, L2.1N, L2.1B, L2.2 Και L3.

3.3.9.1 L3 – Idle state

Στην κατάσταση σύνδεσης L3 (αδρανής κατάσταση), η FTU-O παραμετροποιείται μέσω της διεπαφής διαχείρισης για την υπηρεσία που επιθυμεί ο πάροχος, ενώ δεν υπάρχει μετάδοση σημάτων ούτε από την FTU-O ούτε από την FTU-R, εξαιρουμένων αυτών που αφορούν τη διαδικασία αρχικοποίησης. Κατά τη διάρκεια της ταχείας επανεκπαίδευσης ή της αρχικοποίησης, η κατάσταση λειτουργίας παραμένει η L3, έως ότου αμφότεροι οι πομποδέκτες βρεθούν στην κατάσταση SHOWTIME, οπότε η κατάσταση σύνδεσης γίνεται η L0.

3.3.9.2 L0 – Normal operation State

Η L0 είναι η κατάσταση πλήρους ισχύος που χρησιμοποιείται κατά την κανονική λειτουργία. Κατά την L0, οι ρυθμοί μετάδοσης όλων των γραμμών επιτρέπεται να φθάσουν στο ανώτατο όριο χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένης της μονόδρομης καθυστέρησης (one way latency). Όταν όλες οι γραμμές λειτουργούν με τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης, μεγιστοποιείται προφανώς και η κατανάλωση αλλά και η διάχυση ισχύος.

Σε αυτήν την κατάσταση μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη αποτελεσματικότητα η διακοπτόμενη λειτουργία (discontinuous operation) η οποία διευκολύνει την εξοικονόμηση ισχύος με τη μετάδοση ήσυχων ή αδρανών συμβόλων (quiet or idle symbols) όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση ή όταν η μετάδοση δεδομένων δεν επιτρέπεται. Επιπλέον, σε αυτή την κατάσταση μπορεί να εφαρμοστεί με ευκολία η μείωση ισχύος, ελέγχοντας το μέγιστο χρόνο μετάδοσης εντός ενός TDD πλαισίου. Η μονάδα ελέγχου ισχύος σε συνδυασμό με τη δυναμική διαχείριση πόρων αλλά και τη μονάδα ελέγχου vectoring (Κεφ.4) ορίζουν και ανανεώνουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα της μέγιστο επιτρεπόμενο χρόνο μετάδοσης για κάθε γραμμή, επιτρέποντας έτσι στο φορέα διαχείρισης να ελέγχει την πραγματική διάχυση ισχύος ενός σημείου διανομής και να τη διατηρεί ενός του επιθυμητού ορίου.

Διαστήματα κανονικής και διακοπτόμενης λειτουργίας

Όταν η κατάσταση σύνδεσης είναι η L0 και ο διαθέσιμος χρόνος για τη μετάδοση δεδομένων δεν αξιοποιείται όλος, γίνεται να οριστεί ένα διάστημα διακοπτόμενης λειτουργίας (Discontinuous Operation Interval - DOI) για να διευκολυνθεί η εξοικονόμηση ισχύος των πομποδεκτών. Το διάστημα αυτό μπορεί να οριστεί ανεξάρτητα για την άνω και κάτω ζεύξη. Κατά τη διάρκειά του, οι περίοδοι συμβόλων εντός ενός λογικού πλαισίου μπορούν να γεμίσουν είτε με σύμβολα δεδομένων, είτε με αδρανή σύμβολα, είτε με ήσυχα σύμβολα. Ένα λογικό πλαίσιο χωρίζεται σε δύο διαστήματα λειτουργίας: το κανονικό διάστημα (Normal Operation Interval - NOI) και το διακοπτόμενο (DOI).

3.3.9.3 Low power link state L2.1

Η κατάσταση λειτουργίας χαμηλής ισχύος επιτρέπει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ισχύος, με αντάλλαγμα την υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας (υψηλή καθυστέρηση και σημαντική μείωση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης). Η κατάσταση αυτή αποσκοπεί κυρίως στην υποστήριξη της υπηρεσίας VoIP (Voice over Internet Protocol), όταν άλλες υπηρεσίες δε χρησιμοποιούνται και αποτελείται από δύο υπο-καταστάσεις:

- L2.1 με τροφοδότηση από το δίκτυο (with mains powering) (L2.1N)
- L2.1 με τροφοδότηση από μπαταρία (with battery powering) (L2.1B)

Για την μείωση της κατανάλωσης της ισχύος πραγματοποιείται προγραμματισμένη διακοπτόμενη λειτουργία, όπου βάσει ενός σχεδίου μετάδοσης ορίζονται ποια TDD πλαίσια θα χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση RMC συμβόλων και ποια όχι, ενώ τα δεδομένα μεταφέρονται μόνο στα RMC σύμβολα. Όλες οι υπόλοιπες θέσεις συμβόλων, εκτός των θέσεων των συμβόλων συγχρονισμού, είναι σιωπηλές. Εκτός της διακοπτόμενης λειτουργίας, μπορεί να μειωθεί και η φασματική πυκνότητα ισχύος μετάδοσης (transmit PSD) αλλά και να περιοριστεί ο αριθμός των τόνων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μέσω RMC συμβόλων.

3.3.9.4 Low power link state L2.2

Η κατάσταση λειτουργίας L2.2 χαμηλής ισχύος στοχεύει στην εξυπηρέτηση keep-alive εφαρμογών για μεγάλη διάρκεια λειτουργίας με χρήση εφεδρικής μπαταρίας. Οδηγεί σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ισχύος, μέσω του αυστηρού περιορισμού του επιτρεπόμενου χρόνου μετάδοσης κατά τη διάρκεια ενός αριθμού από υπερπλαίσια και επιτρέποντας υψηλή καθυστέρηση (με αποτέλεσμα πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και απώλεια της ποιότητας υπηρεσίας). Για την περεταίρω μείωση της κατανάλωσης της ισχύος πραγματοποιείται προγραμματισμένη διακοπτόμενη λειτουργία, όπου βάσει ενός σχεδίου μετάδοσης ορίζονται ποια TDD πλαίσια θα χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση RMC συμβόλων και ποια όχι, ενώ τα δεδομένα μεταφέρονται μόνο στα RMC σύμβολα.

3.3.10 Online Reconfiguration Methods

Μέσω των τεχνικών της on-line αναδιαμόρφωσης είναι εφικτή η τροποποίηση ορισμένων παραμέτρων ενόσω η DSL σύνδεση είναι ενεργή χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για λάθη ή διακοπή της υπηρεσίας. Οι διαθέσιμες μέθοδοι στο G.fast παρουσιάζονται στις Εν.3.3.10.1 - 3.3.10.7. Πολλές από τις έννοιες που χρησιμοποιούνται, αναλύονται στο Κεφ.4.

3.3.10.1 Seamless Rate Adaptation

Η τεχνική του SRA χρησιμοποιείται για τον επαναπροσδιορισμό του καθαρού ρυθμού μετάδοσης¹⁷ (Net Data Rate - NDR), μεταβάλλοντας τα bits και τα κέρδη (b_i , g_i), τις παραμέτρους του πλαισίου δεδομένων (B_{DR} , B_D) και το μέγεθος της DTU μέσω των παραμέτρων K_{FEC} , R_{FEC} και Q . Η διαδικασία αυτή δε μπορεί να εφαρμοστεί στο κανάλι εύρωστης διαχείρισης (RMC).

3.3.10.2 Bit Swapping

Η τεχνική του Bit Swapping χρησιμοποιείται για την ανακατανομή των bits και της ισχύος μετάδοσης μεταξύ των επιτρεπτών τόνων χωρίς τη μεταβολή του συνολικού αριθμού των bytes δεδομένων (B_D) που ενσωματώνονται εντός ενός συμβόλου δεδομένων. Με την τεχνική αυτή μεταβάλλονται τα bits και τα κέρδη (b_i , g_i) χωρίς όμως να μεταβάλλεται καμία άλλη παράμετρος ελέγχου των υποστρωμάτων PMD και PMS-TC. Αποτελεί μία υποχρεωτική δυνατότητα και δε μπορεί να εφαρμοστεί στο σετ τόνων που αφορούν RMC (η αντίστοιχη διαδικασία που εφαρμόζεται είναι η RPA – Εν.3.3.10.4).

3.3.10.3 Transmitter-Initiated Gain Adjustment (TIGA)

Η τεχνική προσαρμογής του κέρδους με πρωτοβουλία του πομπού δίνει τη δυνατότητα στη μονάδα ελέγχου vectoring να διευθετεί τις αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στο κέρδος καναλιού κάτω ζεύξης (downstream precoded direct channel gain) Αποτελεί μία υποχρεωτική δυνατότητα.

3.3.10.4 RMC Parameter Adjustment (RPA)

Η τεχνική της ρύθμισης των παραμέτρων του καναλιού εύρωστης διαχείρισης, δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των παραμέτρων του RMC και χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του RMC tone set and the bit loading των RMC τόνων. Αποτελεί μία υποχρεωτική δυνατότητα

3.3.10.5 Fast Rate Adaptation (FRA)

Η τεχνική της γρήγορης προσαρμογής ρυθμού μετάδοσης παρέχει ταχεία προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης, μέσω της αλλαγής του του bit loading σε ορισμένες ομάδες τόνων (sub-bands). Αποτελεί μία υποχρεωτική δυνατότητα.

3.3.10.6 L2 Transmission Schedule Adaptation (L2TSA)

Η προσαρμογή του προγράμματος μετάδοσης στην κατάσταση σύνδεσης L2 χρησιμοποιείται για τη μεταβολή του προγράμματος μετάδοσης των RMC συμβόλων κατά την κατάσταση σύνδεσης L2.1 και αποτελεί μία υποχρεωτική δυνατότητα.

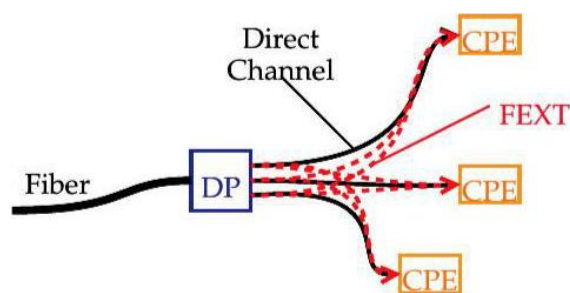
3.3.10.7 RMC Recovery (RMCR)

Η τεχνική της χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση του καναλιού εύρωστης διαχείρισης στην περίπτωση που αποτύχει σε μία ή και στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης, χρησιμοποιώντας στη θέση του ένα εφεδρικό σετ RMC τόνων και bit loading. Είναι ένα προαιρετικό χαρακτηριστικό, η υποστήριξη ή όχι του οποίου υποδεικνύεται κατά την έναρξη.

¹⁷ Ο καθαρός ρυθμός μετάδοσης αναφέρεται στο ρυθμό μετάδοσης του ωφέλιμου φορτίου της μονάδας μεταφοράς δεδομένων (DTU) μείον το ρυθμό μετάδοσης του καναλιού ενσωματωμένων λειτουργιών.

3.3.11 Παρεμβολές στο G.fast

Σχεδόν σε όλες τις τοπολογίες του G.fast εμφανίζεται το φαινόμενο των παρεμβολών (crosstalk). Κάθε φορά που περισσότεροι από ένας συνδρομητές είναι παρόντες στο ίδιο καλώδιο, ένα μέρος του σήματος από μία γραμμή παρεμβάλλει στα σήματα άλλων γραμμών λόγω ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης. Με την αύξηση της συχνότητας η διαφωνία μεταξύ των γραμμών γίνεται εντονότερη, φθάνοντας στην ίδια ένταση με τη σύνδεση ενδιαφέροντος, κατάσταση που μοιάζει πολύ με τις ασύρματες επικοινωνίες. Ωστόσο, δεδομένης της σύγχρονης μετάδοσης των σημάτων που υπάρχει στην περίπτωση του G.fast, δεν υπάρχει παραδιαφωνία (NEXT) στις τοπολογίες όπου πολλοί συνδρομητές εξυπηρετούνται μέσω της τεχνολογίας G.fast από το ίδιο σημείο διανομής. Οπότε μένει η αντιμετώπιση της τηλεδιαφωνίας (FEXT) που παρουσιάζεται στα απομακρυσμένα τερματικά (CPEs) καθώς το σήμα που λαμβάνουν υφίσταται παρεμβολές από τα αντίστοιχα σήματα των άλλων τερματικών, όπως φαίνεται στο Σχ.3.12. Με την τεχνική του vectoring (Εν.3.3.12) είναι δυνατή έως και η εξάλειψη της παραδιαφωνίας. [1]

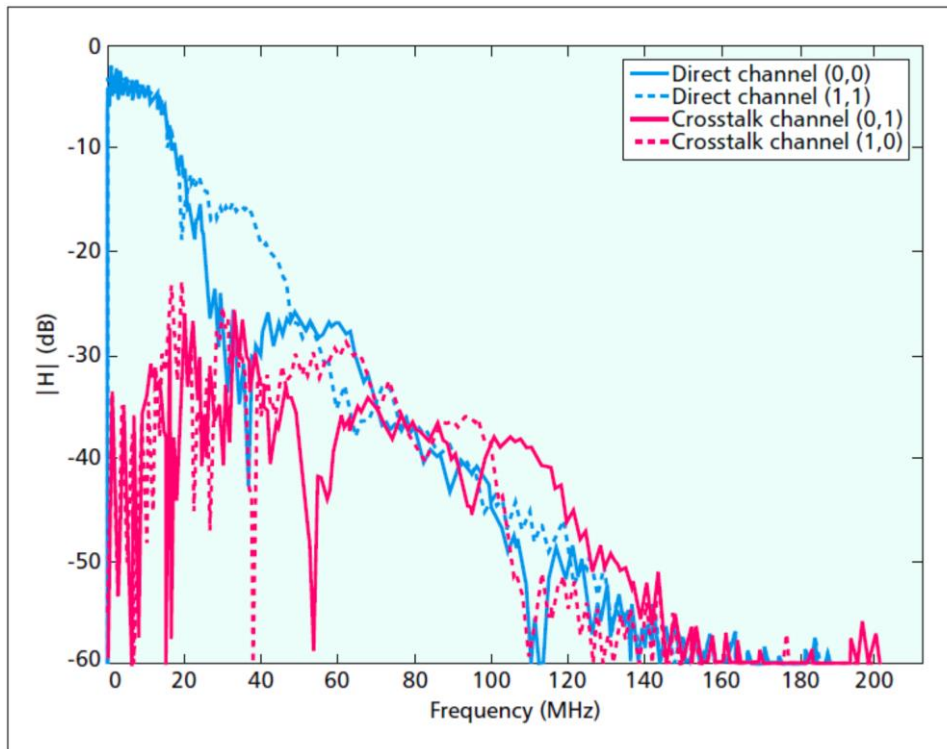


Σχήμα 3.12: Το φαινόμενο των παρεμβολών στο G.fast

3.3.12 Vectoring στο G.fast

Η τεχνική του vectoring στο G.fast έχει στόχο την εξάλειψη της διαφωνίας που προκαλείται μεταξύ των γειτονικών γραμμών που βρίσκονται εντός του ίδιου καλωδίου με την προσθήκη σημάτων αντιστάθμισης στο μεταδιδόμενο ή στο λαμβανόμενο σήμα. Στην περίπτωση του VDSL2 όπου αξιοποιούνται συχνότητες έως 35MHz, αξίζει να αναφερθεί ότι η ισχύς των παρεμβαλλόμενων γραμμών είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της γραμμής ενδιαφέροντος. Ως εκ τούτου, η ισχύς του σήματος αντιστάθμισης είναι μικρή συγκριτικά με την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος και μπορεί να αγνοηθεί. Ωστόσο, στην περίπτωση του G.fast, η διαφωνία μεταξύ των γειτονικών γραμμών είναι αρκετά έντονη (Σχ.3.13), με αποτέλεσμα να μη μπορεί να αγνοηθεί η ισχύς των σημάτων αντιστάθμισης.

Για την εφαρμογή του vectoring στο G.fast υπάρχουν 2 επιλογές: ο βελτιωμένος γραμμικός αλγόριθμος προ-κωδικοποίησης (improved lineal precoding algorithm) και ο μη γραμμικός αλγόριθμος προ-κωδικοποίησης (non-linear precoding algorithm). Ο μη γραμμικός αλγόριθμος εκτός του ότι επιτυγχάνει υψηλότερα κέρδη από το γραμμικό στις υψηλές συχνότητες, επιτυγχάνει σχεδόν τα ίδια κέρδη στις χαμηλές. Επιπλέον, επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για σχεδόν όλες τις γραμμές. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητάς του, απαιτεί ισχυρότερο επεξεργαστή, χαρακτηριστικό που οδηγεί σε δυσκολίες εφαρμογής, υψηλή κατανάλωση ισχύος και μεγαλύτερο κόστος. Για τους ανωτέρω λόγους έχει επιλεγεί η χρήση του γραμμικού αλγορίθμου.



Σχήμα 3.13: Ισχύς σημάτων μετάδοσης και σημάτων παρεμβολών

Η λειτουργία του vectoring περιγράφεται αναλυτικά στην Εν.4.4.3.4. Στην πράξη, η μονάδα ελέγχου vectoring του απομακρυσμένου τερματικού (VTU-R) λαμβάνει μία σειρά από ειδικούς πιλοτικούς τόνους που αποτελούνται από σύμβολα συγχρονισμού και ήσυχα σύμβολα¹⁸ (quiet symbols) για κάθε τόνο από την ομότιμη μονάδα που βρίσκεται από την άλλη πλευρά του βρόχου (VTU-O) και στη συνέχεια υπολογίζει ένα δείγμα λάθους για κάθε τόνο. Πρόκειται για μία παράμετρο που έχει τη μορφή διανύσματος και δηλώνει τη θέση του λαμβανόμενου αστερισμού σε σχέση με τη θέση όπου θα έπρεπε να είναι. Στη συνέχεια, η μονάδα ελέγχου vectoring χρησιμοποιεί ένα ειδικό κανάλι επιστροφής (back channel) για να στείλει τα δείγματα λάθους όλων των τόνων στη μονάδα ελέγχου vectoring. Η μονάδα ελέγχου vectoring λαμβάνει αντίστοιχα μηνύματα από όλες τις γραμμές που ανήκουν στο ίδιο vector control group. Κατόπιν, υπολογίζει έναν πίνακα ο οποίος περιλαμβάνει όλους τους συντελεστές FEXT από τα ληφθέντα δεδομένα. Τέλος, τροφοδοτεί τον προ-κωδικοποιητή με αυτές τις πληροφορίες, ώστε ο προκωδικοποιητής να μπορέσει να υπολογίσει το τροποποιημένο σήμα εξόδου που περιλαμβάνει πλέον τη διαφωνία, με αποτέλεσμα να ακυρώνει την πραγματική διαφωνία κατά τη μεταφορά του.

¹⁸ Σύμβολα που δημιουργούνται θέτοντας την είσοδο του διαμορφωτή ίση με το 0 για όλους τους τόνους ($Z_i=0$ στην FTU-R, $Z_i'=0$ στην FTU-O). Η μετάδοση ήσυχων συμβόλων συνεπάγεται μηδενική ισχύ μετάδοσης στην διεπαφή U (βλ. Σχ.4.14).

3.3.13 Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών και λειτουργιών του G.fast

Σύμφωνα με τη σύσταση της ITU G.9701, το G.fast διαθέτει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Τις βέλτιστες πτυχές της τοπολογίας FTTH: αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης άνω και κάτω ζεύξης ως 2Gbps
- Τις βέλτιστες πτυχές της τεχνολογίας ADSL2: εγκατάσταση και λειτουργία από τον ίδιο τον πελάτη (bridged taps)
- Συνύπαρξη με τεχνολογίες ADSL2 και VDSL2 σε γειτονικά ζεύγη καλωδίων
- Λειτουργία χαμηλής ισχύος και όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν στους πομποδέκτες να λειτουργούν ως τμήμα του ανάστροφα τροφοδοτούμενου εξοπλισμού και να προσαρμόζονται στις συνθήκες του περιβάλλοντος (πχ. θερμοκρασία)
- Λειτουργίες διαχείρισης που επιτρέπουν στους πομποδέκτες να λειτουργούν σε περιβάλλοντα για την ανάπτυξη των οποίων δεν απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση
- Έλεγχος του χρόνου μετάδοσης για την άνω και κάτω ζεύξη για την προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης στις ανάγκες των πελατών (ιδιωτών αλλά και επαγγελματιών)
- Vectoring για την ακύρωση της διαφωνίας (self-crosstalk cancellation), με στόχο την επίτευξη αυξημένων ρυθμών μετάδοσης στις γραμμές που υφίστανται διαφωνία τύπου FEXT από άλλες γραμμές εντός του ίδιου καλωδίου ή γραμμές που προέρχονται από τον ίδιο εξοπλισμό δικτύου
- Μεταφορά παραμέτρων NTR (Network Timing Reference) και ToD (Time of Day) για το συγχρονισμό τόσο της συχνότητας δικτύου όσο και του χρόνου μεταξύ του εξοπλισμού δικτύου και πελάτη.
- Ρυθμιζόμενη χρήση φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των ορίων και ζωνών αποκοπής της φασματικής πυκνότητας ισχύος για τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας

Τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας είναι:

- Η διαφανής μετάδοση πακέτων δεδομένων (πχ. ethernet packets) με αθροιστικό ρυθμό μετάδοσης άνω και κάτω ζεύξης ως 2Gbps
- Χρησιμοποιούμενο φάσμα εντός ζώνης έως 212MHz
- Ρυθμιζόμενες συχνότητες έναρξης και λήξης, διαμόρφωση φασματικής πυκνότητας ισχύος και αποκοπή ζωνών συχνοτήτων (notching)
- Χρήση DMT με 2048 (ή 4096) τόνους και εύρος ζώνης τόνου 51.75kHz
- Χρήση TDD (μοιραζόμενος χρόνος μεταξύ άνω και κάτω ζεύξης)
- Μετάδοση χαμηλής καθυστέρησης
- Υλοποίηση FEC με χρήση κωδικοποίησης Trellis και Reed Solomon
- Vectoring με χρήση (στη σύσταση G.9701) γραμμικής προκωδικοποίησης
- Διακοπτόμενη λειτουργία όταν δε χρησιμοποιείται όλος ο διαθέσιμος χρόνος μετάδοσης για τη μετάδοση δεδομένων
- Μέθοδοι online αναδιαμόρφωσης για την προσαρμογή σε αλλαγές των καναλιών και των χαρακτηριστικών θορύβου, συμπεριλαμβανομένης της τεχνικής FRA

Με αυτά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας η τεχνολογία του G.fast αποσκοπεί στην επίτευξη των κατωτέρω ρυθμών μετάδοσης σε ζεύγη καλωδίων πάχους 0.5mm για τα προφίλ των 106MHz:

- 500 to 1000Mbps για μήκη βρόχου μικρότερα από 100m;
- 500 Mbps στα 100m;
- 200 Mbps στα 200m;
- 150 Mbps στα 250m;
- 500 Mbps στα 50m, λειτουργώντας σε συχνότητες άνω των 17MHz

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας καθώς και οι υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στο G.fast παρουσιάζονται και στους Πιν.3.9 και Πιν.3.10 μαζί με τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων DSL τεχνολογιών. [13]

Τεχν. Χαρακτ.	ADSL	ADSL2	ADSL2+	VDSL	VDSL2 (17a)	G.fast (106a)	G.fast (106b)	G.fast (212a)
Πρότυπο ITU-T	G.992.1	G.992.3	G.992.5	G.993.1	G.993.2	G.9701	G.9701	G.9701
Μέγιστη Ταχύτητα Μετάδοσης (DS/US)	8Mbps/ 1Mbps	12Mbps/ 1Mbps	24Mbps/ 1Mbps	52Mbps/ 6.4Mbps	100Mbps/ 50Mbps	1Gbps	1Gbps	2Gbps
Μέγιστη Απόσταση	4km	5km	6km	1,5km	400m	400m	500m	400m
Εύρος ζώνης λειτουργίας	25kHz - 1,1MHz	25kHz - 1,1MHz	25kHz - 2,2MHz	25kHz - 12MHz	25kHz - 17,6MHz	2,2MHz - 106MHz	2,2MHz - 106MHz	2,2MHz - 212MHz
Μέθοδος διαμόρφωσης	DMT	DMT	DMT	DMT	DMT	DMT	DMT	DMT
Αριθμός τόνων	255	255	512	4096 (max)	4096	2048	2048	4096
Φασματική απόσταση τόνων (kHz)	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	4,3125	51,75	51,75	51,75
Ρυθμός συμβόλου	4kHz	4kHz	4kHz	4kHz	4kHz	48kHz	48kHz	48kHz
Max bits/σύμβ.	15	15	15	8-15	15	12	12	24
Μέθοδος πολυπλεξίσης	FDD or echo cancelling	FDD or echo cancelling	FDD or echo cancelling	FDD	FDD	TDD	TDD	TDD

Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικά λειτουργίας τεχνολογιών DSL συμπεριλαμβανομένου του G.fast

Τεχνολογία Μηχανισμός	ADSL	ADSL2	ADSL2+	VDSL	VDSL2 17a	G.fast
CRC	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FEC with RS	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Interleaving	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trellis Coding	✓ (optional)	✓ (optional)	✓ (optional)	-	✓ (optional)	✓
INP	-	✓	✓	-	✓	✓
INM	-	✓	✓	-	✓	✓
G.INP	-	✓	✓	-	✓	✓
RFI Notching	-	-	-	✓	✓	✓
Tone Blackout (missing tone)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Virtual Noise	-	✓	✓	-	✓	-
Bit Swapping	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SRA	-	✓ (optional)	✓ (optional)	-	✓ (optional)	✓
SOS	-	-	-	-	✓	-
TIGA	-	-	-	-	-	✓
RPA	-	-	-	-	-	✓
FRA	-	-	-	-	-	✓
L2TSA	-	-	-	-	-	✓
RMCR	-	-	-	-	-	✓
Echo Cancellation	✓	✓	✓	✓	✓	-
PSD Masking	✓	✓	✓	✓	✓	✓
UPBO	-	-	-	✓	✓	✓
DPBO	-	✓	✓	-	✓	-
Bonding	-	✓	✓	✓	✓	✓
Vectoring	-	-	-	-	✓	✓

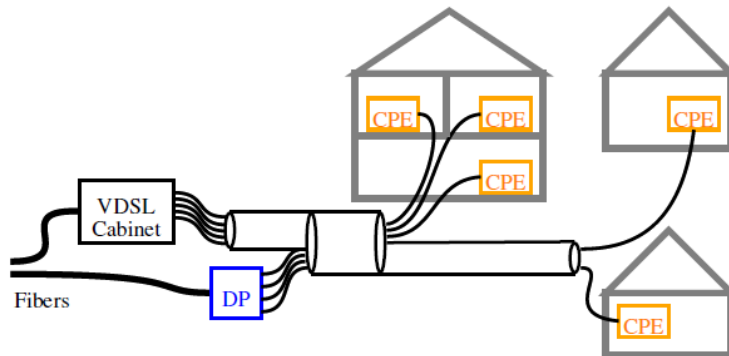
Πίνακας 3.10: Υποστηρικτικοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι DSL τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένου του G.fast

3.4 Συνύπαρξη με παλαιότερες τεχνολογίες

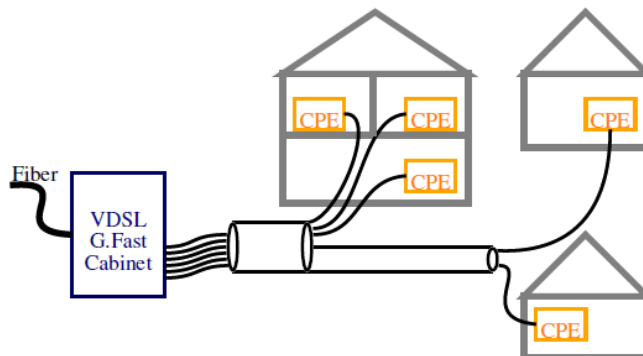
3.4.1 Τοπολογίες συνύπαρξης G.FAST με VDSL2

Καθώς το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιεί G.fast επικαλύπτεται σε σημαντικό βαθμό με το φάσμα του VDSL2, εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο οι επιδόσεις των δύο τεχνολογιών στα διάφορα σενάρια συνύπαρξης όσο και οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταστήσουν τη συνύπαρξη αυτή αρμονική.

Υπάρχουν δύο σενάρια συνύπαρξης του G.fast με το VDSL2. Στο πρώτο σενάριο (Σχ.3.14), ένα μέρος των συνδρομητών που μοιράζονται το ίδιο καλώδιο κάνει χρήση του VDSL μέσω της αρχιτεκτονικής FTTC, ενώ οι υπόλοιποι συνδρομητές εξυπηρετούνται μέσω του G.fast μέσω της αρχιτεκτονικής του FTTdρ, οπότε προκαλείται διαφωνία μεταξύ των υπηρεσιών. Στο δεύτερο σενάριο (Σχ.3.15), οι καμπίνες του VDSL έχουν αναβαθμιστεί για να εξυπηρετούν και το G.fast, με αποτέλεσμα να είναι διαθέσιμοι μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης για τους συνδρομητές που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από την καμπίνα, ενώ, ταυτόχρονα, οι απομακρυσμένοι συνδρομητές (ή οι συνδρομητές που δεν έχουν αναβαθμίσει τον εξοπλισμό τους) να μπορούν να εξυπηρετηθούν με VDSL. Όπως είναι λογικό, και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ των δύο υπηρεσιών.

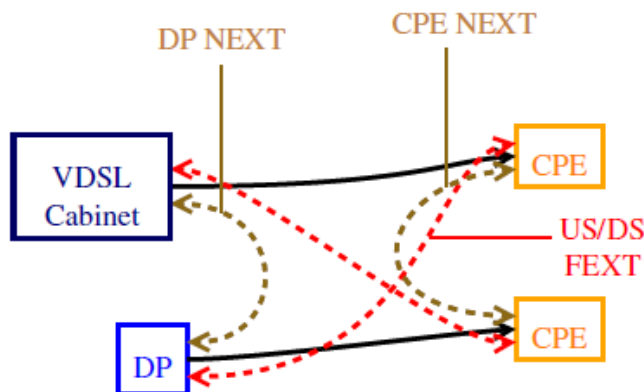


Σχήμα 3.14: Συνύπαρξη τοπολογιών FTTC και FTTd στο ίδιο καλώδιο



Σχήμα 3.15: Συνύπαρξη VDSL2 και G.fast στην ίδια καμπίνα

Όπως φαίνεται στο Σχ.3.16, κατά τη συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών, προκύπτουν δύο είδη παρεμβολών, alien-NEXT και alien-FEXT. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαφωνία που προκαλείται μεταξύ των γραμμών της ίδιας υπηρεσίας (self-NEXT) υφίσταται καταστολή μέσω του vectoring, οπότε και δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτή την ανάλυση.



Σχήμα 3.16: Είδη παρεμβολών στην περίπτωση συνύπαρξης VDSL2 και G.fast

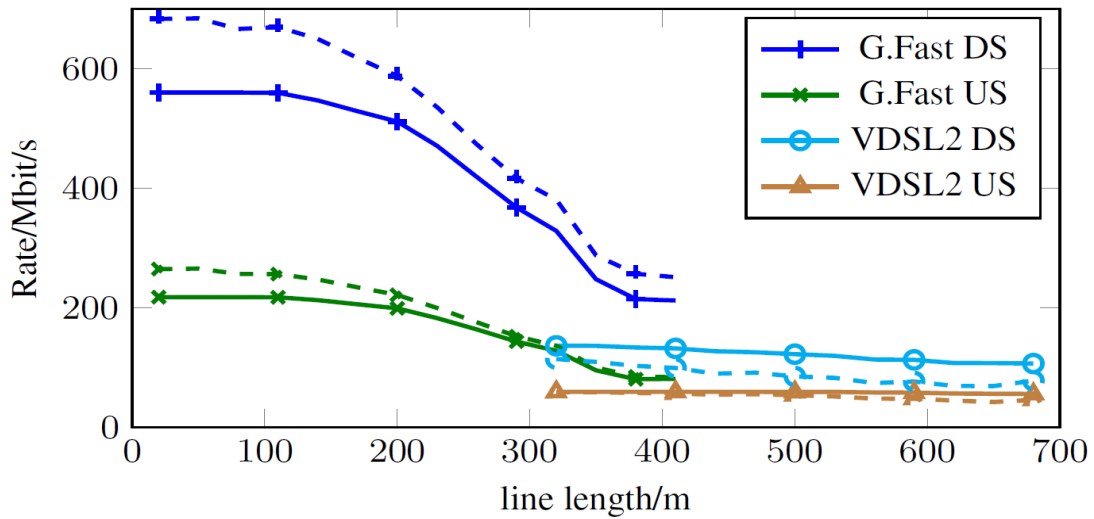
3.4.2 Στρατηγικές συνύπαρξης

Η πρώτη τεχνική συνύπαρξης για την εγγύηση φασματικής συμβατότητας μεταξύ των δύο υπηρεσιών αποσκοπεί στην αποφυγή της διαφωνίας. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συχνότητες λειτουργίας του VDSL αποκλείονται από το φάσμα του G.fast με αποτέλεσμα να υπάρχει επικάλυψη μόνο λόγω του φάσματος εκτός ζώνης. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε ελάχιστες παρεμβολές στο VDSL αλλά προκαλεί σημαντική μείωση του ρυθμού μετάδοσης του G.fast. Ωστόσο, καθώς η ισχύς μετάδοσης εκτός ζώνης (όπου υπάρχει φασματική επικάλυψη) των δύο τεχνολογιών δεν είναι μηδενική, δημιουργούνται παρεμβολές.

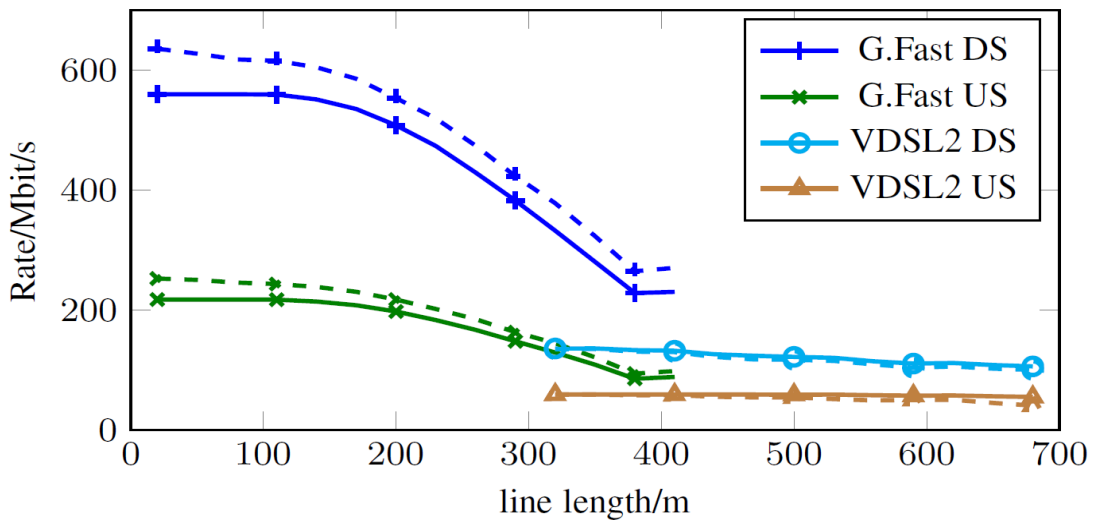
Η δεύτερη τεχνική επιτρέπει τη μερική φασματική επικάλυψη μεταξύ των υπηρεσιών ενώ παράλληλα προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το φάσμα μετάδοσης μέσω της εφαρμογής φασματικών περιορισμών. Σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται ότι δεν υπάρχει κάποιος συντονισμός μεταξύ των γραμμών των διαφορετικών τεχνολογιών. Κάθε ομάδα γραμμών καθορίζει το βέλτιστο φάσμα μετάδοσης ανεξάρτητα από την άλλη. Στην περίπτωση όπου η βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης δεν είναι αρκετή, λόγω της ανάγκης προστασίας της παλαιότερης υπηρεσίας, χρησιμοποιείται και η τεχνική της μείωσης της ισχύος (Power back-off).

3.4.3 Επιδόσεις τεχνολογιών στην περίπτωση συνύπαρξης

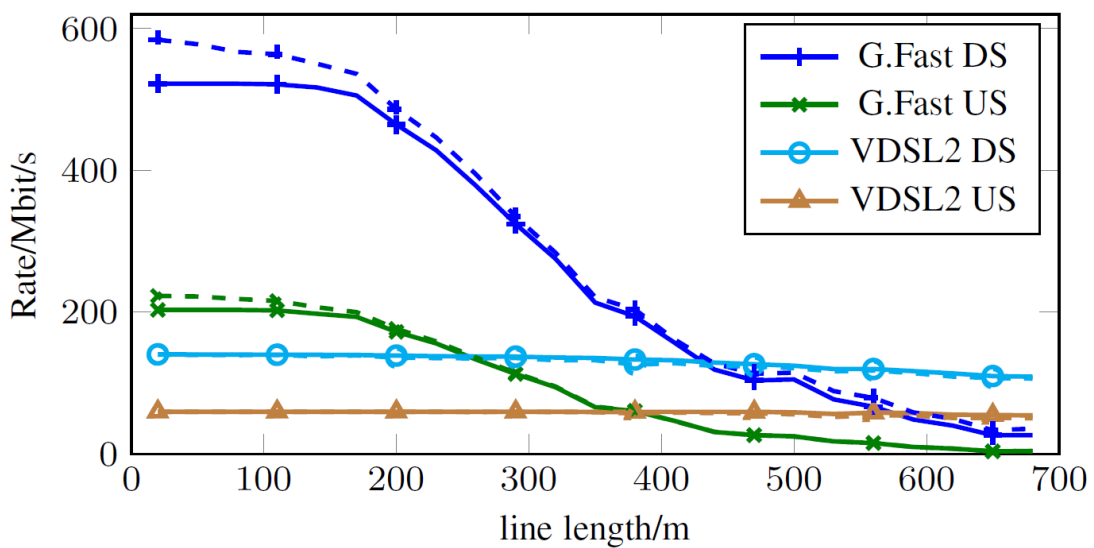
Στα Σχ.3.17, Σχ.3.18 και Σχ.3.19 παρουσιάζονται οι επιδόσεις των τεχνολογιών VDSL2 και G.fast στα δύο σενάρια συνύπαρξης βάσει των στρατηγικών που εφαρμόζονται. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδηλώνουν τη χρήση επικαλυπτόμενου φάσματος, ενώ οι συνεχόμενες γραμμές υποδηλώνουν τη χρήση τεχνικής αποφυγής διαφωνίας. Τα αποτελέσματα αφορούν καλώδια που περιλαμβάνουν έως 30 χάλκινα ζεύγη. Στο πρώτο σενάριο συνύπαρξης η απόσταση μεταξύ καμπίνας έγχυσης VDSL και σημείου διανομής G.fast είναι 300m, ενώ στο δεύτερο σενάριο συνύπαρξης, χρησιμοποιείται το προφίλ 106b του G.fast (long reach) καθώς το προφίλ 106a δεν χρησιμοποιείται για αποστάσεις μεγαλύτερες των 400m.



Σχήμα 3.17: Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 1



Σχήμα 3.18: Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 1 με χρήση μείωσης ισχύος στην περίπτωση επικαλυπτόμενου φάσματος



Σχήμα 3.19: Επιδόσεις G.fast και VDSL2 στο σενάριο συνύπαρξης 2 με χρήση μείωσης ισχύος στην περίπτωση επικαλυπτόμενου φάσματος

Βάσει του Σχ.3.17 φαίνεται ότι με τη χρήση επικαλυπτόμενου φάσματος η τεχνολογία G.fast εμφανίζει καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής αποφυγής διαφωνίας (μέγιστο κέρδος σε ταχύτητα 120Mbps, μέσο κέρδος σε ταχύτητα 75Mbps), ενώ υπάρχει σημαντική μείωση του ρυθμού μετάδοσης της τεχνολογίας VDSL. Με την εφαρμογή της μείωσης ισχύος (Σχ.3.18), και πάλι η τεχνολογία G.fast εμφανίζει καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής αποφυγής διαφωνίας (μέγιστο κέρδος σε ταχύτητα 80Mbps, μέσο κέρδος σε ταχύτητα 50 Mbps), ενώ, πλέον, δεν υπάρχει σημαντική μείωση του ρυθμού μετάδοσης της τεχνολογίας VDSL.

Βάσει του του Σχ.3.19, όπου η έγχυση της ισχύος και για τις δύο τεχνολογίες γίνεται από την ίδια καμπύλη, φαίνεται ότι με τη χρήση επικαλυπτόμενου φάσματος με μείωση ισχύος η τεχνολογία G.fast παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής αποφυγής διαφωνίας, ιδίως για μικρά μήκη βρόχου (μέγιστο κέρδος 50 Mbps), ενώ υπάρχει μικρή μείωση του ρυθμού μετάδοσης της τεχνολογίας VDSL (στα μεγάλα μήκη βρόχου). Επίσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση βρόχων μεγάλου μήκους είναι προτιμότερη η χρήση του VDSL2 έναντι του G.fast με τη μείωση ισχύος. [16]

Συμπερασματικά, η χρήση του επικαλυπτόμενου φάσματος είναι περισσότερο επωφελής στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να πλησιάσει τις επιδόσεις της τεχνικής της αποφυγής διαφωνίας με τη χρήση συντηρητικής μείωσης ισχύος.

3.5 Μελλοντικές τάσεις

Τα τελευταία 5 χρόνια, έχουν γίνει προτάσεις από εταιρείες κολοσσούς σχετικά με την ανάπτυξη του XG-FAST, ενός συστήματος πρόσβασης 5^{ης} γενιάς, για την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης των 10Gbps σε μικρές αποστάσεις πάνω από χάλκινα καλώδια. Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι είναι εφικτή η επίτευξη ρυθμών μετάδοσης πολλών gigabit για μήκη βρόχου έως 130μέτρα, ενώ σε μικρότερους βρόχους είναι δυνατή η επίτευξη ρυθμών άνω των 10Gbps. Μέσω του XG-FAST φαίνεται ότι είναι δυνατή η χρήση τοπολογιών FTTF (Fiber To The Frontage – ίνα μέχρι την πρόσωση), υπερβαίνοντας πολλά από τα εμπόδια της τοπολογίας FTTH. Επιπλέον, μέσω του FTTF XG-FAST είναι δυνατή η υποστήριξη διαχείρισης εξ αποστάσεως (remote management) αλλά και ενός αποδοτικού από άποψη κόστους backhaul πολλών gigabit για μελλοντικά ασύρματα δίκτυα 5G.

Σύμφωνα με το διεθνή οργανισμό τηλεπικοινωνιών, ένα νέο εγχείρημα με όνομα G.mgfast (G από την οικογένεια προτύπων, mg: multigigabit) βρίσκεται σε εξέλιξη, το οποίο είναι η φυσική συνέχεια του G.fast. Φαίνεται ότι θα αξιοποιεί συχνότητες πάνω από τα 212MHz, με προφίλ των 424MHz και 848MHz και θα λειτουργεί με πλήρη αμφιδρόμηση (full duplex operation) και καταστολή ηχούς. Μεταξύ των στόχων περιλαμβάνονται: η επίτευξη (αθροιστικών) ρυθμών 5-10Gbps πάνω από ένα μόνο συνεστραμμένο ζεύγος χαλκού ή πάνω από ένα ομοαξονικό καλώδιο. [3] [12]

3.6 Διεθνής εμπειρία

Η ανάπτυξη του G.fast ξεκίνησε μόλις το 2015, παρόλο που το πρότυπο είχε οριστικοποιηθεί αρκετά νωρίτερα. Η κατάσταση στις διάφορες χώρες έχει ως εξής:

- Ο αμερικάνικος κολοσσός AT&T σήμερα παρέχει ευρυζωνικές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας σε εκατομμύρια σπίτια και επιχειρήσεις της αμερικάνικης αγοράς μέσω του FTTH. Ωστόσο χρησιμοποιεί και την τεχνολογία G.fast για την επίτευξη ταχυτήτων έως 700Mbps σήμερα (και ενδεχομένως υψηλότερες στο μέλλον) στους πελάτες των Ηνωμένων Πολιτειών που δεν είναι εφικτό να εξυπηρετηθούν μέσω του FTTH.
- Στην Αυστραλία, ο πάροχος NBN Co. ιδρύθηκε το 2009, για να υλοποιήσει την πρόταση της κυβέρνησης περί παροχής ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω οπτικών ινών στο 93% του πληθυσμού της χώρας. Ωστόσο, το αρχικό σχέδιο καθυστέρησε να υλοποιηθεί, με αποτέλεσμα, μετά από την αλλαγή της κυβέρνησης, να τροποποιηθεί το 2013 και να αναπτυχθεί μία υβριδική τοπολογία ίνας και χαλκού σε μικρότερες αποστάσεις από αυτές που προέβλεπε το αρχικό πλάνο, αξιοποιώντας την υπάρχουσα καλωδίωση. Σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός μονοκατοικιών χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική FTTH ή FTTP, ενώ στην περίπτωση των πολυκατοικιών γίνεται εφαρμογή της αρχιτεκτονικής FTTH. Όπως αναπτύχθηκε αρχικά το σχέδιο, η NBN Co χρησιμοποιούσε το VDSL2 για την παροχή ταχυτήτων άνω των 25Mbps, παρόλο που στο 90% των περιπτώσεων ήταν εφικτές ταχύτητες άνω των 50Mbps. Ωστόσο σε ανακοίνωσή της δήλωσε πως από το τέλος του 2018 θα ξεκινήσει τη χρήση του G.fast για την παροχή υπηρεσιών ταχυτήτων άνω των 100Mbps.
- Στην Γαλλία, την Πολωνία και την Ισπανία, ο πάροχος Orange είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία σημαντικών οπτικών δικτύων. Παρόλο που εστιάζει κυρίως στην αρχιτεκτονική FTTH για την παροχή σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης (fixed broadband access), χρησιμοποιεί το G.fast σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή ή πρακτική η τοποθέτηση και χρήση οπτικών ινών είτε πάνω από συνεστραμμένα χάλκινα ζεύγη είτε πάνω από ομοαξονικά καλώδια. Στα δύο σενάρια εφαρμογής του G.fast η οπτική ίνα φθάνει είτε μέχρι το σημείο διανομής (στις περιπτώσεις που είναι επιτρεπτή η χρήση του vectoring) είτε μέχρι την πόρτα του συνδρομητή (όταν δεν είναι επιτρεπτή η χρήση του vectoring). Στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιείται η επιλογή μονής θύρας η οποία μάλιστα δύναται και να τροφοδοτείται ανάστροφα.
- Ο βρετανικός πάροχος BT αναπτύσσει μέσω της θυγατρικής του Openreach, τόσο λύσεις πρόσβασης μέσω οπτικών ινών, όσο και μέσω του G.fast. Στόχος είναι η εφαρμογή του FTTP σε 2 εκατομμύρια και η εφαρμογή του G.fast σε 10 εκατομμύρια σπίτια μέχρι το 2020. Η έμφαση στο G.fast έχει επιτρέψει την επίτευξη ταχυτήτων 330Mbps μέσω της υπάρχοντος δικτύου FTTC, με μία αναβάθμιση των καμπινών. Παρόλο που ο πρωταρχικός στόχος είναι η ανάπτυξη δικτύων FTTH, ο χαμηλός αριθμός συνδρομητών στον οποίο στοχεύουν οφείλεται (όπως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων) στην ανάγκη για δημιουργία των κατάλληλων υποδομών. Μέσω του G.fast δίνεται η δυνατότητα να μπει ο πάροχος στην αγορά μέσω της υπάρχουσας υποδομής, συμπληρωματικά προς το μακροπρόθεσμο σχέδιο που έχει τεθεί.

- Ο ελβετικός πάροχος *Swisscom* ξεκίνησε τις δοκιμές της νέας τεχνολογίας σε πελάτες το 2015, ενώ στο τέλος του 2016 ήταν ο πρώτος πάροχος τηλεπικοινωνιών στην Ευρώπη που έθεσε κανονικά σε εφαρμογή το G.fast σε συνδυασμό με πρόγραμμα επέκτασης. Ο τελικός στόχος του παρόχου είναι να προσφέρει στο 90% των σπιτιών και των επιχειρήσεων υπηρεσίες πολύ υψηλών ταχυτήτων, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους. Ένας από αυτούς είναι και το G.fast, το οποίο έχει δεσμευθεί να επεκτείνει, συμπληρωματικά προς την ανάπτυξη του δικτύου FTTH.
- Η Post-Luxemburg προσφέρει στο 60% των κατοικιών πρόσβαση στο δίκτυο της τάξης των gigabit μέσω οπτικών ινών. Ωστόσο αυτή δεν είναι εφικτή για τους κατοίκους των πολυκατοικιών, καθώς πολλές από αυτές είναι πολύ παλαιές καθιστώντας αδύνατη την εκ νέου καλωδίωση όλων των διαμερισμάτων με οπτικές ίνες. Η Post-Luxemburg ξεκίνησε την ανάπτυξη του G.fast το 2018 σε πολυκατοικίες, ως μέρος του σχεδίου της ευρείας εφαρμογής των οπτικών ινών. Ως αποτέλεσμα, μόλις μία πολυκατοικία συνδέεται μέσω FTTB οι κάτοικοι μπορούν να επωφεληθούν από τις υψηλές ταχύτητες που προσφέρει το G.fast πάνω από την υπάρχουσα καλωδίωση. Και σε αυτή την περίπτωση το G.fast χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο βήμα της επέκτασης του δικτύου των οπτικών ινών.
- Ο γερμανικός πάροχος Deutsche Telecom έχει κάνει πιλοτικά έργα σε Ελλάδα, Κροατία και Γερμανία, ωστόσο εστιάζει στην ανάπτυξη του δικτύου FTTH. [18]
- Στην Ελλάδα, μέσω της Wind, από τον Ιούλιο του 2017, έχει τεθεί σε εφαρμογή δίκτυο οπτικών ινών στην Καλαμάτα, μέσω του οποίου παρέχεται το G.fast μαζί με άλλες τεχνολογίες όπως το Supervectoring.

3.7 Βιβλιογραφία

- [1] Ram Krishna, DDG (FA), Sidh Kumar, Dir (FA), D. L. Mense, ADG (FA-I) & Avadhesh Singh, ADG (FA-II) «Study Paper On G.fast»
- [2] Per Ödling, Thomas Magesacher, Stefan Höst, Per Ola Börjesson, Miguel Berg, Enrique Areizaga, «The Fourth Generation Broadband Concept», IEEE Communications Magazine, 2009
- [3] XENA NETWORKS, White Paper, «G.fast Testing the new DSL technology that boosts speed over copper local loops»
- [4] <https://www.electronicdesign.com/what-s-difference-between/what-s-difference-between-epon-and-gpon-optical-fiber-networks>
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/G.fast>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_optical_network
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/G.984>
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/10G-PON>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet_in_the_first_mile#Passive_optical_network
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/10G-EPON>
- [11] Michael Timmers, Mamoun Guenach, Carl Nuzman, and Jochen Maes, «G.fast: Evolving the Copper Access Network», IEEE Communications Magazine, 2013
- [12] ITU Presentation, «Overview of ITU-T SG15 Q4 xDSL and G.(m)gfast», Slides prepared by Frank Van der Putten
- [13] ITU-T Recommendation G.9701, Amendment 5 (Physical Layer Specification of g.fast)
- [14] ITU-T Recommendation G.9700, Amendment 2 (Power spectral density specification)
- [15] Παναγιώτης Γ. Κωπτής, Παντελής-Δανιήλ Μ. Αράπογλου, «Ασύρματες επικοινωνίες», Εκδόσεις Τζιόλα, 2014
- [16] Rainer Strobel, Wolfgang Utschick, «COEXISTENCE OF G.FAST AND VDSL IN FTTP AND FTTC DEPLOYMENTS», IEEE 2015
- [17] ETSI TR 102 629 V2.1.2 (2011-03), Technical Report, «Access, Terminals, Transmission and Multiplexing (ATM); Reverse Power Feed for Remote Nodes»
- [18] Broadband Forum, «Market Update: Service Providers Leveraging Gfast to Complement Fiber Optic Infrastructure» (MU-449)
- [19] https://www.arris.com/globalassets/resources/white-papers/arris_comparing_ieeee_pon_and_fsan_wp.pdf
- [20] <https://www.eleftheriaonline.gr/local/oikonomia/epixeiriseis/item/125476-me-to-neo-diktyo-optikon-inon-tis-wind-i-kalamata-proti-grigori-poli-stin-ellada>

4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ G.fast ΒΑΣΕΙ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ G.9701 ΤΗΣ ITU

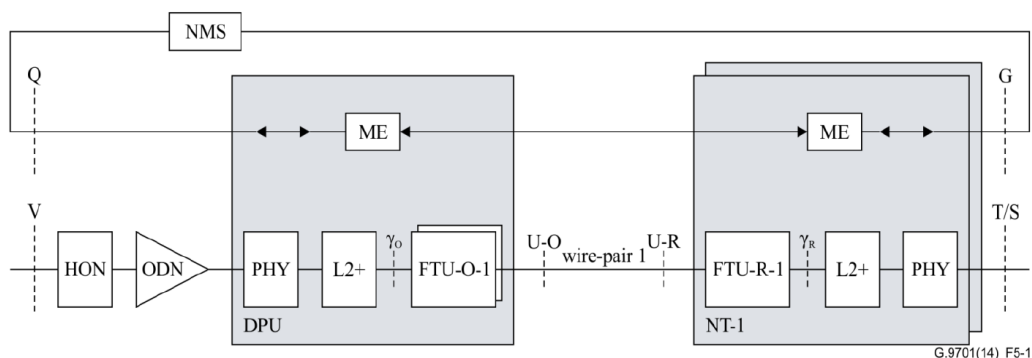
4.1 Μοντέλο αναφοράς συστήματος

Η σύσταση της ITU G.9701 παρέχει τις απαραίτητες προδιαγραφές που αφορούν τη διεπαφή (interface) μεταξύ δύο μονάδων πομποδεκτών του G.fast (FTUs) όπως αυτές εφαρμόζονται στο σημείο αναφοράς¹⁹ U. Ο πομποδέκτης FTU-O βρίσκεται εντός μία μονάδας διανομής (DPU) στην πλευρά του δικτύου του συνεστραμμένου ζεύγους, ενώ ο πομποδέκτης FTU-R βρίσκεται μέσα στον εξοπλισμό τερματισμού δικτύου (Network Termination - NT) στην πλευρά του χώρου του συνδρομητή. Τα δύο σημεία αναφοράς είναι τα U-O και U-R.

Συνήθως, οι εφαρμογές της τεχνολογίας G.fast που συμμορφώνονται με αυτή τη σύσταση αναπτύσσονται σε τοπολογία FTTdp. Το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς αυτής της τοπολογίας παρουσιάζεται στο Σχ.4.1. Η κίνηση της άνω ζεύξης από όλες τις DPU συγκεντρώνεται από το οπτικό δίκτυο διανομής (Optical Distribution Network - ODN) και έναν κόμβο ανώτερης τάξης (Higher Order Node - HON) στο σημείο αναφοράς V. Αντίστροφα, η κίνηση κάτω ζεύξης στο σημείο αναφοράς V, διανέμεται σε πολλαπλά DPU μέσω των HON και ODN. Οι λειτουργίες των μπλοκ HON και ODN δεν απασχολούν το παρόν πρότυπο της ITU.

Κάθε DPU βρίσκεται σε ένα σημείο διανομής (DP) και περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες πομποδεκτών (FTU-O), κάθε μία από τις οποίες συνδέεται σε μοναδικό εξοπλισμό τερματισμού δικτύου (NT), στον οποίο περιέχεται η ομότιμη μονάδα FTU-R του FTU-O.

Η διαχείριση μίας DPU εκτελείται από το σύστημα διαχείρισης δικτύου (Network Management System - NMS), το οποίο διακινεί τις πληροφορίες διαχείρισης στο διαχειριστικό φορέα (Management Entity - ME) κάθε DPU μέσω του σημείου αναφοράς Q. Το σύστημα NMS ενδέχεται να παρακολουθεί τις ομότιμες FTU-R μέσω του αντίστοιχου φορέα διαχείρισης του NT μέσω του σημείου αναφοράς G.



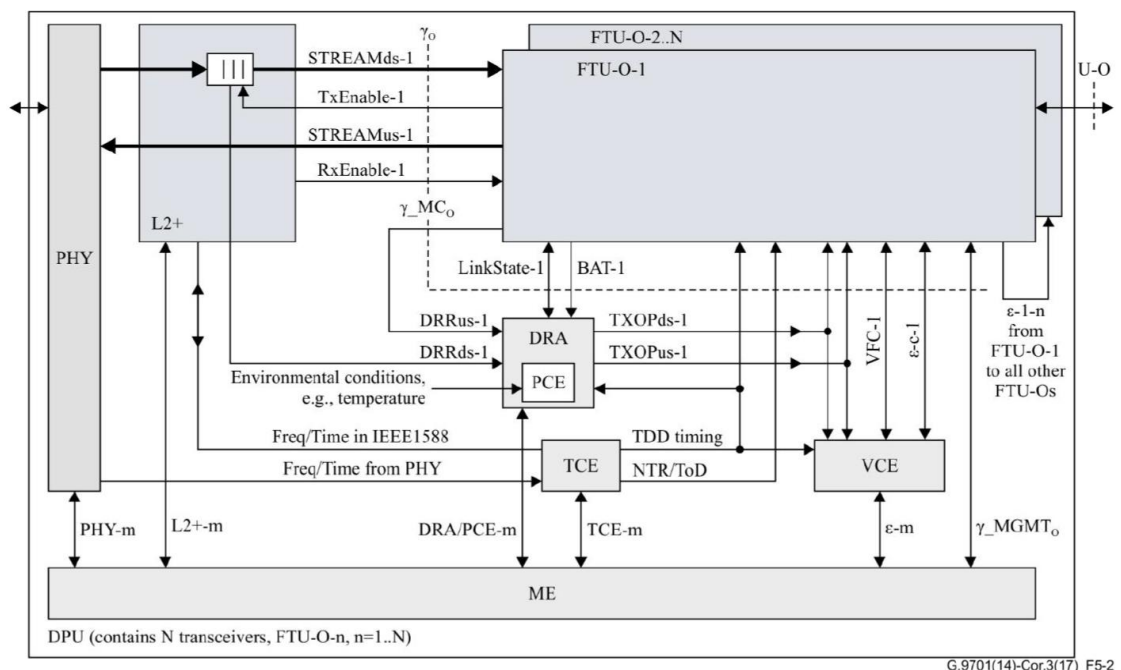
Σχήμα 4.1: Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας FTTdp

¹⁹ Το σημείο αναφοράς αποτελείται από μία ομάδα διεπαφών μεταξύ δύο λειτουργικών μπλοκ και μέσω αυτού γίνεται η ροή της πληροφορίας από το ένα μπλοκ στο άλλο. Ένα σημείο αναφοράς αποτελείται από μία ή περισσότερες λογικές διεπαφές μεταφοράς πληροφοριών και από μία ή περισσότερες φυσικές διεπαφές μεταφοράς σημάτων.

Τα μπλοκ PHY αναπαριστούν το φυσικό στρώμα (Physical Layer) του DPU με κατεύθυνση προς το δίκτυο πρόσβασης και το φυσικό στρώμα του NT με κατεύθυνση προς το χώρο του συνδρομητή. Τα L2+ μπλοκ αναπαριστούν λειτουργίες ανώτερων επιπέδων. Τα δύο αυτά είδη μπλοκ παρουσιάζονται στη σύσταση G.9701 μόνο για λόγους πληρότητας της ροής της πληροφορίας.

Η φυσική διεπαφή της DPU με το χάλκινο ζεύγος καλωδίων αναπαρίσταται μέσω του FTU-O, ενώ η φυσική διεπαφή του NT με το χάλκινο ζεύγος καλωδίων αναπαρίσταται μέσω του FTU-R. Μία DPU περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους πομποδέκτες σύμμορφους με τη σύσταση G.9701 (FTU-O-1 συμβολίζει τον πρώτο πομποδέκτη και FTU-R-1 συμβολίζει τον ομότιμο πομποδέκτη στον τερματισμό του δικτύου στο Σχ.4.1).

Στο Σχ.4.2 φαίνεται το λειτουργικό μοντέλο μίας DPU που περιέχει N πομποδέκτες και παρουσιάζεται η ροή της πληροφορίας. Η θεμελιώδης αρχή του συστήματος είναι η σύγχρονη και συντονισμένη μετάδοση και λήψη σημάτων από τα N χάλκινα ζεύγη που συνδέονται στο ίδιο DPU. Ως εκ τούτου, τα διάφορα σήματα μπορεί να αναπαρίστανται με τη μορφή διανυσμάτων (παχιές γραμμές Σχ.4.2) των οποίων οι συνιστώσες αντιπροσωπεύουν τα σήματα των αντίστοιχων ζευξέων.



Σχήμα 4.2: Μοντέλο αναφοράς DPU

Ένα Vectored Group (VG) αποτελείται από μία ομάδα γραμμών στις οποίες είναι δυνατός ο συντονισμός της μετάδοσης της πληροφορίας από τη DPU μέσω της προ-κωδικοποίησης (precoding: downstream vectoring) ή/και είναι δυνατός ο συντονισμός της λήψης της πληροφορίας στη DPU μέσω της μετα-ακύρωσης (post-cancellation: upstream vectoring). Ανάλογα με το είδος της ρύθμισης μπορεί να είναι ενεργοποιημένη καμία, μία από τις δύο ή και οι δύο λειτουργίες.

Για κάθε FTU-O εντός ενός VG η ροή της πληροφορίας του επιπέδου δεδομένων (data plane) παρουσιάζεται μέσω του διανύσματος STREAM_{ds-n} για την κάτω ζεύξη και μέσω του διανύσματος STREAM_{us-n} για την άνω ζεύξη, όπου το n δηλώνει το n-οστό (από τα N στο σύνολο) πομποδέκτη. Η FTU-O ενδέχεται να ελέγχει τη ροή της πληροφορίας της κάτω ζεύξης (μέσω του σήματος TX Enable-n), ενώ η οντότητα L2+ να ελέγχει τη ροή της πληροφορίας της άνω ζεύξης (μέσω του σήματος RX Enable-n). Ο φορέας διαχείρισης (ME) διαβιβάζει τις πληροφορίες ελέγχου μέσω της διεπαφής γ_MGMT_o σε κάθε μία από τις FTU-O.

Μεταξύ των λειτουργιών μίας μονάδας διανομής (DPU) περιλαμβάνονται:

- Μονάδα ελέγχου συγχρονισμού (Timing Control Entity - TCE)
- Μονάδα ελέγχου vectoring (Vectoring Control Entity - VCE)
- Δυναμική εκχώρηση πόρων (Dynamic Resource Allocation - DRA) που περιλαμβάνει μονάδα ελέγχου ισχύος (Power Control Entity - PCE)

Η μονάδα ελέγχου συγχρονισμού (TCE) συντονίζει τη μετάδοση και τη λήψη όλων των σημάτων μέσω της τεχνικής της σύγχρονης αμφιδρόμησης διαίρεσης χρόνου (Synchronous Time Division Duplexing - STDD) και εφαρμόζεται εντός του VG.

Στο σημείο αναφοράς U-O τα σύμβολα:

- (i) που μεταδίδονται από τις N FTU-Os (ροή κάτω ζεύξης),
- (ii) που μεταδίδονται από τα N FTU-Rs (ροή άνω ζεύξης),
- (iii) συγχρονισμού που μεταδίδονται από τις N FTU-Os (ροή κάτω ζεύξης) και
- (iv) συγχρονισμού που μεταδίδονται από τα N FTU-Rs (ροή άνω ζεύξης)

αντιστοιχίζονται στα χάλκινα καλώδια του VG. Ο συντονισμός αυτός φαίνεται στο Σχ.4.2 από τον ίδιο χρονισμό (TDD timing) που μεταβιβάζεται από την μονάδα ελέγχου συγχρονισμού σε όλα τα FTU-Os. Επιπλέον, η μονάδα ελέγχου συγχρονισμού είναι υπεύθυνη για τη διαβίβαση των παραμέτρων NTR και ToD σε όλες τις FTU-Os. Τέλος, οι πληροφορίες διαχείρισης μεταβιβάζονται από το φορέα διαχείρισης στη VCE μέσω της διεπαφής TCE-m.

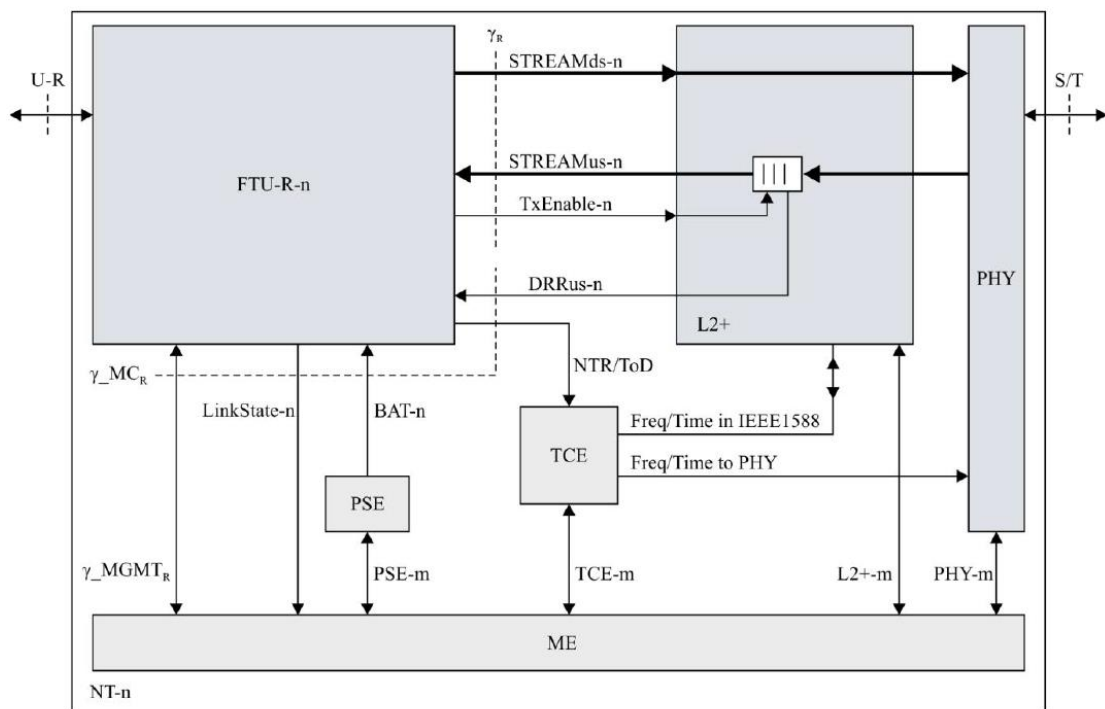
Η μονάδα ελέγχου vectoring (VCE) συντονίζει την ακύρωση της διαφωνίας (crosstalk cancellation) εντός ενός VG. Ο συντονισμός αυτός καθίσταται εφικτός μέσω της επικοινωνίας μεταξύ όλων των FTU-Os. Για παράδειγμα, η διεπαφή ε-1-n δηλώνει τη διεπαφή μεταξύ της FTU-O της γραμμής 1 και όλων των υπολοίπων FTU-Os (n=2...N). Οι πληροφορίες συντονισμού που ανταλλάσσονται μεταξύ της FTU-O-n1 και της FTU-O-n2 διέρχονται από τη διεπαφή ε-n1-n2. Κάθε VCE ελέγχει μία DPU και ελέγχει τις FTU-O-n μέσω της διεπαφής ε-c-n.

Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο κανάλι ανατροφοδότησης VFC-n (Vectoring Feedback Channel) επιτρέπουν στο VCE να καθορίζει τους συντελεστές προ-κωδικοποίησης (precoder coefficients) που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή του vectoring κάτω ζεύξης. Οι ανωτέρω πληροφορίες μεταβιβάζονται από τις FTU-R μέσω της διεπαφής U στην FTU-O και μετά μέσω του καναλιού ανατροφοδότησης στη VCE. Εντός της DPU, ο φορέας διαχείρισης διαβιβάζει τις πληροφορίες διαχείρισης (μέσω της διεπαφής ε-m) στη VCE.

Η δυναμική εκχώρηση πόρων (DRA) συντονίζει τις ευκαιρίες μετάδοσης²⁰ άνω και κάτω ζεύξης εντός ενός VG. Η κατανομή των ευκαιριών μπορεί να είναι στατική ή δυναμική. Η DRA λαμβάνει αναφορές (Dynamic Resource Reports - DRR) από το λειτουργικό μπλοκ L2+ για κάθε μία από τις γραμμές εντός του VG (DRRus, DRRds για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα). Οι αναφορές διοχετεύονται από το NT στη DRA μέσω των σημείων αναφοράς γ_R , U-R, U-O και γ_O . Εντός της DPU, ο φορέας διαχείρισης διαβιβάζει στη DRA μέσω της διεπαφής DRA-m πληροφορίες διαχείρισης, οι οποίες θέτουν περιορισμούς στην εκχώρηση των ευκαιριών μετάδοσης για την άνω και κάτω ζεύξη ανά συνδρομητική γραμμή εντός του VG.

Η μονάδα ελέγχου ισχύος (PCE) έχει τη δυνατότητα να επιβάλλει περαιτέρω περιορισμούς στην κατανομή των ευκαιριών μετάδοσης για την άνω και κάτω ζεύξη, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες «κίνησης» κάθε γραμμής αλλά και περιβαλλοντικές πληροφορίες σχετικές με τη διάχυση ισχύος. Μέσω της διεπαφής PCE-m διαβιβάζονται οι απαραίτητες αυτές πληροφορίες, βάσει των οποίων το PCE παρακολουθεί την κατανάλωση ισχύος της DPU και επιβάλλει τους κατάλληλους περιορισμούς.

Το μοντέλο αναφοράς του τερματισμού δικτύου είναι παρόμοιο σε μορφή και λειτουργία με αυτό της μονάδας διανομής και παρουσιάζεται στο Σχ.4.3.



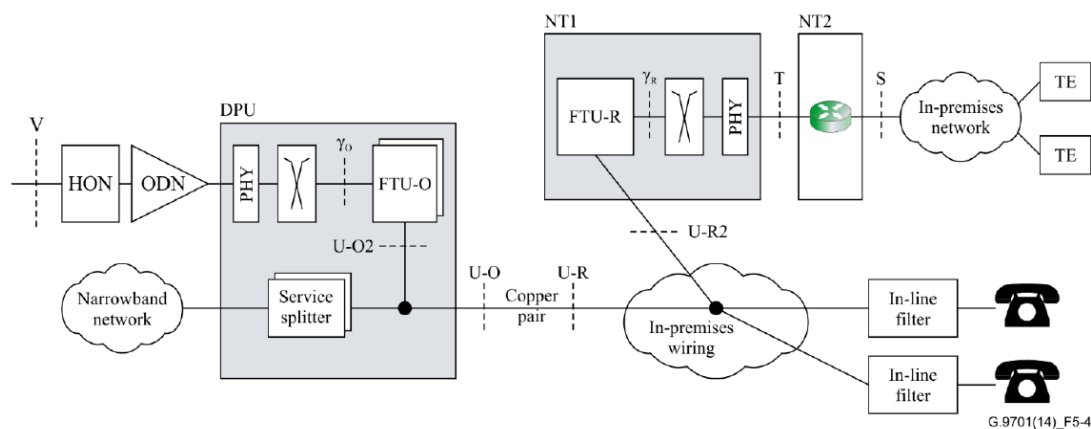
Σχήμα 4.3: Μοντέλο αναφοράς NT

²⁰ Ευκαιρία μετάδοσης (transmission opportunity) είναι η ομάδα των θέσεων συμβόλων σε ένα λογικό πλαίσιο (Ev.4.4.2.1) εκτός από τις θέσεις συμβόλων συγχρονισμού όπου επιτρέπεται η μετάδοση δεδομένων πληροφορίας. Σε άλλη περίπτωση, μία FTU μπορεί να μεταδώσει μόνο ήσυχα σύμβολα.

4.2 Μοντέλα αναφοράς εφαρμογής

Όπως αναφέρθηκε στην Εν.4.1, οι εφαρμογές της τεχνολογίας του G.fast συνήθως αναπτύσσονται σε τοπολογία FTTdp, η οποία μπορεί να είναι περαιτέρω επέκταση της τοπολογίας FTTx (πχ. FTTC, FTTB, FTTc) όπου η ίνα εισχωρεί βαθύτερα στο δίκτυο, ή μπορεί να είναι μία τοπολογία FTTH όπου όμως γίνεται χρήση χαλκού εντός του χώρου του συνδρομητή εφόσον δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση οπτικών ινών. Το οπτικό δίκτυο διανομής που τροφοδοτεί τα DPUs μπορεί να βασίζεται σε τεχνολογίες PON ή PtP.

Μία από τις βασικές πτυχές της τοπολογίας FTTdp είναι η δυνατότητα του πελάτη να εγκαθιστά μόνος του τον εξοπλισμό. Στο Σχ.4.4 παρουσιάζεται το μοντέλο αναφοράς μέσω του οποίου παρέχεται αυτή η δυνατότητα, όπου χρησιμοποιείται το POTS. Εναλλακτικά, για την παροχή τηλεφωνικής υπηρεσίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ISDN.

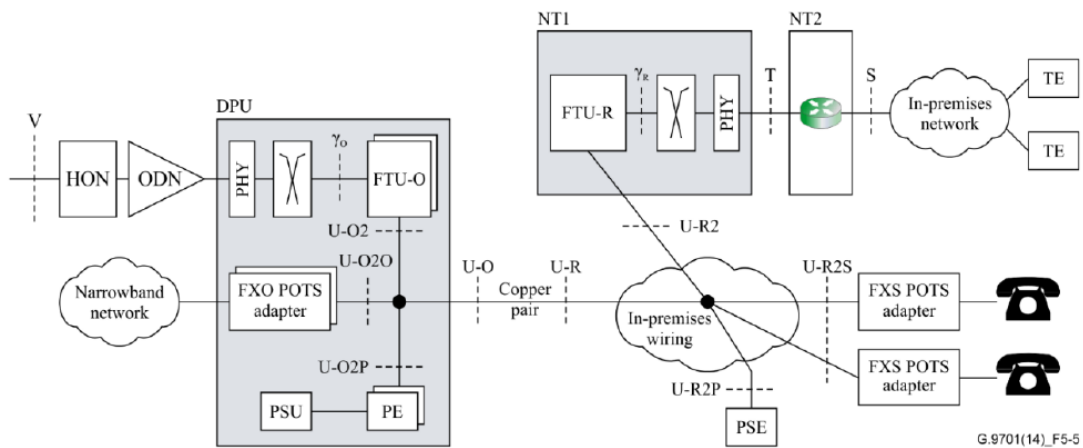


Σχήμα 4.4: Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας εφαρμογής FTTdp με POTS

Καθώς οι DPUs πλησιάζουν στο χώρο του συνδρομητή, ο αριθμός των θυρών που περιέχουν γίνεται μικρότερος και ο αριθμός των DPUs που εγκαθίστανται αυξάνει. Συνήθως, τα σημεία διανομής βρίσκονται σε τοποθεσίες όπου δεν είναι δυνατή η ενεργειακή τροφοδότησή τους. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιείται η τεχνική της ανάστροφης τροφοδότησης (Εν.3.2.4). Η DPU τροφοδοτείται από το συνδρομητή αξιοποιώντας το ίδιο χάλκινο καλώδιο που χρησιμοποιείται για την παροχή των υπηρεσιών δεδομένων. Το μοντέλο αναφοράς που περιλαμβάνει ανάστροφη τροφοδότηση παρουσιάζεται στο Σχ.4.5.

Η ισχύς εγχέεται στο χάλκινο καλώδιο μέσω του εξοπλισμού παροχής ισχύος (Power Source Equipment - PSE) που βρίσκεται εντός του χώρου του συνδρομητή, και αντλείται από τον εξαγωγέα ισχύος (Power Extractor - PE) που βρίσκεται εντός της DPU. Η ισχύς αντλείται από κάθε ενεργή θύρα και συνδυάζεται στη μονάδα παροχής ισχύος (Power Supply Unit - PSU). Η PSE και το NT ενδέχεται να είναι τοποθετημένα στο ίδιο φυσικό κουτί.

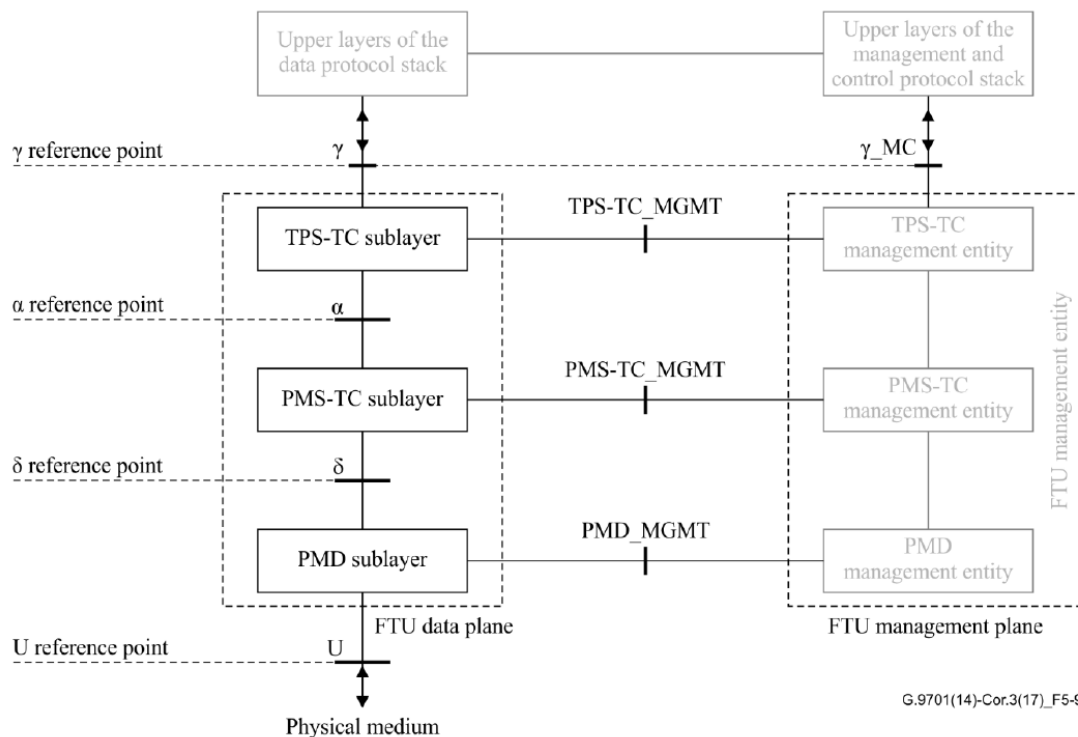
Η ανάστροφη τροφοδότηση συνεπάγεται την ύπαρξη DC συνιστώσας ρεύματος. Εξ αυτού συνάγεται ότι, για να μπορεί η υπηρεσία POTS να μοιράζεται το ίδιο φυσικό καλώδιο με την υπηρεσία δεδομένων, πρέπει να γίνει χρήση ειδικών προσαρμογέων, οι οποίοι παρέχουν διαφορετικό τρόπο σηματοδότησης στο σημείο αναφοράς U, ισοδύναμο με τη σηματοδότηση POTS.



Σχήμα 4.5: Μοντέλο αναφοράς τοπολογίας εφαρμογής FTTH με POTS και RPF
 Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και άλλα μοντέλα αναφοράς εφαρμογής της παρούσας τοπολογίας, τα οποία εξηγούνται αναλυτικά στη σύσταση G.9701 της ITU, αλλά η ανάλυσή τους δεν εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

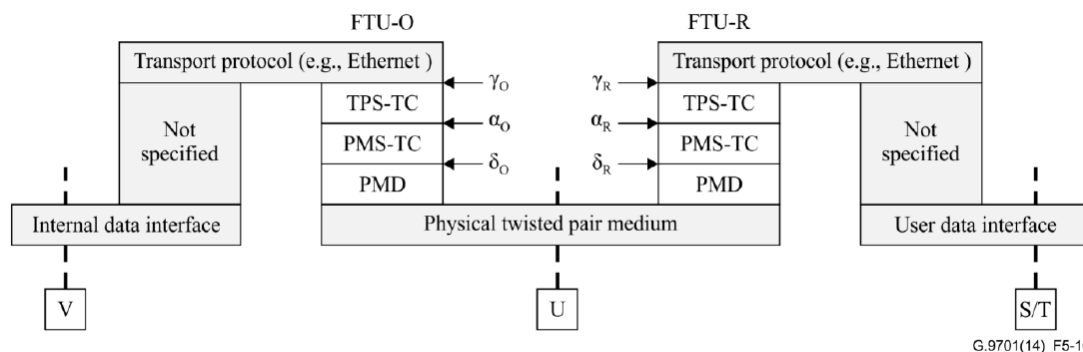
4.3 Μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου FTU

Η σύσταση G.9701 της ITU περιορίζεται στην ανάλυση των λειτουργιών των μονάδων FTU-O και των FTU-R. Το μοντέλο αναφοράς του FTU πρωτοκόλλου που παρουσιάζεται στο Σχ.4.6 και αναλύεται στην παρούσα ενότητα περιγράφει τη λειτουργία των FTU-O και FTU-R και αφορά τα πρωτόκολλα των υποστρωμάτων που βρίσκονται κάτω από το σημείο αναφοράς γ . Το μοντέλο αναφοράς περιλαμβάνει τα επίπεδα δεδομένων και διαχείρισης των υποστρωμάτων TPS-TC, PMS-TC και PMD. Όσα σημεία αναφοράς και υποεπίπεδα εμφανίζονται με μαύρο χρώμα ορίζονται στη σύσταση G.9701 ενώ όσα εμφανίζονται με γκρι χρώμα δεν αναλύονται. Στον Πιν.4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των σημείων αναφοράς.



Σχήμα 4.6: Μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλου FTU

Στο Σχ.4.7 παρουσιάζεται το μοντέλο αναφοράς του πρωτοκόλλου μόνο για το επίπεδο των δεδομένων και αντιστοιχεί στο μοντέλο αναφοράς που παρουσιάστηκε στο Σχ.4.6.



Σχήμα 4.7: Μοντέλο αναφοράς του πρωτοκόλλου FTU του επιπέδου δεδομένων

Σημείο Αναφοράς (Σ.Α.)	Κατηγορία	Συνοπτική περιγραφή ροής πληροφορίας	Αναφορά στο G.9701
γ	Πληροφορίες δεδομένων, αμφίδρομη ροή, λογικό Σ.Α.	Μονάδες δεδομένων χρήση των εφαρμοζόμενων πρωτοκόλλων, σηματοδότηση ροής δεδομένων και ελέγχου, δείκτες έναρξης/παύσης δεδομένων κ.λπ.	Ev.8.1.1
α	Πληροφορίες δεδομένων, αμφίδρομη ροή, λογικό Σ.Α.	Παράμετροι της ροής δεδομένων που εισέρχεται στο PMS-TC από το TPS-TC και της ροής δεδομένων που προωθείται στο TPS-TC από το PMS-TC	Ev.8.1.2
δ	Πληροφορίες δεδομένων, αμφίδρομη ροή, λογικό Σ.Α.	Παράμετροι της ροής δεδομένων που εισέρχεται στο PMD από το PMS-TC και της ροής δεδομένων που προωθείται στο PMS-TC από το PMD	Ev.9.1.1
U	Πληροφορίες δεδομένων, αμφίδρομη ροή, φυσικό Σ.Α.	Παράμετροι του φυσικού σήματος στη γραμμή	Ev.10.1.1
γ_MC	Πληροφορίες διαχείρισης/ελέγχου, αμφίδρομη ροή, λογικό/λειτουργικό Σ.Α.	Παράμετροι διαχείρισης και ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ της FME και των λειτουργιών ανώτερων επιπέδων DRA, TCE, ME και VCE.	Ev.8.1.1, Ev.10.3, Ev.11.1.1
TPS-TC_MGM T	Πληροφορίες διαχείρισης/ελέγχου, αμφίδρομη ροή, λογικό/λειτουργικό Σ.Α.	Παράμετροι διαχείρισης και ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ του TPS-TC και της FME, που περιλαμβάνουν παραμέτρους του TPS-TC και του μεγέθους της DTU.	Ev.8.1.3
PMS-TC_MGM T	Πληροφορίες διαχείρισης/ελέγχου, αμφίδρομη ροή, λογικό/λειτουργικό Σ.Α.	Παράμετροι διαχείρισης και ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ του PMS-TC και της FME, που περιλαμβάνουν παραμέτρους σχετικές με το FEC, την πλαισίωση και την πλεονάζουσα πληροφορία των πλαισίων PMS-TC	Ev.9.1.2
PMD_MGMT	Πληροφορίες διαχείρισης/ελέγχου, αμφίδρομη ροή, λογικό/λειτουργικό Σ.Α.	Παράμετροι διαχείρισης και ελέγχου που ανταλλάσσονται μεταξύ του PMD και της FME, που περιλαμβάνουν παραμέτρους που προσδιορίζουν το bit loading, την προσαρμογή κέρδους, τη διαμόρφωση της PSD, το χρονισμό του TDD και το vectoring.	Ev.10.1.2

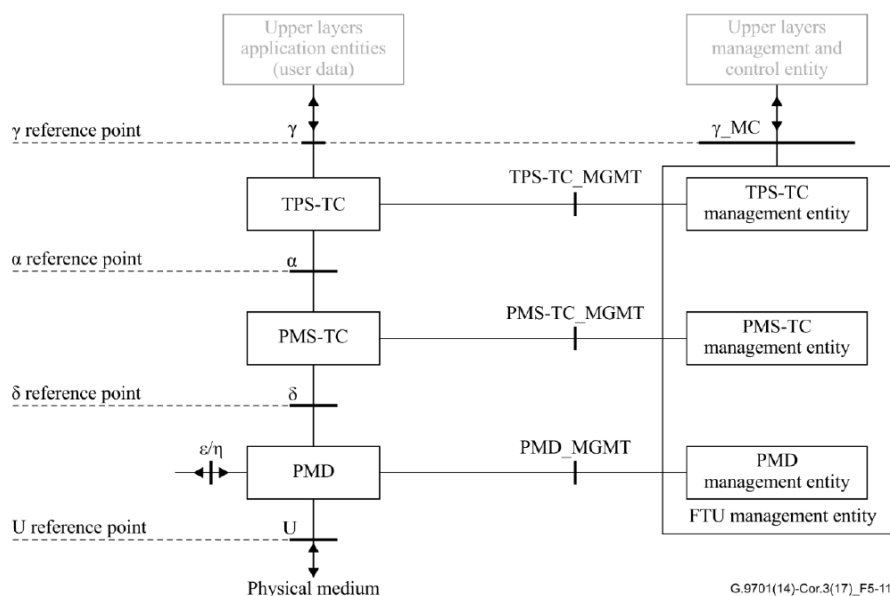
Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά σημείων αναφοράς του FTU

4.4 Λειτουργικό μοντέλο FTU

Το λειτουργικό μοντέλο της FTU παρουσιάζεται στο Σχ.4.8 και περιέχει τα λειτουργικά μπλοκ και σημεία αναφοράς των μονάδων FTU-O και FTU-R που ορίζονται στη σύσταση G.9701 της ITU. Σε αυτό το μοντέλο, απεικονίζονται οι βασικότερες λειτουργίες μίας FTU και περιέχονται δύο τμήματα: το τμήμα που δεν εξαρτάται από την εφαρμογή (application invariant part) και το τμήμα που εξαρτάται από την εφαρμογή (application specific part). Το τμήμα που είναι ανεξάρτητο της εφαρμογής περιλαμβάνει τα υποστρώματα PMS-TC (Physical Media Specific – Transmission Convergence) και PMD (Physical Media Dependent) που βρίσκονται μεταξύ των σημείων αναφοράς α και U και περιγράφονται αναλυτικά στις ενότητες 9 και 10 της σύστασης. Το τμήμα που είναι εξαρτώμενο από την εφαρμογή περιορίζεται στο υποστρώμα TPS-TC (Transport Protocol Specific – Transmission Convergence) και βρίσκεται μεταξύ των σημείων αναφοράς γ και α. Το σημείο αναφοράς γ είναι η διεπαφή του FTU με την εφαρμογή. Το υπόστρωμα²¹ αυτό παρουσιάζεται στην ενότητα 8 της σύστασης.

Η μονάδα διαχείρισης της FTU (FTU Management Entity - FME) περιλαμβάνει όλες τις σχετικές λειτουργίες διαχείρισης συμπεριλαμβανομένων αυτών που σχετίζονται με τα υποστρώματα PMS-TC, PMD και TPS-TC. Οι παράμετροι διαχείρισης ανταλλάσσονται μεταξύ της FME και του φορέα διαχείρισης των ανώτερων στρωμάτων μέσω της διεπαφής γ_MC, μέσω της οποίας γίνεται επιπλέον η επικοινωνία μεταξύ MFE και TCE, DRA, VCE στη FTU-O και, αντίστοιχα, η επικοινωνία μεταξύ MFE και PSE, TCE, DRRus στην FTU-R.

Οι οντότητες των ανώτερων στρωμάτων που φαίνονται στο Σχ.4.8 αντιστοιχούν στα μπλοκ L2+ των Σχ.4.2 (για την FTU-O) και Σχ.4.3 (για την FTU-R). Παρομοίως, η οντότητα διαχείρισης και ελέγχου των ανώτερων στρωμάτων αντιστοιχεί στις λειτουργίες ME, DRA, TCE και VCE για την FTU-O (Σχ.4.2) και στις λειτουργίες PSE, TCE, DRR για την FTU-R (Σχ.4.3).



Σχήμα 4.8: Λειτουργικό μοντέλο FTU

²¹και περιλαμβάνει μία συνάρτηση TPS-TC που παρουσιάζει τα πακέτα δεδομένων των αντίστοιχων πρωτοκόλλων εφαρμογής στο ενιαίο και ανεξάρτητο της εφαρμογής σημείο αναφοράς α

4.4.1 Υπόστρωμα TPS-TC

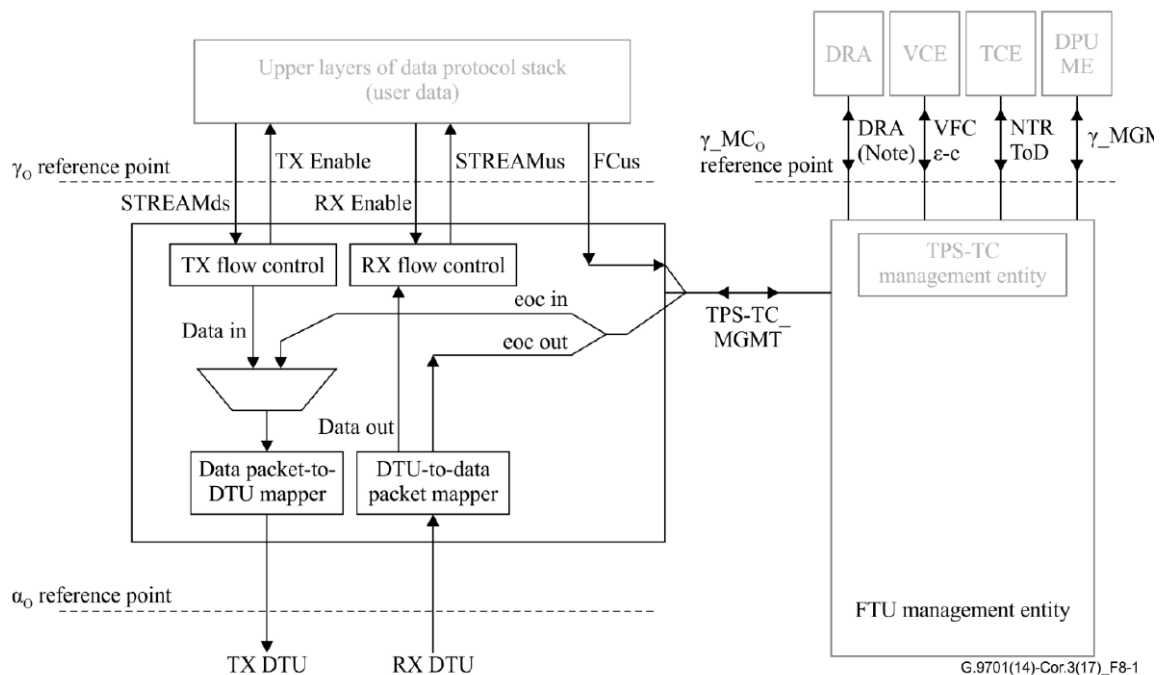
4.4.1.1 Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς

Το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς του υποστρώματος TPS-TC της FTU-O παρουσιάζεται στο Σχ.4.9. Στην κατεύθυνση μετάδοσης δεδομένων κάτω ζεύξης (από το σημείο αναφοράς γ_0 στο α_0), τα πακέτα δεδομένων (STREAMds) διέρχονται από το σημείο αναφοράς γ_0 , ενθυλακώνονται στις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (Data Transfer Unit - DTU) και περνάνε στο υπόστρωμα PMS-TC μέσω του σημείου αναφοράς α_0 . Μέσω της συνάρτησης TX flow control αποστέλλεται στα ανώτερα στρώματα (L2+ blocks) υπόδειξη μέσω της παραμέτρου TX Enable που αφορά τη δυνατότητα ή μη του υποστρώματος να λάβει πακέτα δεδομένων. Ακολουθώντας την ίδια λογική, στην αντίστροφη κατεύθυνση μετάδοσης των δεδομένων (από το σημείο αναφοράς α_0 στο γ_0) εξάγονται από τις μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTU) τα πακέτα δεδομένων (STREAMus) και διοχετεύονται στα ανώτερα επίπεδα (L2+ blocks) μέσω του σημείου αναφοράς γ_0 . Μέσω της συνάρτησης RX flow control λαμβάνεται από τα ανώτερα στρώματα (L2+ blocks) υπόδειξη μέσω της παραμέτρου RX Enable για τη δυνατότητα ή μη του ανώτερου στρώματος να λάβει πακέτα δεδομένων. Με την ίδια λογική μπορεί να εξηγηθεί το αντίστοιχο μοντέλο αναφοράς του FTU-R. Η μονάδα διαχείρισης της FTU ελέγχει το υπόστρωμα TPS-TC μέσω παραμέτρων οι οποίες διαβιβάζονται αλλά και ανακτώνται μέσω της διεπαφής TPS-TC_MGMT.

Το υπόστρωμα TPS-TC διευκολύνει τη μετάδοση πακέτων eoc (embedded operations channel) τα οποία περιέχουν ένα ή περισσότερα μηνύματα eoc και μεταφέρονται διαφανώς, εκτός από την περίπτωση όπου έχουν συμβεί λάθη που δεν είναι δυνατό να διορθωθούν στη γραμμή. Η μονάδα διαχείρισης υποβάλλει τα πακέτα αυτά μέσω της διεπαφής TPS-TC_MGMT με τη σειρά που υποδεικνύεται από την προτεραιότητά τους. Επιπλέον, οι παράμετροι NTR και ToD διαβιβάζονται μέσω των μηνυμάτων eoc. Τέλος, οι παράμετροι σχετικές με το DRA διαβιβάζονται μέσω eoc (αλλά και RMC) μηνυμάτων.

Τα μεταδιδόμενα eoc πακέτα πολυπλέκονται με τα εισερχόμενα πακέτα δεδομένων με συγκεκριμένο τρόπο, ενσωματώνονται στις DTU και μεταφέρονται στο TPS-TC υπόστρωμα της ομότιμης FTU. Κατά την αποπολύπλεξη των eoc πακέτων, αξιοποιούνται οι σημαίες (flags) που φέρουν τα πακέτα για να ξεχωρίζουν από τα πακέτα δεδομένων και, στη συνέχεια, υποβάλλονται στη διαχειριστική οντότητα της FTU (FME) μέσω της διεπαφής TPS-TC_MGMT.

Όταν είναι διαθέσιμα τόσο πακέτα eoc όσο και πακέτα δεδομένων, τα πρώτα έχουν *αυστηρά υψηλότερη προτεραιότητα*. Το μέγιστο μέγεθος ενός πακέτου eoc και ο αριθμός που μπορεί να μεταδοθεί ανά δευτερόλεπτο περιορίζεται ώστε αποφευχθεί πιθανή υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας. Το όριο αυτό καθορίζεται από τη μορφή του μηνύματος eoc αλλά και από το μέγιστο αριθμό eoc bytes που επιτρέπονται εντός μίας περιόδου λογικού πλαισίου.



NOTE – Includes DRR, TXOP, LinkState and BAT (see Figure 5-2)

Σχήμα 4.9: Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος TPS-TC της FTU-O

4.4.1.2 Τα σημεία αναφοράς

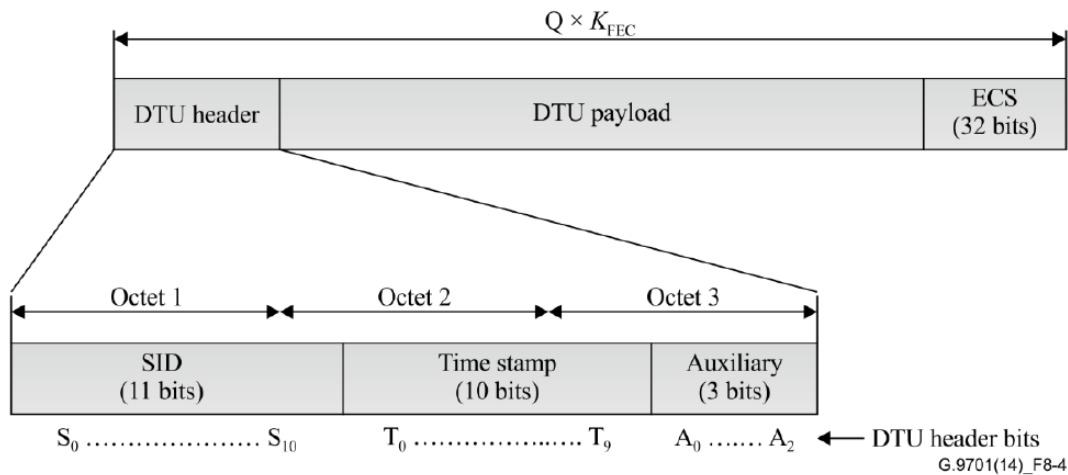
Το σημείο αναφοράς γ , που ορίζεται στο επίπεδο δεδομένων μεταξύ της FTU και του μπλοκ L2+, είναι λογικό και ορίζεται μέσω μίας σειράς παραμέτρων. Οι παράμετροι εξαρτώνται από τον τύπο του υποστρώματος TPS-TC. Αν είναι “packet-based”, η μονάδα δεδομένων είναι ένα πακέτο, δηλαδή μία ακολουθία από bytes. Το περιεχόμενο του πακέτου εξαρτάται από την εφαρμογή.

Το σημείο αναφοράς α περιγράφει τη λογική διεπαφή στο επίπεδο των δεδομένων μεταξύ των υποστρωμάτων TPS-TC και TMS-TC. Τα δεδομένα που διέρχονται από αυτό το σημείο αναφοράς έχουν τη μορφή ακολουθίας από DTU (Ev.4.4.1.3).

Το σημείο αναφοράς TPS-TC_MGMT αποτελεί τη λογική διεπαφή μεταξύ του υποστρώματος TPS-TC και της FME. Μέσω αυτού λαμβάνονται και αποστέλλονται οι παράμετροι διαχείρισης και ελέγχου, ενώ αποτελεί και τη διεπαφή για το κανάλι ενσωματωμένων λειτουργιών.

4.4.1.3 Δομή μονάδας μεταφοράς δεδομένων (DTU)

Η δομή μίας μονάδας μεταφοράς δεδομένων παρουσιάζεται στο Σχ.4.10. Αποτελείται από τρία τμήματα: την επικεφαλίδα (header), την ωφέλιμη πληροφορία (payload) και μία ακολουθία για τον έλεγχο λαθών (Error Check Sequence - ECS). Το μήκος ενός DTU είναι $Q \cdot K_{FEC}$, όπου Q ακέραιος αριθμός που δηλώνει τον αριθμό των κωδικών λέξεων FEC εντός του DTU και K_{FEC} ο αριθμός των bytes πληροφορίας μίας κωδικής λέξης FEC.

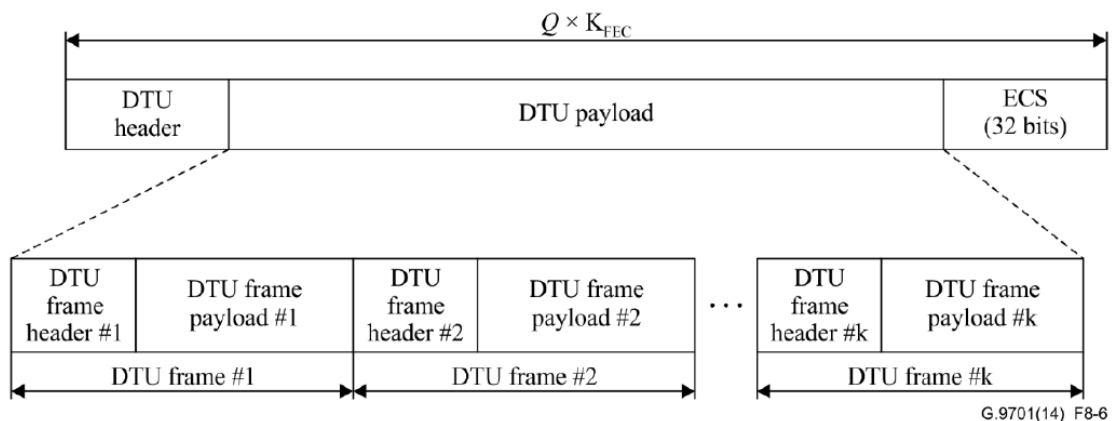


Σχ.4.10: Δομή μονάδας μεταφοράς δεδομένων

Η επικεφαλίδα αποτελείται από 24 bits (3 bytes) που συνιστούν 3 πεδία (Σχ.4.10). Το πρώτο πεδίο ονομάζεται πεδίο αναγνώρισης ακολουθίας (Sequence Identifier - SID), αποτελείται από 11 bits και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση κάθε DTU μέσα στη μεταδιδόμενη ροή. Το δεύτερο είναι το πεδίο σφραγίδας χρόνου (Time Stamp - TS), αποτελείται από 10 bits και περιέχει τον αύξοντα αριθμό (βάσει συγκεκριμένου μετρητή) του συμβόλου που περιέχει το bit S_0 της επικεφαλίδας, Τέλος, το βοηθητικό πεδίο αποτελείται από 3 bits και περιέχει τον τύπο της DTU και 2 δεσμευμένα bits.

Το πεδίο της ωφέλιμης πληροφορίας περιέχει πακέτα δεδομένων και πακέτα εοc. Η δομή του πεδίου για την περίπτωση packet-based TPS-TC παρουσιάζεται στο Σχ.4.11. Όπως φαίνεται, περιλαμβάνει διαδοχικά DTU πλαίσια, έκαστο των οποίων αποτελείται από τα πεδία της επικεφαλίδας και της ωφέλιμης πληροφορίας. Αντίστοιχα με την τιμή του πεδίου της επικεφαλίδας ακολουθεί στο πεδίο της ωφέλιμης πληροφορία ένα τμήμα είτε πακέτου δεδομένων του χρήστη είτε πακέτου εοc. Υπάρχει περίπτωση να είναι και «άχρηστο» (οριζόμενο από τον πάροχο) όταν η επικεφαλίδα δηλώνει ότι το πλαίσιο αυτό είναι το τελευταίο του DTU payload.

Το πεδίο ελέγχου λαθών χρησιμοποιείται για την επαλήθευση. Αποτελείται από 32 bits που είναι το αποτέλεσμα του ελέγχου κυκλικού πλεονασμού (CRC) που έχει εφαρμοστεί στην επικεφαλίδα και στο ωφέλιμο φορτίο της DTU.



Σχήμα 4.11: Περιεχόμενο της ωφέλιμης πληροφορίας μίας DTU

4.4.2 Υπόστρωμα PMS-TC

4.4.2.1 Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς

Στο Σχ.4.12 παρουσιάζεται το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος TPS-TC της FTU-O. Οι μονάδες μεταφοράς δεδομένων (DTUs) εισέρχονται στο υπόστρωμα PMS-TC μέσω του σημείου αναφοράς α. Κατόπιν, ακολουθούν διαδοχικά οι διαδικασίες της περίπλεξης (scrambling), της κωδικοποίησης μέσω ενός κώδικα RS (Reed Solomon Encoding) και της block ανάδευσης (block interleaving).

Στο υπόστρωμα αυτό υπάρχει ένα κανάλι εύρωστης διαχείρισης (RMC). Μέσω του καναλιού αυτού μεταφέρονται οι επιβεβαιώσεις (Acknowledgement - ACK) για τις λαμβανόμενες μονάδες μεταφοράς δεδομένων, όπως και δεδομένα διαχείρισης ευαίσθητα στην καθυστέρηση που υποβάλλονται από τον φορέα διαχείρισης μέσω της διεπαφής PMS-TC_MGMT. Τα RMC μηνύματα ενσωματώνονται σε RMC πλαίσια (RMC frames) και κωδικοποιούνται και αυτά μέσω ενός κώδικα RS.

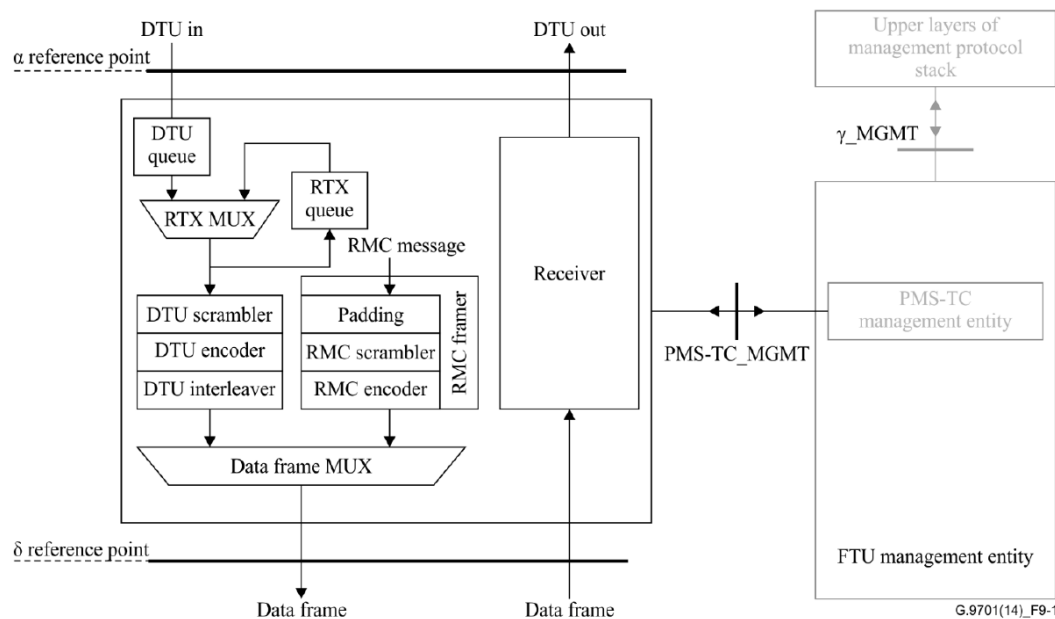
Τα bytes των κωδικοποιημένων DTUs πολυπλέκονται με τα bytes των RMC πλαισίων μέσω του πολυπλέκτη πλαισίων δεδομένων (data frame multiplexer) και αντιστοιχίζονται σε πλαίσια δεδομένων (data frames) που μεταφέρονται στο υπόστρωμα PMD μέσω της διεπαφής δ. Κάθε πλαίσιο δεδομένων περιέχει ακέραιο αριθμό από bytes που αργότερα (στο υπόστρωμα PMD) θα ενσωματωθεί σε ένα σύμβολο. Το RMC πλαίσιο πρέπει να πολυπλέκεται με τις κωδικοποιημένες DTU στο πρώτο πλαίσιο δεδομένων δημιουργώντας ένα λογικό πλαίσιο²² (logical frame). Αυτό το πλαίσιο δεδομένων καλείται RMC πλαίσιο δεδομένων (RMC data frame) και θα ενσωματωθεί σε ένα RMC σύμβολο στο υπόστρωμα PMD. Όλα τα υπόλοιπα πλαίσια δεδομένων του λογικού πλαισίου που ονομάζονται κανονικά πλαίσια δεδομένων (normal data frames) περιέχουν μόνο DTUs. Η θέση του RMC συμβόλου στο TDD πλαίσιο καθορίζεται κατά τη διαδικασία της έναρξης (initialization).

Οι DTUs αποθηκεύονται σε ένα ενταμιευτή (retransmission queue buffer). Στη συνέχεια, ο πολυπλέκτης αναμετάδοσης (RTX MUX) επιλέγει προς μετάδοση είτε μία νέα DTU είτε μία DTU από τον ενταμιευτή αντίστοιχα με την επιβεβαίωση (ACK) που έχει λάβει. Η ουρά των DTUs επιτρέπει την προτεραιότητα των DTU που έχουν αναμεταδοθεί και πρέπει να υποστηρίζει την καθυστέρηση που σχετίζεται με τον έλεγχο ροής (flow control).

Κατά τη διαδικασία λήψης, εισέρχονται τα πλαίσια δεδομένων μέσω του σημείου αναφοράς ε στο εξεταζόμενο υπόστρωμα και εξάγονται τα RMC πλαίσια και οι μονάδες μεταφοράς δεδομένων. Στη συνέχεια, οι μονάδες μεταφοράς δεδομένων διέρχονται από τις διαδικασίες της από-ανάδευσης, αποκωδικοποίησης και απο-περίπλεξης και ελέγχονται για λάθη. Βάσει του αποτελέσματος του ελέγχου αποστέλλεται επιβεβαίωση στην ομότιμη FTU ότι οι DTU λήφθηκαν χωρίς λάθη.

²² Ένα λογικό πλαίσιο αποτελείται από θέσεις συμβόλων που είναι να μεταδοθούν προς την ίδια κατεύθυνση, ξεκινώντας από τη θέση ενός συμβόλου RMC και τελειώνοντας στο σύμβολο πριν από το επόμενο RMC σύμβολο.

Οι DTUs που περιέχουν λάθη απορρίπτονται από το δέκτη. Αν οι ληφθείσες DTU δεν έχουν λάθη και όλες οι σχετικές DTU με μικρότερο SID δεν έχουν λάθη ή έχουν λήξει (timed out), μεταφέρονται στο υποεπίπεδο TPS-TC μέσω του σημείου αναφοράς α. Διαφορετικά, εισέρχονται στον ενταμιευτή μέχρι να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω προϋποθέσεις. Αντίστοιχα, τα RMC πλαίσια αποκωδικοποιούνται, αποπεριπλέκονται και οι παράμετροι διαχείρισης διοχετεύονται στο φορέα διαχείρισης μέσω της διεπαφής PMS-TC_MGMT. Οι επιβεβαιώσεις που έχουν ληφθεί χωρίς λάθη χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό αναμεταδόσεων, ενώ οι επιβεβαιώσεις που έχουν ληφθεί με λάθη πρέπει να απορρίπτονται. Τα δεδομένα διαχείρισης που έχουν ληφθεί χωρίς λάθη χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ζεύξης.



Σχ.4.12: Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος PMS-TC της FTU-O

4.4.2.2 Τα σημεία αναφοράς

Το σημείο αναφοράς δ περιγράφει τη λογική διεπαφή στο επίπεδο των δεδομένων μεταξύ των υποστρωμάτων TMS-TC και PMD. Τα δεδομένα που διέρχονται από αυτό το σημείο αναφοράς έχουν τη μορφή ακολουθίας από (κανονικά και RMC) πλαίσια δεδομένων. Η μετάδοσή τους στο PMD υπόστρωμα επιτρέπεται μόνο όταν το τελευταίο έχει ενεργοποιήσει την παράμετρο TX Enable. Αντίστοιχα, η λήψη τους πρέπει να γίνεται αποδεκτή από το υπόστρωμα TMS-TC, μόνο όταν το PMD υπόστρωμα έχει ενεργοποιήσει την παράμετρο RX Enable.

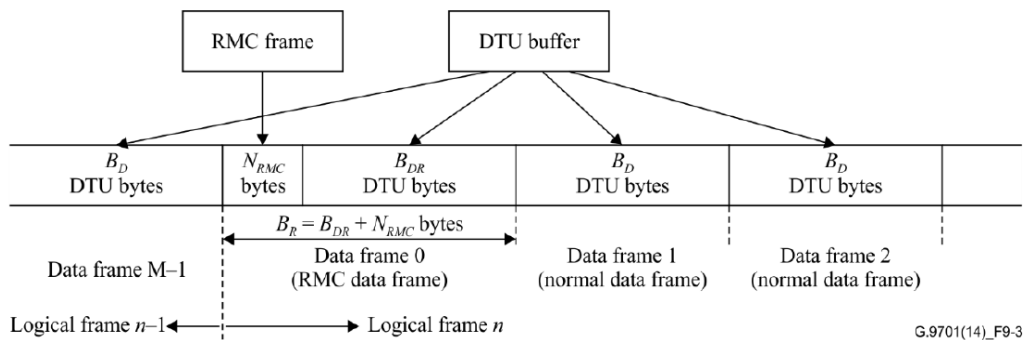
Το σημείο αναφοράς PMS-TC_MGMT περιγράφει τη λογική διεπαφή μεταξύ του υποστρώματος PMS-TC και της FME. Ορίζεται μέσω των παραμέτρων διαχείρισης και ελέγχου, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: υπάρχουν οι παράμετροι που παράγονται από την FME και εφαρμόζονται στο PMS-TC και οι παράμετροι που εξάγονται στο PMS-TC από τα ληφθέντα πλαίσια δεδομένων και υποβάλλονται στο φορέα διαχείρισης του ίδιου υποστρώματος.

4.4.2.3 Περίπλεξη, κωδικοποίηση και ανάδευση

Μετά την εξαγωγή των DTUs από τον ενταμιευτή, ακολουθεί η υποχρεωτική περίπλεξη των bytes που περιέχουν, βάσει συγκεκριμένου αλγορίθμου. Στη συνέχεια, κωδικοποιούνται μέσω ενός κώδικα Reed Solomon, δημιουργώντας κωδικές λέξεις μήκους $N_{FEC} = K_{FEC} + R_{FEC}$, όπου R_{FEC} τα bytes ελέγχου που εισάγει ο κωδικοποιητής. Οι έγκυρες τιμές που παίρνει το R_{FEC} είναι 2, 4... 16, το N_{FEC} όλες τις ακέραιες τιμές μεταξύ 32 και 255 (συμπεριλαμβανομένων των ακραίων τιμών) και η FTU πρέπει να υποστηρίζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς έγκυρων τιμών του R_{FEC} και N_{FEC} . Το μήκος μίας DTU μετά από την κωδικοποίηση είναι $Q * N_{FEC}$ bytes. Έπειτα, οι DTU διέρχονται από τη διαδικασία της μπλοκ ανάδευσης ακολουθώντας συγκεκριμένους κανόνες.

4.4.2.4 Πολυπλέκτης πλαισίων δεδομένων

Ο πολυπλέκτης πλαισίων δεδομένων δημιουργεί πλαίσια δεδομένων πολυπλέκοντας ένα RMC πλαίσιο με τα bytes των κωδικοποιημένων και αναδευμένων DTUs που εξάγονται από τον ενταμιευτή, βάσει των παραμέτρων που λαμβάνονται από το υπόστρωμα PMD μέσω της διεπαφής δ. Στο Σχ.4.13 παρουσιάζεται η πολύπλεξη των RMC πλαισίων και των DTU bytes. Το RMC πλαίσιο δεδομένων περιλαμβάνει ένα RMC πλαίσιο B_{RMC} bytes ακολουθούμενο από B_{DR} bytes που έχουν εξαχθεί από τον ενταμιευτή.



Σχήμα 4.13: Πολύπλεξη RMC πλαισίων και bytes από DTUs

4.4.3 Υπόστρωμα PMD

4.4.3.1 Το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς

Στο Σχ.4.14 παρουσιάζεται το λειτουργικό μοντέλο αναφοράς του υποστρώματος PMD της FTU-O. Τα προς μετάδοση bits εισέρχονται μέσω της διεπαφής δ στο υπόστρωμα με τη μορφή πλαισίων δεδομένων. Αντίστοιχα, τα bits δεδομένων κατά τη λήψη μετατρέπονται σε πλαίσια δεδομένων και μέσω της ίδιας διεπαφής εισέρχονται στο αμέσως επόμενο υποεπίπεδο. Το περιεχόμενο ενός πλαισίου δεδομένων μετατρέπεται σε ένα σύμβολο. Όπως αναφέρθηκε στην Εν.4.4.2, δύο τύποι πλαισίων εισέρχονται σε αυτό το υποεπίπεδο, τα κανονικά πλαίσια δεδομένων (normal data frames) που περιέχουν bits των DTUs μόνο και τα RMC πλαίσια δεδομένων που περιέχουν RMC bits και bits των DTUs. Το μήκος των πλαισίων αυτών μπορεί να διαφέρει.

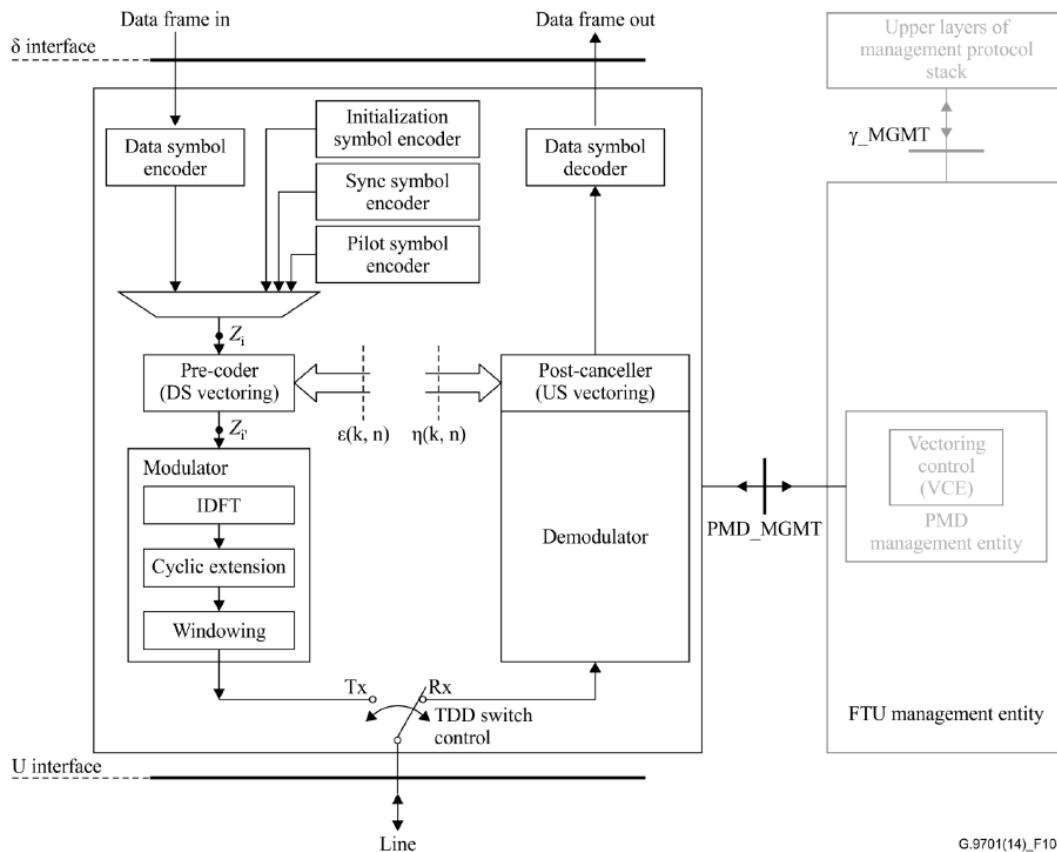
Ο κωδικοποιητής συμβόλων δεδομένων (data symbol encoder) χωρίζει τα bits του εισερχόμενου πλαισίου δεδομένων σε ομάδες, κάθε μία από τις οποίες αναλαμβάνει να διαμορφώσει ένα συγκεκριμένο τόνο του DMT σήματος. Κάθε ομάδα από bits κωδικοποιείται περαιτέρω μέσω του κωδικοποιητή trellis και αντιστοιχίζεται σε ένα σημείο του αστερισμού. Με τον ίδιο τρόπο, τα bits των συμβόλων έναρξης (initialization), συγχρονισμού (sync) και των πιλοτικών συμβόλων (pilot), όποτε πρέπει να μεταδοθούν κωδικοποιούνται και αντιστοιχίζονται σε σημεία του αστερισμού. Τα RMC σύμβολα και τα σύμβολα δεδομένων έχουν διαφορετικό bit loading και κανόνες για την κωδικοποίηση trellis οι οποίοι εφαρμόζονται από τον κωδικοποιητή συμβόλων δεδομένων.

Τα σημεία του αστερισμού του μεταδιδόμενου συμβόλου Z_i προ-κωδικοποιούνται περαιτέρω σε συνδυασμό με τα σημεία των αστερισμών των υπολοίπων $n-1$ γραμμών του ίδιου VG. Αυτά υποβάλλονται μέσω της διεπαφής $\epsilon(k,n)$ με το k να συμβολίζει τον αύξοντα αριθμό της γραμμής εντός του VG. Οι συντελεστές προ-κωδικοποίησης (pre-coding coefficients) παρέχονται από τη μονάδα ελέγχου του vectoring μέσω της διεπαφής $\epsilon-c$.

Το δημιουργηθέν σύνολο από τα προ-κωδικοποιημένα σημεία του αστερισμού διαμορφώνει τα υποφέροντα του εκάστοτε τόνου με τη χρήση του IDFT. Στη συνέχεια, ακολουθεί η προσθήκη κυκλικής επέκτασης (cyclic extension), εφαρμόζεται κατάλληλη συνάρτηση παραθύρου (windowing) και τελικά το σύμβολο αποστέλλεται στο μέσο μετάδοσης μέσω της διεπαφής U-O στη χρονοθυρίδα εντός του πλαισίου TDD που έχει αποδοθεί για τη μετάδοση της κάτω ζεύξης (που ελέγχεται από το διακόπτη TDD).

Κατά τη λήψη, το σήμα που έχει εισέλθει στη γραμμή μέσω της διεπαφής U-O (κατά το χρονικό διάστημα που έχει αποδοθεί για τη λήψη και ελέγχεται μέσω του διακόπτη TDD) αποδιαμορφώνεται. Τα εξαγόμενα σημεία του αστερισμού διέρχονται από τη διαδικασία μετα-ακύρωσης της διαφωνίας (crosstalk post-cancellation) με στόχο τη μετρίαση των παρεμβολών που έχουν συσσωρευθεί στη γραμμή. Στη συνέχεια, αποκωδικοποιούνται και εξάγεται το πλαίσιο δεδομένων που διοχετεύεται στο ανώτερο υποεπίπεδο μέσω της διεπαφής δ . Ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για τη διαδικασία του post-cancelling χρησιμοποιεί τα αποδιαμορφωμένα σύμβολα όλων των άλλων γραμμών που υποβάλλονται μέσω τις διεπαφής $\eta(k,n)$.

Οι συντελεστές της μετα-ακύρωσης (post cancelling coefficients) παρέχονται από τη μονάδα ελέγχου του vectoring μέσω της διεπαφής c-η. Η σχεδίαση των διεπαφών $\epsilon(k,n)$, $\eta(k,n)$, ϵ -c και η -c είναι στη διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών.



Σχήμα 4.14: Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς υποστρώματος PMD της FTU-O

Το λειτουργικό μοντέλο του υποστρώματος της FTU-R είναι σχεδόν ίδιο με αυτό του Σχ.4.14. Η μόνη διαφορά είναι ότι δεν υπάρχει προ-κωδικοποιητής και μετα-ακυρωτής. Τα σημεία του αστερισμού διοχετεύονται στο διαμορφωτή και αντίστοιχα κατά τη λήψη, τα αποδιαμορφωμένα σημεία του αστερισμού εισέρχονται απευθείας στον κωδικοποιητή συμβόλων δεδομένων.

4.4.3.2 Τα σημεία αναφοράς

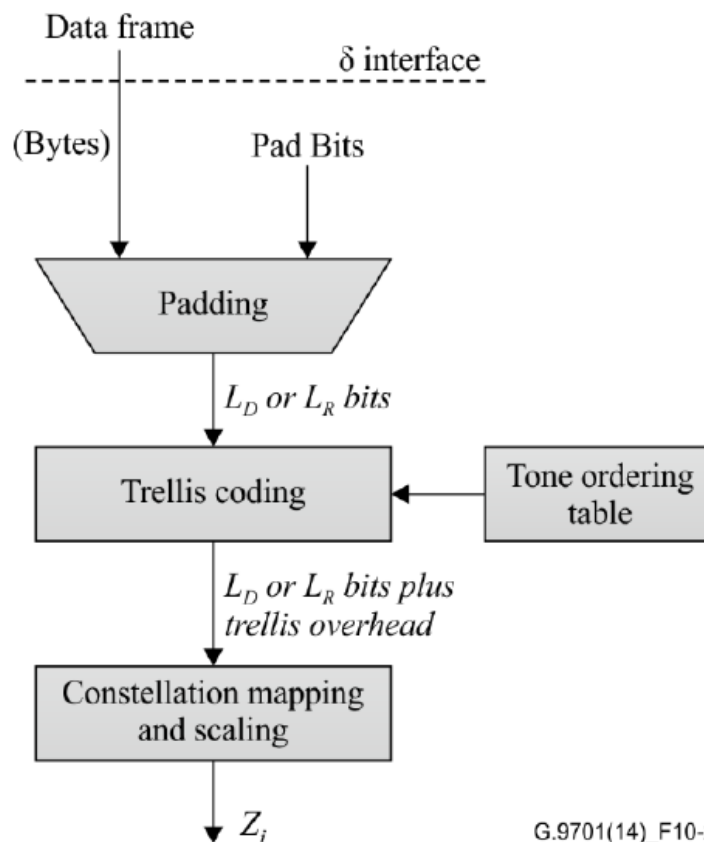
Το σημείο αναφοράς U περιγράφει μία λογική και φυσική διεπαφή του επιπέδου δεδομένων (data plane) μεταξύ του υποστρώματος PMD και του μέσου μετάδοσης (χάλκινο ζεύγος). Τα δεδομένα στο σημείο αυτό έχουν τη μορφή ενός πλαισίου TDD, το οποίο παρέχει το διαχωρισμό για τη μετάδοση δεδομένων άνω και κάτω ζεύξης ώστε τα σύμβολα να μην αποστέλλονται και λαμβάνονται ταυτόχρονα. Ομάδες διαδοχικών TDD πλαισίων δημιουργούν τα λεγόμενα «υπερπλαίσια» (superframes). Κάθε ένα από τα υπερπλαίσια περιέχει ένα σύμβολο συγχρονισμού που χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των TDD πλαισίων και για την εκτίμηση του καναλιού.

Η διεπαφή PMD_MGMT περιγράφει τη λογική διεπαφή μεταξύ του υποστρώματος PMD και του φορέα διαχείρισης και ορίζεται από μία ομάδα παραμέτρων ελέγχου και διαχείρισης που χωρίζονται σε δύο υποομάδες: τις παραμέτρους που ορίζονται από το φορέα διαχείρισης και εφαρμόζονται στο υποεπίπεδο PMD και τις παραμέτρους που εξάγονται από το λαμβανόμενο σήμα και υποβάλλονται στο φορέα διαχείρισης του PMD.

Οι διεπαφές $\epsilon(k,n)$ και $\eta(k,n)$ βρίσκονται μεταξύ του προ-κωδικοποιητή και της VCE και μεταξύ και VCE αντίστοιχα. Οι παράμετροι σε αυτές τις διεπαφές παρέχουν στη VCE τα απαραίτητα σήματα για την εκτίμηση του καναλιού. Η VCE μέσω των διεπαφών vectoring παρέχει τους πίνακες συντελεστών στον post-canceller και στον προκωδικοποιητή μέσω των αντίστοιχων διεπαφών και τις ρυθμίσεις TIGA για την επικοινωνία της FTU-O με την FTU-R. Η σχεδίαση των διεπαφών αυτών είναι στη διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών.

4.4.3.3 Κωδικοποιητής συμβόλων δεδομένων

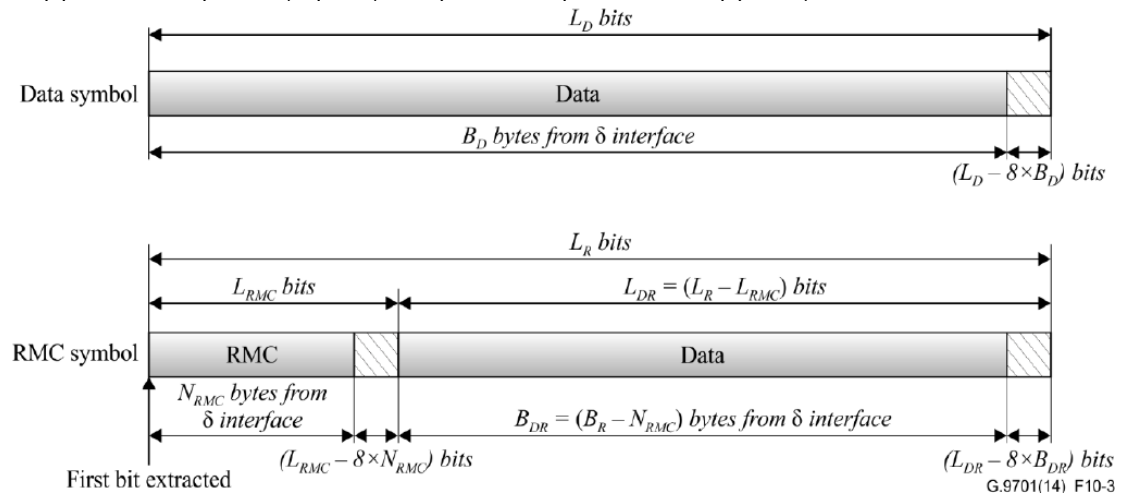
Το λειτουργικό μοντέλο του κωδικοποιητή συμβόλων δεδομένων παρουσιάζεται στο Σχ.4.15. Περιλαμβάνει τις διαδικασίες του παραπλήρωσης (padding), διάταξης των τόνων (tone ordering), κωδικοποίησης trellis (trellis coding), αντιστοίχισης των συμβόλων σε σημεία του αστερισμού (constellation mapping) και της κλιμάκωσης ισχύος των σημείων του αστερισμού (constellation point scaling). Για τα σύμβολα δεδομένων και τα RMC σύμβολα, οι διαδικασίες διάταξης των τόνων και της κωδικοποίησης trellis πραγματοποιούνται με διαφορετικό τρόπο.



Σχήμα 4.15: Λειτουργικό μοντέλο κωδικοποιητή υποστρώματος PMD

Παραπλήρωση (padding)

Τα πλαίσια δεδομένων που εισέρχονται στο υπόστρωμα PMD περιέχουν ακέραιο αριθμό bytes. Τα bits εξάγονται με σειρά από το λιγότερο προς το περισσότερο σημαντικό bit. Η διαδικασία της παραπλήρωσης λαμβάνει χώρα μόνο όταν ο αριθμός των bits που ενσωματώνονται σε ένα σύμβολο δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 8. Για τα σύμβολα δεδομένων, μέχρι 7 bits παραπλήρωσης προσαρτώνται στο τέλος του πλαισίου δεδομένων πριν από την κωδικοποίηση συμβόλων (Σχ.4.16). Για τα RMC σύμβολα, τα bits παραπλήρωσης προσαρτώνται ξεχωριστά στο τμήμα RMC και στο τμήμα που περιέχει δεδομένα του χρήστη στο πλαίσιο δεδομένων (Σχ.4.16). Ο τελικός αριθμός των bits είναι L_D (αν πρόκειται για σύμβολο δεδομένων) ή L_R (αν πρόκειται για RMC σύμβολο).



Σχήμα 4.16: Παραπλήρωση συμβόλων δεδομένων και RMC συμβόλων

Διάταξη τόνων (tone ordering)

Κατά την έναρξη το τμήμα λήψης της FTU πρέπει να υπολογίσει τον αριθμό των bits και των σχετικών κερδών που θα χρησιμοποιηθούν για κάθε τόνο. Οι προς χρήση τόνοι ορίζονται από την παράμετρο MEDLEYset²³. Επίσης, πρέπει να υπολογιστεί η σειρά με την οποία θα ανατεθούν στους τόνους τα bits (tone ordering). Ακόμη, πρέπει να επιλεγούν οι τόνοι που θα κωδικοποιήσουν το κανάλι εύρωστης μετάδοσης (RMC tone set), οι οποίοι πρέπει να μεταφέρουν μόνο RMC bits και όχι DTU bits.

Τα ζεύγη αριθμού bits και σχετικών κερδών κλιμάκωσης που χρησιμοποιούνται για τα σύμβολα δεδομένων ορίζονται σε αύξουσα σειρά με βάση τη συχνότητα των τόνων, στους πίνακες κατανομής των bits "b" (bit allocation table) και κερδών "g" (gain table). Αντίστοιχα, ορίζονται και οι πίνακες των bits και των κερδών που χρησιμοποιούνται για τα RMC σύμβολα.

²³ Είναι μία παράμετρος που ορίζεται κατά τη φάση της έναρξης και περιέχει τους τόνους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων στην άνω και στην κάτω ζεύξη ((MEDLEYus και MEDLEYds). Οι τόνοι αυτοί είναι ένα μέρος των τόνων που ανατίθενται στην άνω και κάτω ζεύξη από την παράμετρο SUPPORTEDCARRIERS (SUPPORTEDCARRIERSus και SUPPORTEDCARRIERSds.)

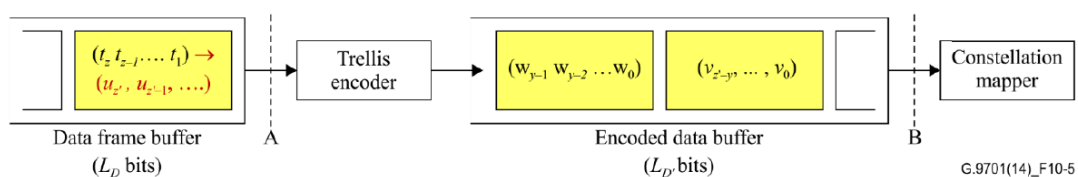
Μέσω του πίνακα διάταξης των τόνων (tone ordering table) “t” ορίζεται η σειρά με την οποία θα ανατεθούν bits στους τόνους που περιέχονται στο MEDLEYset. Ο πίνακας αυτός δημιουργείται και ανταλλάσσεται μεταξύ FTU-O και FTU-R κατά την έναρξη, ενώ πρέπει να παραμένει αναλλοίωτος μέχρι την επόμενη έναρξη.

Μετά τη λήψη των πινάκων b, g, t και του RMC tone set πρέπει να υπολογιστούν οι αναδιαταγμένοι πίνακες b', t1 και t', βάσει συγκεκριμένων κανόνων. Βάσει των πινάκων b' και t' πραγματοποιείται η κωδικοποίηση trellis, ενώ βάσει του πίνακα t' πραγματοποιείται στη συνέχεια και η αντιστοίχιση σε σημεία του αστερισμού με τον αριθμό των bits ανά τόνο να είναι ίδιος με αυτόν που ορίζεται στον αρχικό πίνακα b. Αντίστοιχα υπολογίζονται και οι αναδιαταγμένοι πίνακες των bits και των κερδών που χρησιμοποιούνται για τα RMC σύμβολα και βάσει αυτών γίνεται η κωδικοποίηση trellis και η αντιστοίχιση σε σημεία του αστερισμού.

Κωδικοποίηση trellis (trellis coding)

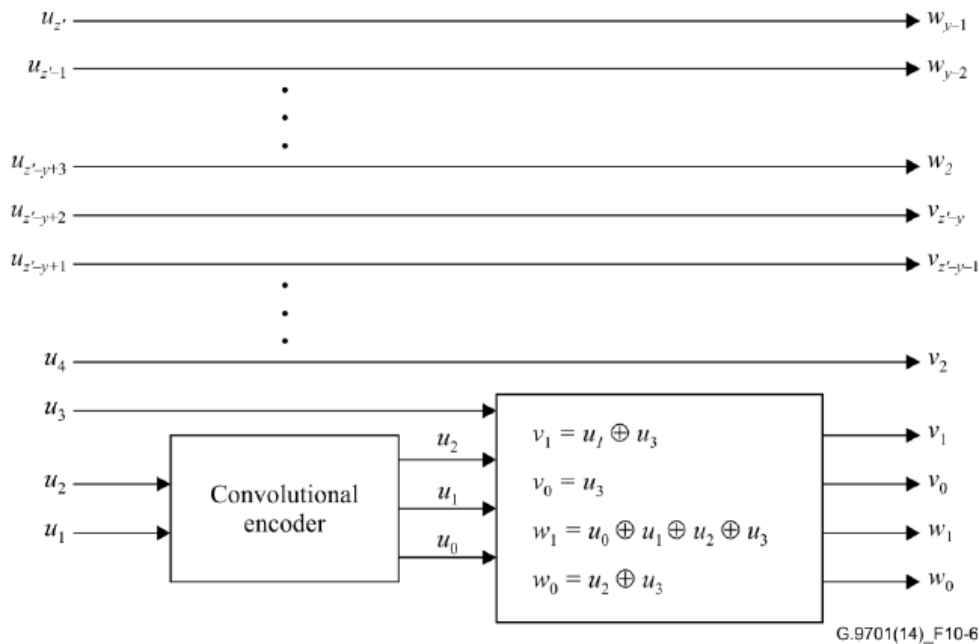
Ο κωδικοποιητής trellis χρησιμοποιεί τον 16 καταστάσεων και 4 διαστάσεων trellis κώδικα του Wei. Για τα σύμβολα δεδομένων, τα L_D bits που σχετίζονται με ένα λογικό πλαίσιο ενσωματώνονται σε ένα σύμβολο δεδομένων μεγέθους L'_D bits βάσει του πίνακα κατανομής των bits b'. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για τα σύμβολα RMC.

Αφότου ολοκληρωθεί η διαδικασία διάταξης των τόνων, τα bits των πλαισίων δεδομένων εξάγονται σειριακά βάσει του πίνακα b' με το πρώτο bit κάθε πλαισίου να εξάγεται πρώτο. Η κωδικοποίηση trellis εφαρμόζεται σε ζεύγη συνεχόμενων τιμών του πίνακα b', που συμβολίζονται ως (x,y). Για κάθε²⁴ ζεύγος, $z=x+y-1$ bits εξάγονται από τον ενταμιευτή και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της δυαδικής λέξης u, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε δύο δυαδικές λέξεις w και v, οι οποίες εισάγονται στον ενταμιευτή κωδικοποιημένων δεδομένων και μετά χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση σε σημεία του αστερισμού. Τα ανωτέρω τμήματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στα Σχ.17 και Σχ.18 (το Σχ.19 είναι συμπληρωματικό του Σχ.18).

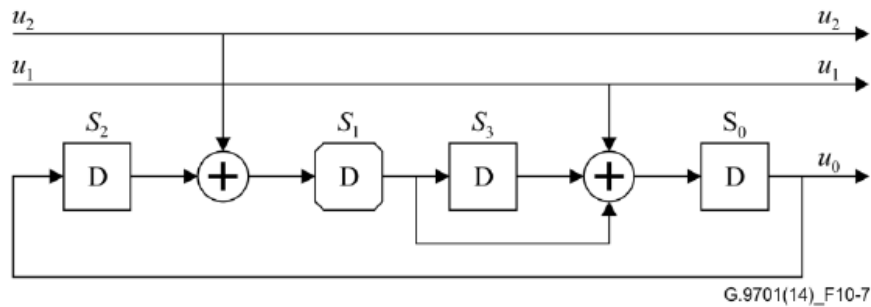


Σχήμα 4.17: Μετατροπή των bits από τον κωδικοποιητή trellis

²⁴ Εκτός από το τελευταίο ζευγάρι όπου εξάγονται $x+y-3$



Σχήμα 4.18: Μετατροπή λέξης u στις λέξεις v και w



Σχήμα 4.19: Ο συνελκτικός κωδικοποιητής

Αντιστοίχιση σε σημεία του αστερισμού (constellation mapping)

Μετά την κωδικοποίηση trellis ακολουθεί η αντιστοίχιση των L_D ' bits που εξέρχονται από τον ενταμιευτή των κωδικοποιημένων δεδομένων (encoded data buffer) σε σημεία ενός αστερισμού QAM με ελάχιστο αριθμό 1 bit και μέγιστο 12, 13 ή 14.

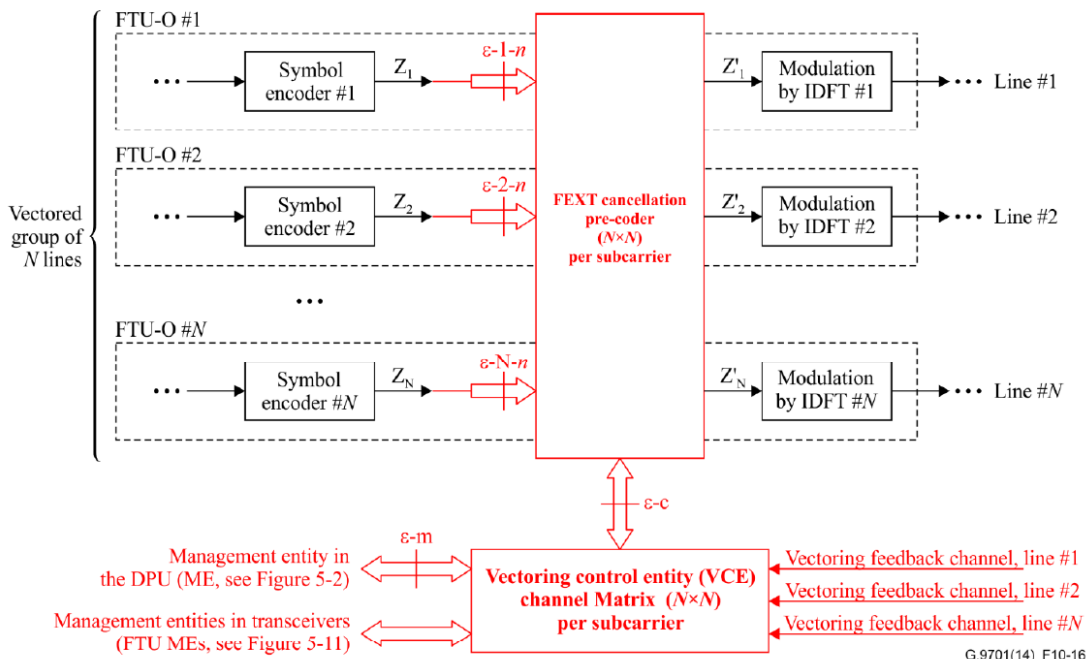
Κλιμάκωση ισχύος σημείων του αστερισμού (constellation point scaling)

Η κλιμάκωση ισχύος των σημείων του αστερισμού αποσκοπεί στην κανονικοποίηση της μέσης ισχύος, στην επίτευξη μίας PSD προς μετάδοση εξαρτώμενη από τη συχνότητα και στην προσαρμογή της ισχύος μετάδοσης κάθε τόνου. Για τους χρησιμοποιούμενους τόνους, κάθε σημείο του αστερισμού κλιμακώνεται βάσει 3 παραμέτρων: του παράγοντα κανονικοποίησης της ισχύος g_i , του προσαρμογέα κέρδους b_i , και του συντελεστή διαμόρφωσης φάσματος tss_i (στο πεδίο της συχνότητας). Στο τέλος της διαδικασίας προκύπτει κάθε σημείο του αστερισμού ως ένας μιγαδικός αριθμός της μορφής:

$$Z_i = g_i * tss_i * \chi(b_i) * (X_i + j * Y_i) \quad (4.1)$$

4.4.3.4 Προκωδικοποιητής (precoder)

Στο Σχ.4.20 παρουσιάζεται ένα τμήμα του λειτουργικού μοντέλου του υποστρώματος PMD, που αφορά τη μετάδοση κάτω ζεύξης. Σε αυτό περιλαμβάνεται ο προκωδικοποιητής που χρησιμοποιείται για την ακύρωση της τηλεδιαφωνίας (FEXT cancellation) στην κάτω ζεύξη εντός ενός VG αποτελούμενου από N γραμμές. Στο μοντέλο αυτό περιλαμβάνονται οι κωδικοποιητές συμβόλων όλων των ειδών του Σχ.4.14 (κωδικοποιητές συμβόλων δεδομένων, συγχρονισμού, έναρξης και πιλοτικών συμβόλων), ο προκωδικοποιητής για την ακύρωση της τηλεδιαφωνίας, όπως επίσης και τα λειτουργικά μπλοκ IDFT που αφορούν τη διαμόρφωση.



Σχήμα 4.20: Λειτουργικό μοντέλο PMD υποστρώματος με χρήση προκωδικοποιητή $N \times N$

Η μονάδα ελέγχου του vectoring (VCE) ενημερώνεται και διαχειρίζεται τον πίνακα του καναλιού για κάθε υποφέρων εντός του VG. Ο πίνακας αυτός αντανακλά τα χαρακτηριστικά των καναλιών των διαχειριζόμενων γραμμών. Κάθε πίνακας έχει διαστάσεις $N \times N$, όπου N ο αριθμός των γραμμών εντός του VG. Από τον πίνακα αυτό, η VCE εξάγει ένα πίνακα προκωδικοποίησης FEXT (FEXT precoder matrix) που χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει την τηλεδιαφωνία από κάθε γραμμή εντός του VG. Γνωρίζοντας τα μεταδιδόμενα σύμβολα, μέσω του προκωδικοποιητή προαντισταθμίζεται το πραγματικό μεταδιδόμενο σύμβολο έτσι ώστε όταν φθάσει στο δέκτη η διαφωνία να είναι σημαντικά μειωμένη. Επιπλέον, η VCE οφείλει να φροντίζει, είτε ενσωματωμένα στον πίνακα του καναλιού είτε ξεχωριστά, ώστε τα εξαγόμενα σύμβολα να μη παραβιάζουν τα όρια της φασματικής πυκνότητας ισχύος που αντιστοιχούν στην παράμετρο tss_i .

Ο πίνακας καναλιού και ο εξαγόμενος πίνακας προκωδικοποίησης θεωρείται ότι διαχειρίζονται αποκλειστικά στο εσωτερικό μίας DPU. Απαιτείται, ωστόσο, ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της FTU-O και της FTU-R ώστε κάθε γραμμή να μάθει, να ακολουθήσει και να διατηρήσει τους προαναφερθέντες πίνακες, η οποία γίνεται μέσω του καναλιού ανατροφοδότησης vectoring. Οι αλγόριθμοι για τη δημιουργία των πινάκων αφήνονται στη διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών. Αντίστοιχα με την εφαρμογή είναι δυνατό η VCE να εξάγει απευθείας τον πίνακα προκωδικοποίησης.

4.4.3.5 Διαμορφωτής (modulator)

IDFT

Μέσω του IDFT γίνεται η διαμόρφωση των μιγαδικών τιμών που εξάγονται από τον προκωδικοποιητή στα DMT υποκανάλια. Μετατρέπονται δηλαδή οι N μιγαδικές τιμές Z_i σε $2N$ πραγματικές τιμές x_n που αποτελεί περιγραφή στο πεδίο του χρόνου μέσω της συνάρτησης:

$$x_n = \sum_{i=0}^{2N-1} \exp\left(j * 2 * \pi * \frac{n*i}{2*N}\right) * Z_i \quad (4.2)$$

Για την παραγωγή των τιμών x_n οι τιμές εισόδου Z_i επαυξάνονται σύμφωνα με τη σχέση (4.2) ώστε το διάνυσμα Z_i να έχει ερμιτιανή συμμετρία.

$$Z_i = \text{conj}(Z_{2N-i}) \text{ για } i=N+1 \text{ ως } 2N+1 \quad (4.3)$$

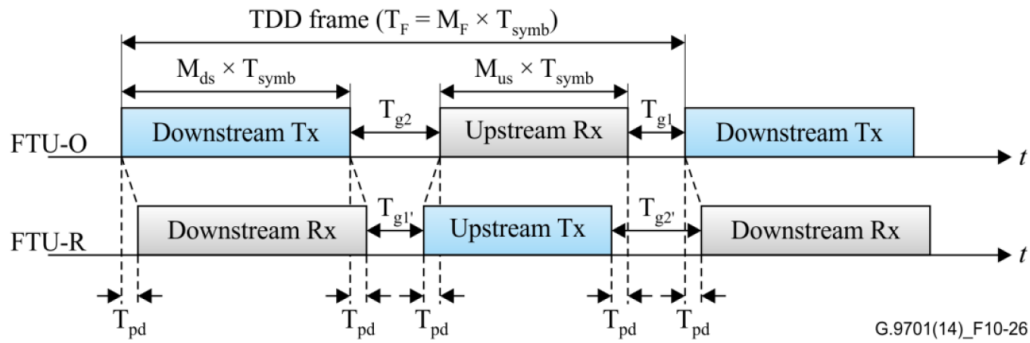
Για τα υποκανάλια που δεν περιέχονται στο MEDLEYset δεν παράγονται τιμές.

Cyclic extension and windowing

Η κυκλική επέκταση προσθέτει ένα διάστημα ασφαλείας μεταξύ γειτονικών συμβόλων με στόχο την μετρίαση της διασυμβολικής παρεμβολής. Επίσης, προσθέτει ένα παράθυρο που είναι απαραίτητο για τη διαμόρφωση του φάσματος του μεταδιδόμενου σήματος (windowing). Η προσθήκη κυκλικού πλεονασμού είναι υποχρεωτική και ακολουθεί μία σειρά από κανόνες.

4.4.3.6 Δομή πλαισίου TDD

Σύμφωνα με τη σύσταση της ITU, στο G.fast υποστηρίζονται δύο μεγέθη πλαισίων TDD μήκους 23 και 36 συμβόλων. Στο Σχ.4.21 παρουσιάζεται η δομή ενός TDD πλαισίου. Η διάρκεια του πλαισίου (T_F) βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας των αριθμό των συμβόλων που μεταδίδονται σε αυτό (M_F) με τη διάρκειά τους (T_{symb}). Τα κενά ασφαλείας (T_{g1} , T_{g2}) που υπάρχουν μετά τη μετάδοση της άνω και της κάτω ζεύξης αντίστοιχα έχουν συνολική (αθροιστική) διάρκεια ενός συμβόλου. Εξ αυτού συνάγεται ότι τελικά μόνο 22 ή 35 σύμβολα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση. Οι δυνατές αναλογίες ρυθμού μετάδοσης άνω και κάτω ζεύξης προκύπτουν από τις τιμές που μπορεί να λάβει η παράμετρος M_{ds} , η οποία δηλώνει τον αριθμό των συμβόλων που αφιερώνονται στη μετάδοση κάτω ζεύξης (Πιν.4.2).



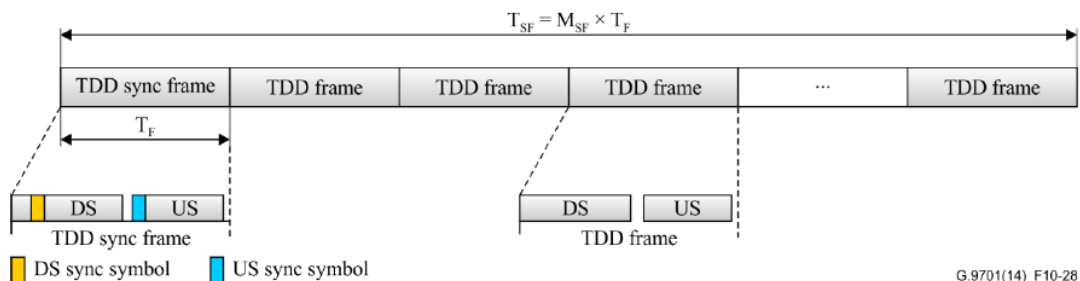
Σχήμα 4.21: Δομή πλαισίου TDD

M_F	Δυνατές τιμές M_{ds}
36	10 ως 32
23	6 ως 19

Πίνακας 4.2: Δυνατές τιμές M_{ds} συναρτήσει του μήκους TDD πλαισίου

4.4.3.7 Δομή υπερπλασίου

Η δομή ενός υπερπλασίου παρουσιάζεται στο Σχ.4.22. Η παράμετρος M_{SF} δηλώνει τον αριθμό των TDD πλαισίων που περιέχονται σε ένα υπερπλαίσιο και εξαρτάται από τον αριθμό των συμβόλων που περιέχονται σε αυτό (Πιν.4.3). Τα υπερπλάσια μεταδίδονται το ένα μετά το άλλο χωρίς κενά χρόνου. Το πρώτο TDD πλαίσιο εντός του υπερπλασίου ονομάζεται πλαίσιο συγχρονισμού (TDD sync frame) και περιέχει ένα σύμβολο συγχρονισμού για την άνω ζεύξη και ένα για την κάτω ζεύξη.



Σχήμα 4.22: Δομή υπερπλασίου

M_F	M_{SF}
36	8
23	12

Πίνακας 4.3: Υποχρεωτικά ζεύγη τιμών (M_F, M_{SF})

4.5 Βιβλιογραφία

- [1] ITU-T Recommendation G.9701, Amendment 5 (Physical Layer Specification of g.fast)
- [2] ITU-T Recommendation G.9700, Amendment 2 (Power spectral density specification)

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

5.1 Στόχος

Στόχος των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν ήταν η διαπίστωση και καταγραφή των επιδόσεων και των περιορισμών του προφίλ 212a του G.fast σε ποικίλα σενάρια.

5.2 Εξοπλισμός

Οι μετρήσεις έγιναν στα εργαστήρια Νέων Τεχνολογιών πρόσβασης του ΟΤΕ. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στον Πιν.5.1.

ΕΙΔΟΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
Εξοπλισμός του G.fast (Σχ.5.1 - 5.3)	Εταιρία: ADTRAN Μοντέλο: 516VG_SDx2221-16 TP Χαρακτηριστικά: Διαθέτει 16 θύρες και υποστηρίζει τα προφίλ 106 και 212 του G.fast καθώς επίσης και το VDSL2 17a vectoring.
Modem	Εταιρία: ADTRAN Μοντέλο: 422GC Χαρακτηριστικά: Παρέχει δυνατότητες bridging μεταξύ ethernet και G.fast
Καλώδια	0,4mm jelly filled binders 10 ζευγών
Backhaul Network	Gigabit Ethernet
Distance Creator (Σχ.5.4)	Εταιρεία: TELEBYTE Μοντέλο: Cable Farm Automation Switch (CFA) Χαρακτηριστικά: Διαθέτει 5 διαφορετικά μήκη βρόχου που διασυνδέονται σε ποικίλους συνδυασμούς και υποστηρίζει έως 24 γραμμές
Εξοπλισμός του VDSL2	Εταιρεία: Huawei Μοντέλο: MA5603T
VDSL2 CPE	Εταιρεία: ZTE Μοντέλο: Entry 2i
Spectrum Analyzer (SA)	Εταιρεία: TELEBYTE Μοντέλο: 501

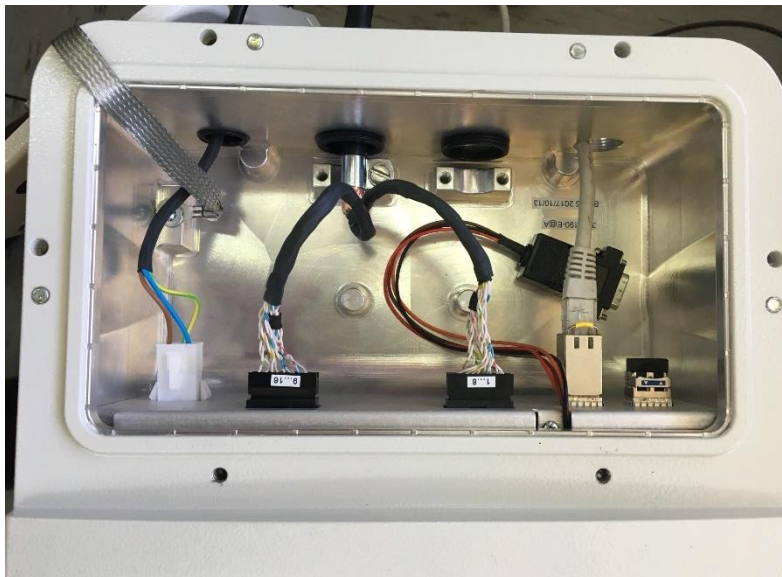
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά εξοπλισμού μετρήσεων



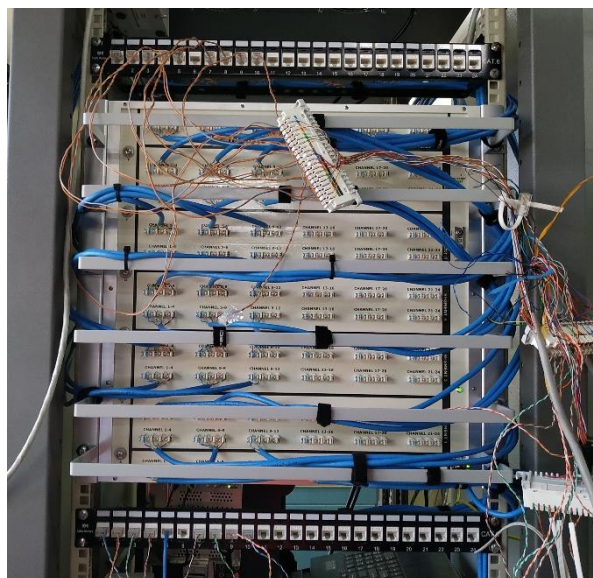
Σχήμα 5.1: Κάτοψη εξοπλισμού G.fast



Σχήμα 5.2: Πλαινή όψη εξοπλισμού G.fast



Σχήμα 5.3: Εσωτερική καλωδίωση εξοπλισμού G.fast



Σχήμα 5.4: Distance Creator

Στα πειράματα, όπου χρειάστηκε η μέτρηση της επίδοσης του G.fast σε πολλαπλά μήκη βρόχου, χρησιμοποιήθηκε ο «distance creator» για τη δημιουργία των διαφόρων μηκών. Η λειτουργία του έγκειται στη δυνατότητα διασύνδεσης των διαφορετικών μηκών για τη δημιουργία του επιθυμητού βρόχου. Αναλυτικά, στο συγκεκριμένο μοντέλο τα διαθέσιμα μήκη είναι 25m, 50m, 100m, 200m και 400m. Επιλέγοντας προς χρήση μερικά από αυτά ή όλα (Σχ.5.5), δημιουργείται αυτόματα η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των βρόχων που δημιουργούνται από το συνδυασμό των μηκών για κάθε μία από τις 24 γραμμές (Σχ.5.6). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συνδυασμοί μηκών που δημιουργούνται περιορίζονται από τη σειρά με την οποία βρίσκονται τα αρχικά μήκη. Δηλαδή, κάθε φορά τα επιλεγμένα μήκη δεν δημιουργούν όλους τους θεωρητικά επιτρεπτούς συνδυασμούς (π.χ. με την επιλογή των μηκών 50m, 25m και 100m τους συνδυασμούς 25m, 50m, 75m, 100m, 125m, 150m και 175m) αλλά μόνο αυτούς που προκύπτουν προσθέτοντας στο μήκος που βρίσκεται «χαμηλότερα» το αμέσως υψηλότερο επιλεγμένο μήκος κ.ο.κ. (άρα με την επιλογή των μηκών 50m, 25m και 100m οι διαθέσιμοι συνδυασμοί είναι μόνο 100m, 125m και 175m οι οποίοι θα εμφανιστούν στην drop-down λίστα κάθε καναλιού του Σχ.5.6).

CPE	Check to Add MP	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	LEN INST	ALLOW LENGTH	
5	<input checked="" type="checkbox"/>	200	775	200	775	200	775	200	775	200	775	200	775	200	775	200	775	200	775	200
4	<input checked="" type="checkbox"/>	50	575	50	575	50	575	50	575	50	575	50	575	50	575	50	575	50	575	50
3	<input checked="" type="checkbox"/>	25	525	25	525	25	525	25	525	25	525	25	525	25	525	25	525	25	525	25
2	<input checked="" type="checkbox"/>	400	500	400	500	400	500	400	500	400	500	400	500	400	500	400	500	400	500	400
1	<input checked="" type="checkbox"/>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CO	VG 1	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	VG 2	CH6	CH7	CH8	CH9									

Σχήμα 5.5: Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων μηκών

CHANNEL	LENGTH
1	25
2	25
3	25
4	25
5	25
6	25
7	25
8	25
9	25
10	25
11	Term

Σχήμα 5.6: Επιλογή επιθυμητού μήκους βρόχου για κάθε κανάλι από τις δημιουργηθείσες επιλογές

5.3 Μετρήσεις

5.3.1 Πείραμα 1: Κατανομή ισχύος στο G.fast

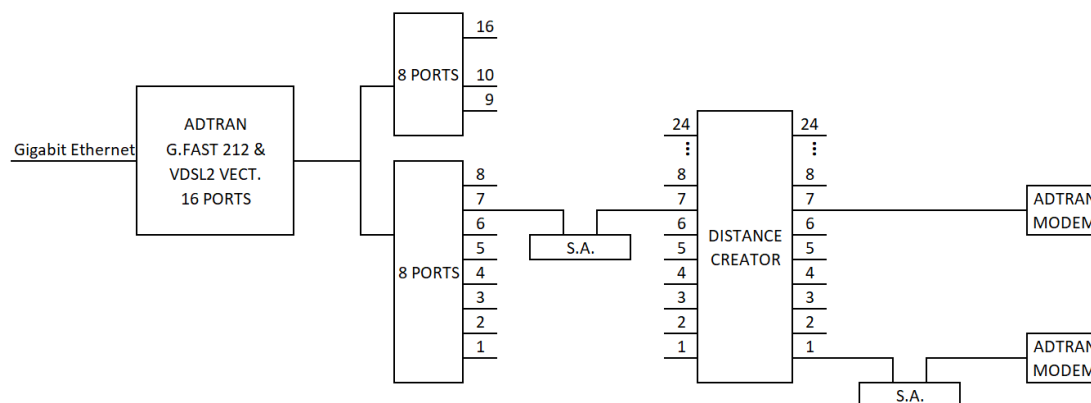
5.3.1.1 Σενάριο

Για τη διαπίστωση της ορθής χρήσης του φάσματος στα δύο προφίλ λειτουργίας του G.fast χρησιμοποιήθηκαν 2 γραμμές συνδρομητών μήκους 25m (θύρα 1 και θύρα 7), στις οποίες εφαρμόστηκαν τα προφίλ 212a και 106a αντίστοιχα, ενώ η κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος καταγράφηκε με τη βοήθεια του αναλυτή φάσματος (κανάλι 1 - μπλε χρώμα: θύρα 7 - προφίλ 106a, κανάλι 2 – μαύρο χρώμα: θύρα 1 - προφίλ 212a). Αρχικά ενεργοποιήθηκε κάθε γραμμή ξεχωριστά και, στη συνέχεια, εξετάστηκε η κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος κατά την ταυτόχρονη λειτουργία των δύο γραμμών (με ενεργό το vectoring).

Μήκος βρόχου	Σταθερό, 25m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 106a G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	1, 2
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz-106MHz (full spectrum profile 106a) 2,2MHz-212MHz (full spectrum profile 212a)
Προφίλ TDD (US/DS ²⁵)	Mds=28 (80/20)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Τεχνική σε λειτουργία	Vectoring (στην ταυτόχρονη λειτουργία 2 γραμμών)
Target SNR	6dB

Πίνακας 5.2: Παράμετροι πειράματος 1

5.3.1.2 Τοπολογία



Σχήμα 5.7: Τοπολογία πειράματος 1

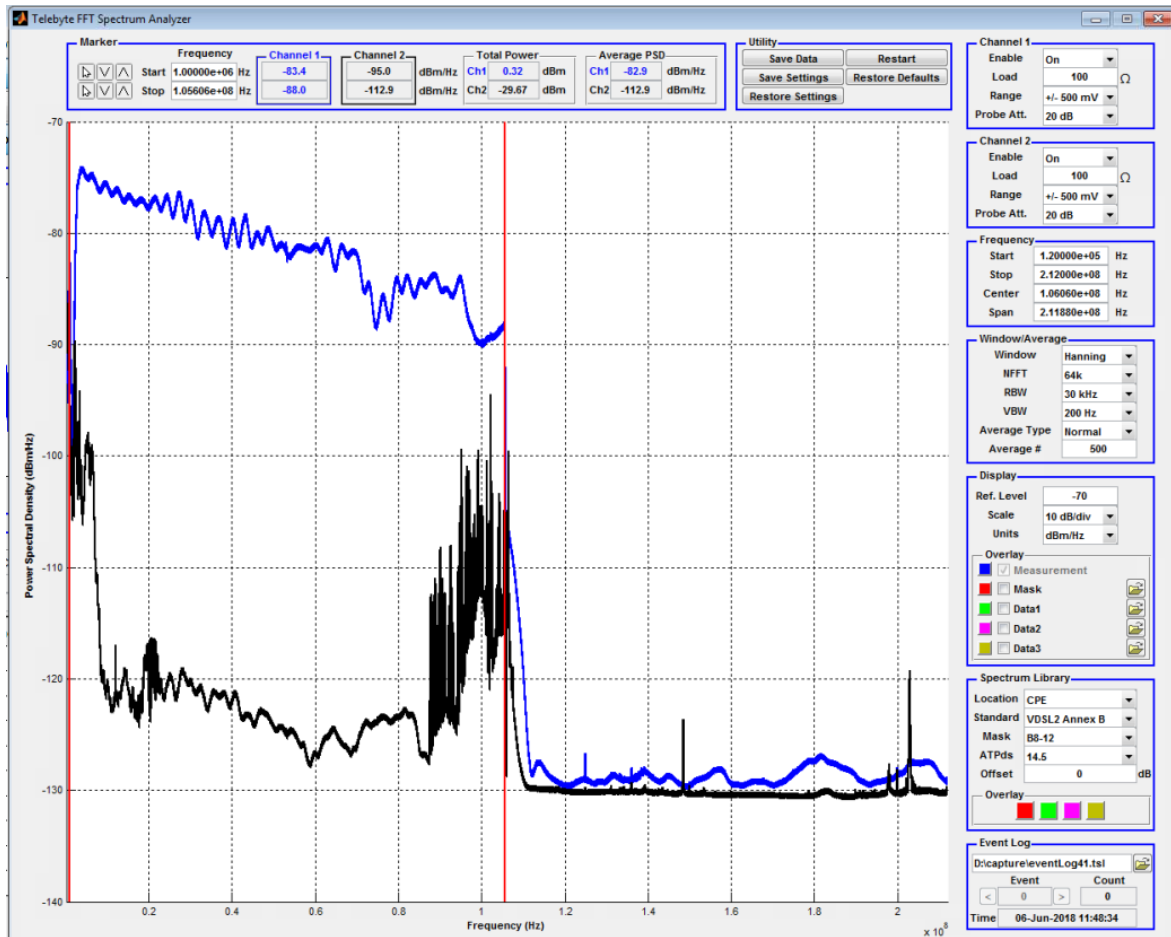
5.3.1.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα

LINES STATE		Rate (Mbps)			SNRm (dB)	
		DS	US	AGGR ²⁶	DS	US
Single Line	106MHz	748,395	202,916	951,311	9,2	7,3
Single Line	212MHz	1344,075	304,315	1648,39	5,9	5,9
Both lines up, vectored	106MHz	749,792	202,927	952,719	7,6	7,7
	212MHz	1316,173	305,74	1621,913	6,5	5,9

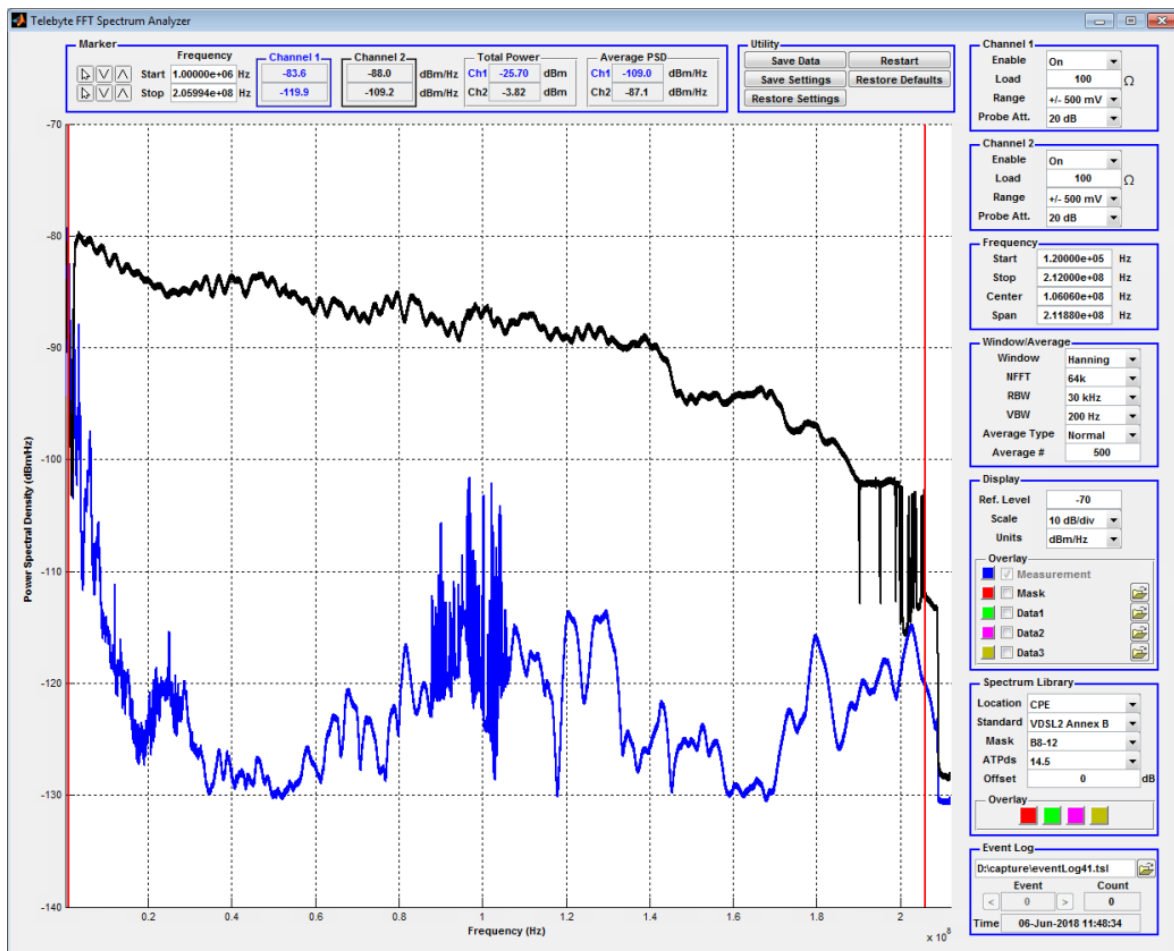
Πίνακας 5.3: Μετρήσεις πειράματος 1

²⁵ US: UPSTREAM, DS: DOWNSREAM

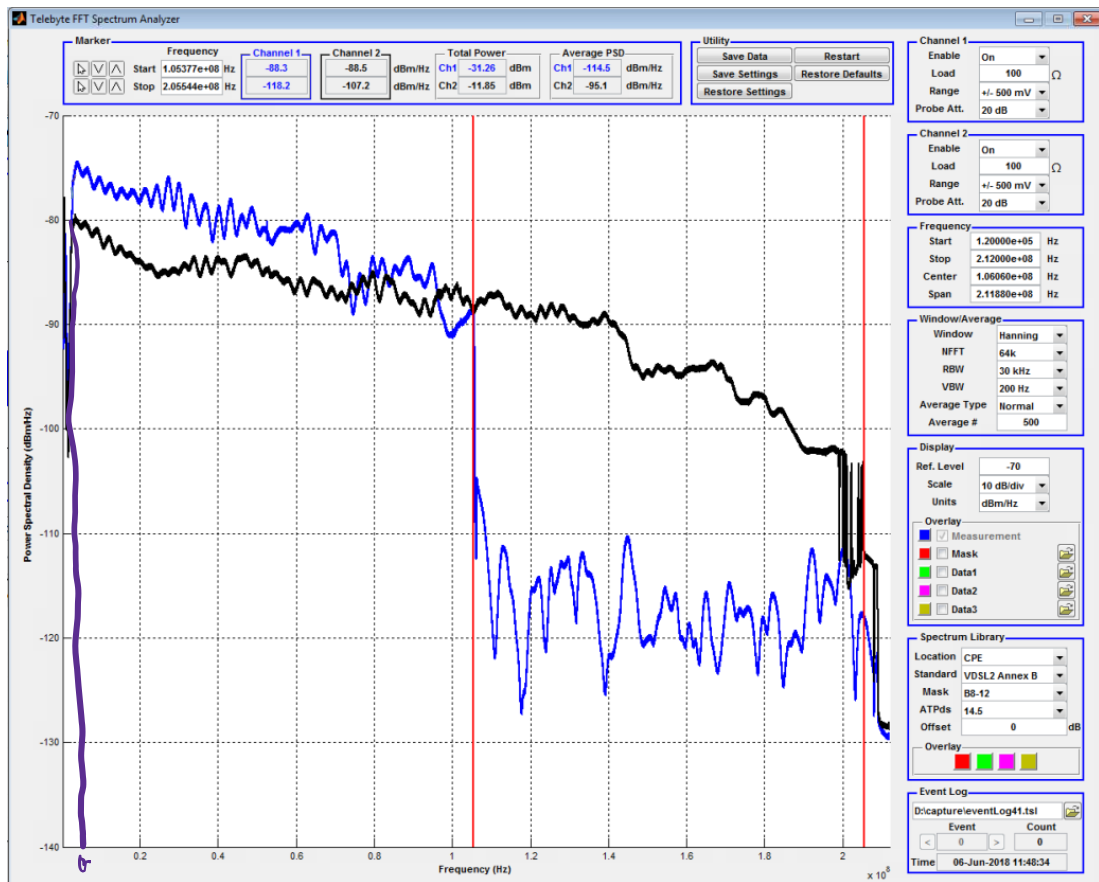
²⁶ AGGR: Aggregate



Σχήμα 5.8: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106a



Σχήμα 5.9: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a



Σχήμα 5.10: Κατανομή ισχύος στα προφίλ 106a και 212a κατά την ταυτόχρονη λειτουργία

5.3.1.4 Συμπεράσματα

Εύκολα φαίνεται από τα Σχ.5.8-5.10 ότι το φάσμα σε κάθε προφίλ χρησιμοποιείται πλήρως, τόσο κατά τη λειτουργία μίας ενεργού γραμμής όσο και κατά την ταυτόχρονη λειτουργία. επίσης, συγκρίνοντας τα Σχ.5.8 και Σχ.5.9 με τα Σχ.3.7 και 3.8 αντίστοιχα, προκύπτει ότι τηρούνται και στην πράξη οι περιορισμοί των οριακών μασκών εντός ζώνης στα δύο προφίλ.

5.3.2 Πείραμα 2: Κατανομή ισχύος στο G.fast με την εφαρμογή φασματικών περιορισμών για την προστασία άλλων υπηρεσιών και υπολογισμός διεκπεραιωτικότητας

5.3.2.1 Σενάριο

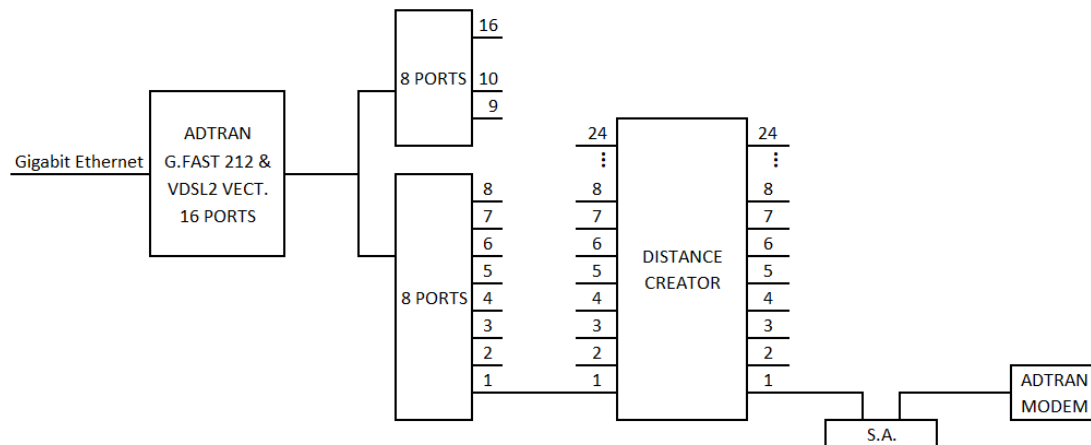
Για τη διαπίστωση της ορθής χρήσης του φάσματος του G.fast κατά την εφαρμογή φασματικών περιορισμών για την προστασία της τεχνολογίας VDSL2 χρησιμοποιήθηκε μία γραμμή συνδρομητή μήκους 25m στην οποία εφαρμόστηκε το προφίλ 212a με και χωρίς φασματικούς περιορισμούς, ενώ η κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος καταγράφηκε με τη βοήθεια του αναλυτή φάσματος (κανάλι 2 – μαύρο χρώμα: θύρα 1). Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν (συχνότητα εκκίνησης 19MHz για την προστασία του VDSL2 17a, συχνότητα εκκίνησης 30MHz για την προστασία του VDSL2 35b) υποδεικνύονται από το ελληνικό σχέδιο διαχείρισης φάσματος.

Για τον υπολογισμό της διεκπεραιωτικότητας (ρυθμός συγχρονισμού/ρυθμός speedtest), μετρήθηκε για κάθε χρησιμοποιούμενο φάσμα (2,2MHz - 212MHz: full spectrum, 19MHz - 212MHz: VDSL 17a mask, 30MHz - 212MHz: VDSL 35b mask) ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης τρεις φορές, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του και κατόπιν διαιρέθηκε με το ρυθμό συγχρονισμού που μετρήθηκε.

Μήκος βρόχου	Σταθερό, 25m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	1
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz - 212MHz (full spectrum) 19MHz - 212MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 212MHz (VDSL 35b mask)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=28 (80/20)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Τεχνική σε λειτουργία	Spectral shaping

Πίνακας 5.4: Παράμετροι πειράματος 2

5.3.2.2 Τοπολογία



Σχήμα 5.11: Τοπολογία πειράματος 2

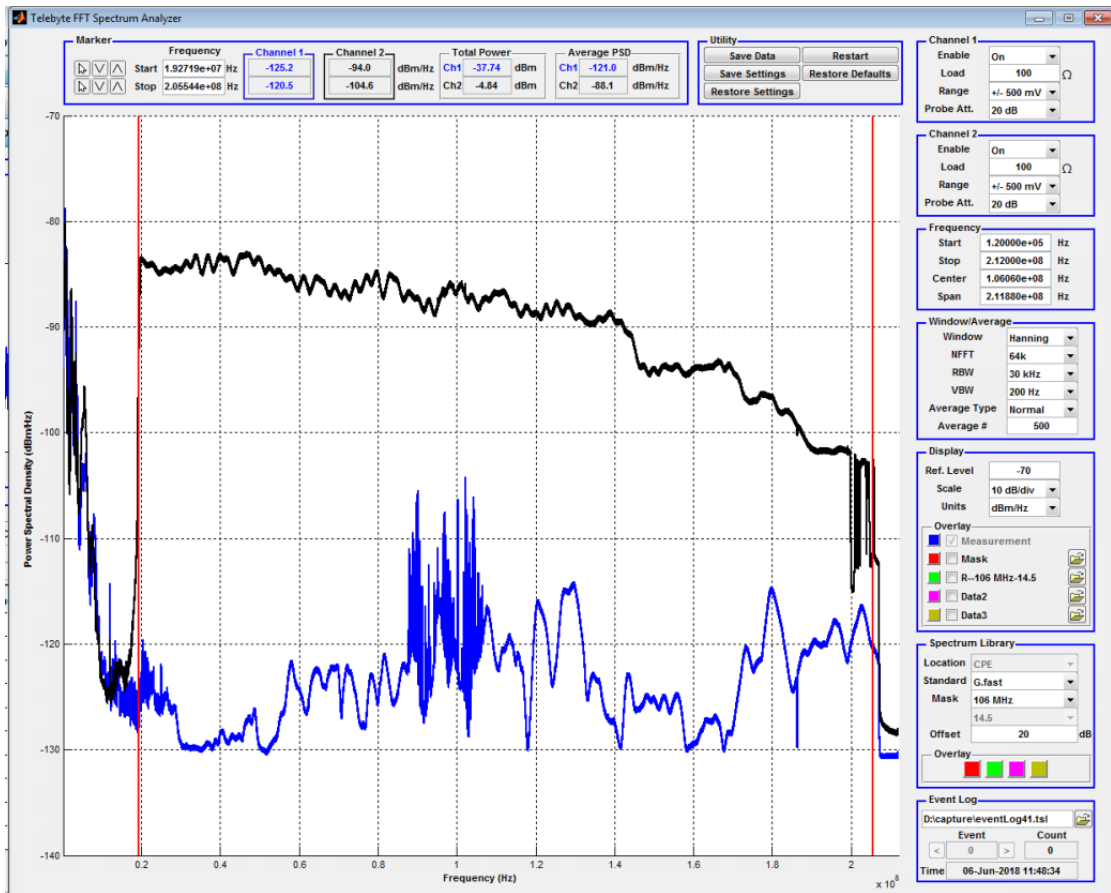
5.3.2.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα

Spectrum (MHz)	1st Speedtest rate (Mbps)			2nd Speedtest rate (Mbps)			3rd Speedtest rate (Mbps)		
	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR
2,2-212	902,90	291,41	1194,31	808,26	261,50	1069,76	894,05	244,06	1138,11
19-212	796,38	295,89	1092,27	839,26	259,69	1098,95	891,10	244,10	1135,20
30-212	806,10	290,24	1096,34	826,68	263,70	1090,38	906,38	247,46	1153,84

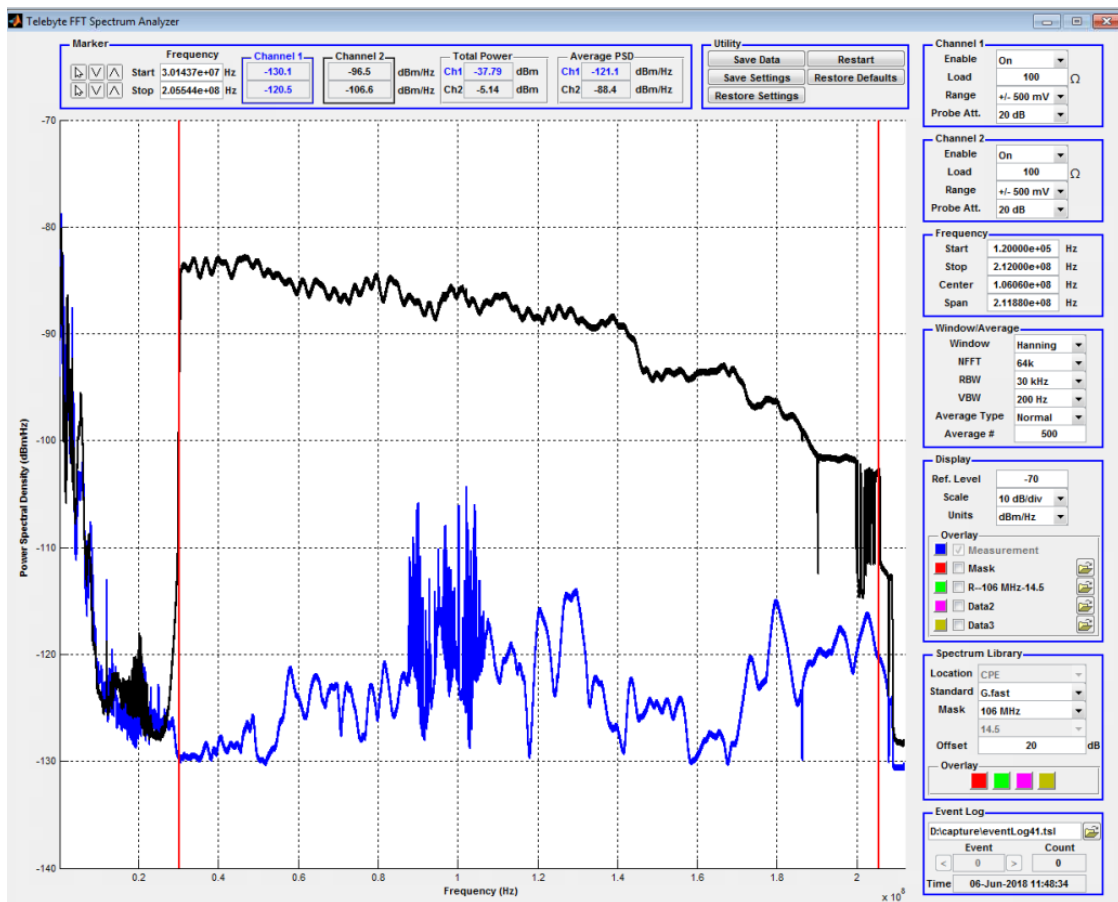
Πίνακας 5.5: Μετρήσεις speedtest

Spectrum (MHz)	Sync Rate (Mbps)			Speedtest average rate (Mbps)			Throughput (Sync/Speedtest average rate)
	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	
2,2-212	1294,576	306,503	1601,079	1001,912	286,471	1288,383	80,47%
19-212	1187,829	275,368	1463,197	941,156	276,983	1218,139	83,25%
30-212	1115,190	256,821	1372,011	915,990	270,254	1186,244	86,46%

Πίνακας 5.6: Μετρήσεις ρυθμού συγχρονισμού και υπολογισμός διεκπεραιωτικότητας



Σχήμα 5.12: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a με την εφαρμογή φασματικού περιορισμού για την προστασία του VDSL 17a



Σχήμα 5.13: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 212a με την εφαρμογή φασματικού περιορισμού για την προστασία του VDSL 35b

5.3.2.4 Συμπεράσματα

Από τα Σχ.5.12 και Σχ.5.13 φαίνεται ότι οι φασματικοί περιορισμοί πράγματι τηρούνται αυστηρά, ενώ από τις μετρήσεις του ρυθμού συγχρονισμού προκύπτει ότι οι τιμές που επιτυγχάνονται εξακολουθούν να είναι υψηλές (δεδομένης και της χρήσης μικρότερου τμήματος του φάσματος). Βέβαια, καθώς η μέγιστη ταχύτητα uplink είναι 1Gbps, δεν είναι δυνατό να μετρηθούν ρυθμοί μετάδοσης ανώτεροι του 1Gbps. Ως εκ τούτου, η διεκπεραιωτικότητα που υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση ενδέχεται να είναι ελαφρώς υψηλότερη από την πραγματική.

5.3.3 Πείραμα 3: Προσαρμογή του ρυθμού μετάδοσης βάση του αριθμού των χρονοθυρίδων που διατίθενται σε κάθε ζεύξη και βάση των περιορισμών στο ρυθμό

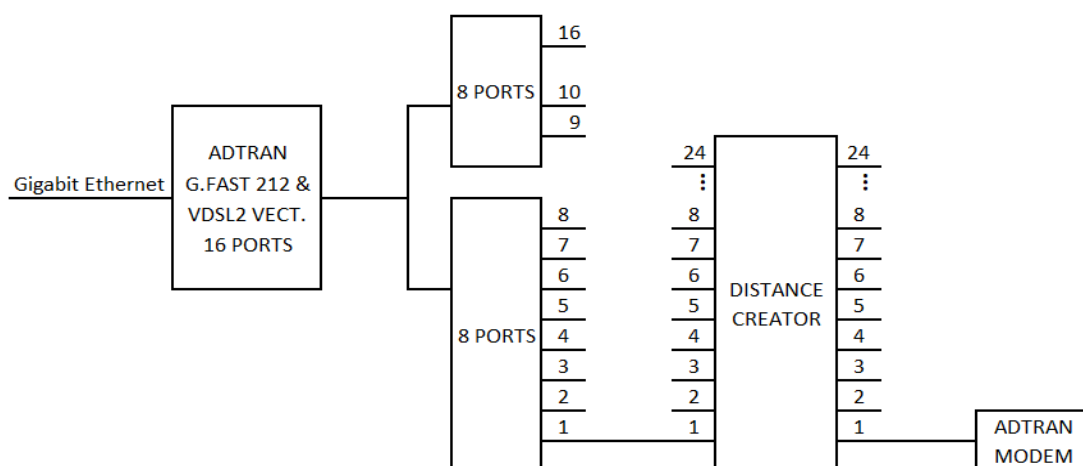
5.3.3.1 Σενάριο

Για τη μέτρηση του ρυθμού μετάδοσης του G.fast εφαρμόστηκαν δύο σενάρια κατανομής του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων χρονοθυρίδων (Εν.4.4.3.6) στην άνω και κάτω ζεύξη και, με δεδομένες τις ανωτέρω κατανομές, εφαρμόστηκαν 3 σενάρια περιορισμού του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης άνω και κάτω ζεύξης. Ως αποτέλεσμα, προέκυψαν 6 σενάρια συνδυασμών κατανομής των χρονοθυρίδων και του περιορισμού του ρυθμού μετάδοσης. Οι μετρήσεις έγιναν σε μία ενεργή γραμμή συνδρομητή μήκους 0 μέτρων με προφίλ 212a, χωρίς την εφαρμογή κάποιας μάσκας στο φάσμα (αξιοποιήθηκε όλο το εύρος: 2,2MHz-212MHz).

Μήκος βρόχου	Σταθερό, 0m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	1
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz-212MHz (full spectrum)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=25 (70/30 ²⁷), Mds=18 (50/50 ²⁸)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας, 500Mbps/500Mbps, 500Mbps/200Mbps

Πίνακας 5.7: Παράμετροι πειράματος 3

5.3.3.2 Τοπολογία



Σχ.5.14: Τοπολογία πειράματος 3

²⁷ Για την ακρίβεια $25/35=71,4\%$

²⁸ Για την ακρίβεια $18/35=51,4\%$

5.3.3.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί - Γραφήματα

TDD Profile	Rate limitation DS/US (Mbps/Mbps)	DS (Mbps)	US (Mbps)	AGGR (Mbps)	DS/AGGR Ratio
70/30 (TDD:25/35)	Unlimited	1360,000	553,000	1913,000	71,09%
70/30 (TDD:25/35)	500/500	499,281	499,925	999,206	-
70/30 (TDD:25/35)	500/200	499,372	199,931	699,303	-
50/50 (TDD:18/35)	Unlimited	958,104	921,951	1880,055	50,96%
50/50 (TDD:18/35)	500/500	499,960	499,100	999,060	-
50/50 (TDD:18/35)	500/200	499,111	199,845	698,956	-

Πίνακας 5.8: Μετρήσεις πειράματος 3

5.3.3.4 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του Πιν.5.8. φαίνεται ότι τηρούνται οι περιορισμοί τόσο στο ρυθμό μετάδοσης καθώς δεν υπερβαίνουν τις οριακές τιμές, ενώ στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν περιορισμοί στο ρυθμό από την αναλογία DS/AGGR Ratio φαίνεται ότι τηρείται και το εφαρμοζόμενο προφίλ TDD. Προφανώς, στην περίπτωση των περιορισμών δεν έχει νόημα ο αντίστοιχος υπολογισμός της αναλογίας.

5.3.4 Πείραμα 4: Αποκοπή RFI συχνοτήτων

5.3.4.1 Σενάριο

Για τη μέτρηση της επίδοσης του G.fast με χρήση της τεχνικής RFI notching (Εν.2.3.4.2.) πραγματοποιήθηκε αποκοπή δύο ζωνών συχνοτήτων (της ραδιοφωνίας και της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης). Οι μετρήσεις έγιναν σε μία ενεργή γραμμή συνδρομητή μήκους 0 μέτρων με προφίλ 212a, χωρίς την εφαρμογή κάποιου άλλου περιορισμού στο φάσμα.

Μήκος βρόχου	Σταθερό, 0m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	1
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz-212MHz (full spectrum)
Συχνότητες αποκοπής	87,5MHz -106MHz (Ελληνική ραδιοφωνία) και 174MHz -212MHz (Επίγεια ψηφιακή τηλεόραση)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=25 (70/30)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Τεχνική σε λειτουργία	RFI Notching

Πίνακας 5.9: Παράμετροι πειράματος 4

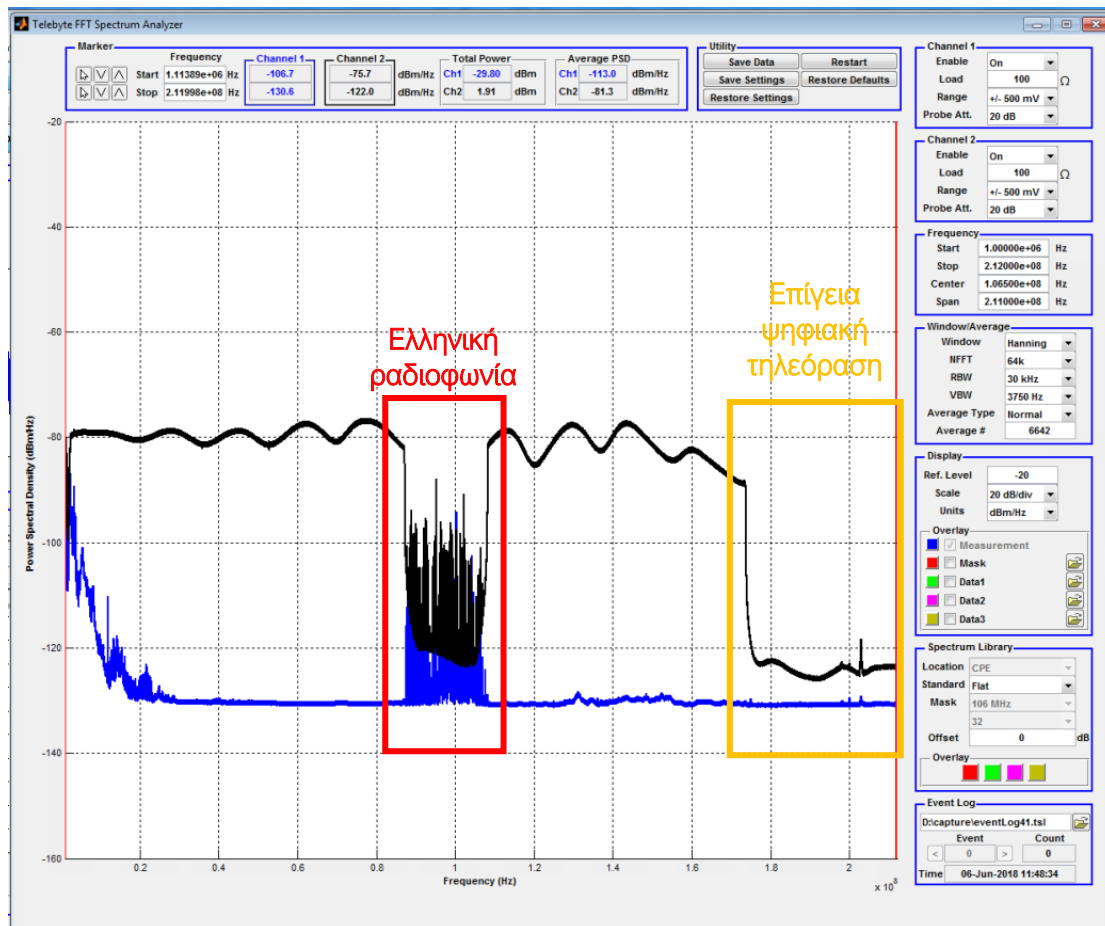
5.3.4.2 Τοπολογία

Η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με του πειράματος 5.3.3 (Σχ.5.14).

5.3.4.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα

	US RATE (Mbps)	US RATE (Mbps)	AGGR RATE (Mbps)
FULL SPECTRUM	1353,599	554,013	1907,612
FULL SPECTRUM - NOTCHED	1089,453	447,728	1537,181
RATE LOSS	264,146	106,285	370,431
RATE LOSS %	19,514%	19,185%	19,419%

Πίνακας 5.10: Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 4



Σχήμα 5.15: Κατανομή ισχύος με την εφαρμογή της τεχνικής RFI notching

5.3.4.4 Συμπεράσματα

Από το Σχ.5.15 φαίνεται ότι οι δύο ζώνες αποκόπτονται πλήρως. Επίσης, παρουσιάζει ενδιαφέρον ότι με την αποκοπή των δύο αυτών ζωνών συχνοτήτων η μείωση του ρυθμού μετάδοσης αγγίζει σχεδόν το 20%.

5.3.5 Πείραμα 5: Επίδραση παρεμβολών του προφίλ VDSL2 17a

5.3.5.1 Σενάριο

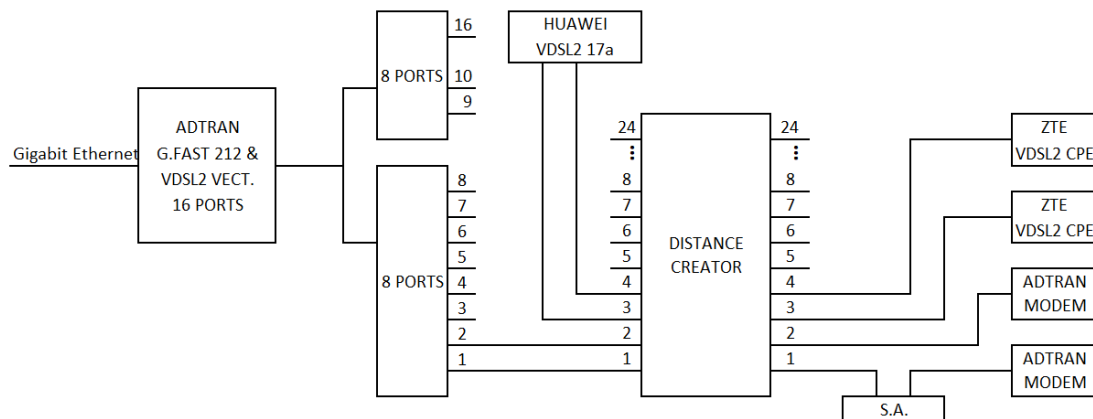
Για τον υπολογισμό της επίδρασης των παρεμβολών του προφίλ VDL17a στο ρυθμό μετάδοσης του G.fast ενεργοποιήθηκαν 2 γραμμές με προφίλ G.fast 212a και 2 γραμμές με προφίλ VDSL2 17a μήκους 25m, οι οποίες οδεύουν μαζί σε όλο το μήκος. Για την καταγραφή της φασματικής πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιήθηκε αναλυτής φάσματος. Επιπλέον, δεν έγινε εφαρμογή κάποιας μάσκας στο φάσμα (αξιοποιήθηκε όλο το εύρος: 2,2MHz-212MHz).

Αρχικά, ενεργοποιήθηκαν μόνο οι δύο γραμμές συνδρομητών G.fast και μετρήθηκε ο ρυθμός μετάδοσης. Στη συνέχεια, ενεργοποιήθηκαν και οι δύο γραμμές συνδρομητών VDSL2 και μετρήθηκε εκ νέου ο ρυθμός μετάδοσης των συνδρομητών του G.fast. Τέλος, απενεργοποιήθηκαν οι δύο παρεμβαλλόμενες γραμμές και μετρήθηκε ξανά ο ρυθμός μετάδοσης των συνδρομητών του G.fast.

Μήκος βρόχου	Σταθερό, 25m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	2
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz-212MHz (full spectrum)
Προφίλ TDD (US/DS)	70/30
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Παρεμβαλλόμενη υπηρεσία	VDSL2 17a, 2 ενεργοί συνδρομητές
Επικαλυπτόμενο μήκος υπηρεσιών	25m
Τεχνική σε λειτουργία	SRA, FRA, Vectoring
Target SNR	6dB

Πίνακας 5.11: Παράμετροι πειράματος 5

5.3.5.2 Τοπολογία



Σχ.5.16: Τοπολογία πειράματος 5

5.3.5.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα

NO NOISE					
Port	Rate (Mbps)			SNRm	
	DS	US	AGGR	DS	US
GF port 1	1123,185	438,944	1562,129	6,7	5,9
GF port 2	1070,071	438,712	1508,783	7,1	6,0
NOISE					
Port	Rate (Mbps)			SNRm	
	DS	US	AGGR	DS	US
GF port 1	1114,047	421,781	1535,828	6,2	5,2
GF port 2	1061,039	426,769	1487,808	6,2	5,3
REMOVED DISTURBERS					
Port	Rate (Mbps)			SNRm	
	DS	US	AGGR	DS	US
GF port 1	1145,492	438,913	1584,405	6,6	6,0
GF port 2	1098,556	442,951	1541,507	6,3	6,0

Πίνακας 5.12: Μετρήσεις πειράματος 5

Port	AGGR RATE LOSS NO NOISE - NOISE		AGGR RATE GAIN REMOVED DISTURBERS- NOISE		AGGR RATE Δ GAIN-LOSS	
	Mbps	%	Mbps	%	Mbps	%
GF port 1	26,301	2%	48,577	3%	22,276	1%
GF port 2	20,975	1%	53,699	4%	32,724	2%

Πίνακας 5.13: Υπολογισμοί πειράματος 5

5.3.5.4 Συμπεράσματα

Από το πείραμα 5 διαπιστώθηκε η λειτουργία των μηχανισμών FRA και SRA (Εν.3.3.10.1, Εν.3.3.10.5). Οι ρυθμοί μετάδοσης των συνδρομητών του G.fast προσαρμόστηκαν χάρη στο SRA χωρίς να υπάρξει ανάγκη για επανασυγχρονισμό, ενώ στιγμιαία ο ρυθμός μετάδοσης στη θύρα 1 ήταν 1.35Gbps (AGGR) υποδηλώνοντας ότι τέθηκε σε εφαρμογή ο μηχανισμός FRA. Επίσης, από τον Πιν.5.12 φαίνεται ότι το SNR διατηρήθηκε μέσα στα επιτρεπτά όρια (± 1 dB from SNR margin) ενώ στον Πιν.5.13 παρουσιάζονται οι απώλειες και τα κέρδη των γραμμών (σε απόλυτες τιμές αλλά και σε ποσοστά) με την προσθήκη και την αφαίρεση των γραμμών VDSL2.

5.3.6 Πείραμα 6: Επίδοση G.fast σε μία ενεργή γραμμή

5.3.6.1 Σενάριο

Για τον υπολογισμό της επίδοσης του G.fast σε μία ενεργή γραμμή συνδρομητή εξετάστηκαν 6 διαφορετικά μήκη βρόχου (0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m). Επί αυτών μετρήθηκε ο ρυθμός μετάδοσης με και χωρίς την εφαρμογή κάποιας μάσκας στο φάσμα (2,2MHz-106MHz, 19MHz-106MHz, 30MHz-106MHz και 2,2MHz-212MHz, 19MHz-212MHz, 30MHz-212MHz) για την προστασία υπηρεσιών VDSL2. Οι μετρήσεις έγιναν και στα δύο διαθέσιμα προφίλ. Για την καταγραφή της φασματικής πυκνότητας ισχύος, χρησιμοποιήθηκε αναλυτής φάσματος. Στην πράξη, το προφίλ 106a εφαρμόστηκε στη θύρα 7 (κανάλι 1 του αναλυτή φάσματος – μπλε χρώμα), ενώ το προφίλ 212a εφαρμόστηκε στη θύρα 1 (κανάλι 2 του αναλυτή φάσματος – μαύρο χρώμα).

Μήκος βρόχου	Μεταβαλλόμενο, 0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 106a και 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	1
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz - 106MHz (full spectrum) 19MHz - 106MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 106MHz (VDSL 35b mask) 2,2MHz - 212MHz (full spectrum) 19MHz - 212MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 212MHz (VDSL 35b mask)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=28 (80/20)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας

Πίνακας 5.14: Παράμετροι πειράματος 6

5.3.6.2 Τοπολογία

Η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με του πειράματος 5.3.1 (Σχ.5.7).

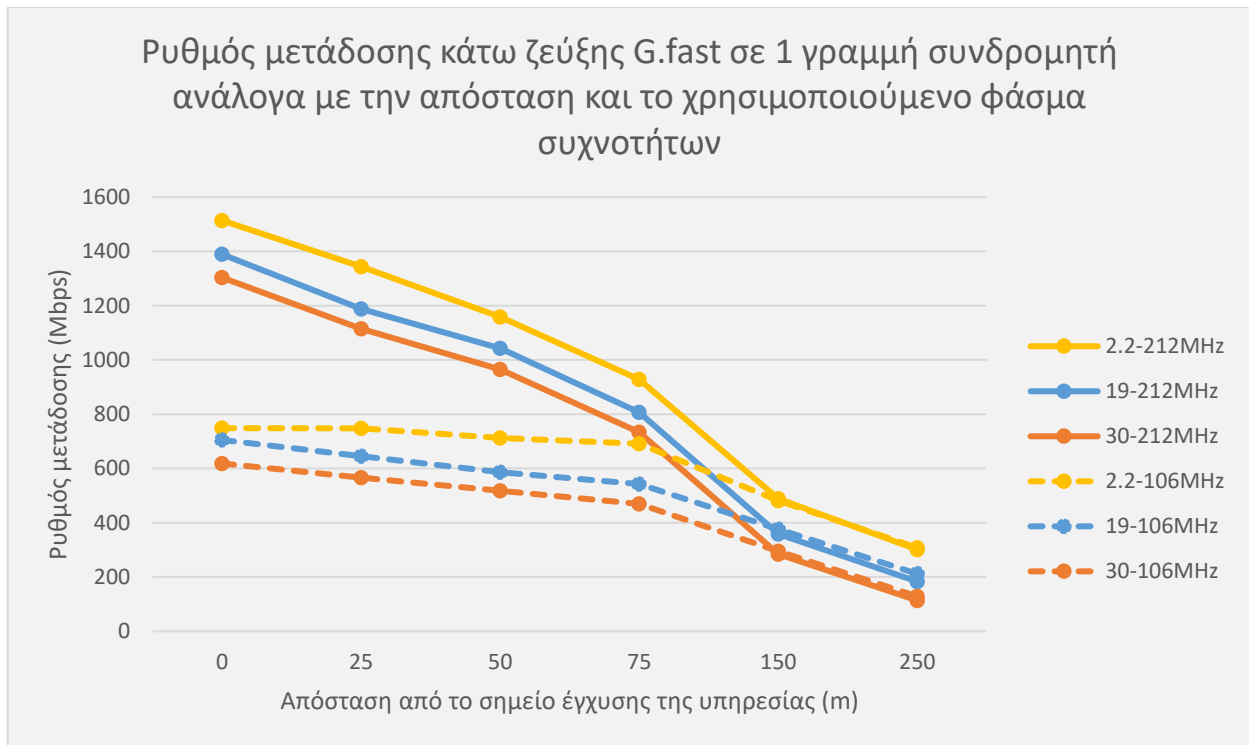
5.3.6.3 Μετρήσεις - Υπολογισμοί – Γραφήματα

Μήκος βρόχου (m)	2.2-106MHz			19-106MHz			30-106MHz		
	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)
0	748,752	202,900	951,652	705,123	184,825	889,948	618,553	158,968	777,521
25	748,395	202,916	951,311	644,992	171,116	816,108	565,815	147,829	713,644
50	712,375	193,159	905,534	585,917	153,389	739,306	518,357	131,645	650,002
75	690,965	168,729	859,694	543,127	128,871	671,998	469,417	108,493	577,910
150	480,797	110,515	591,312	376,556	73,268	449,824	294,776	51,852	346,628
250	307,895	67,640	375,535	211,819	33,925	245,744	128,616	15,932	144,548
Μήκος βρόχου (m)	2.2-212MHz			19-212MHz			30-212MHz		
	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)
0	1514,177	373,252	1887,429	1389,441	339,767	1729,208	1303,659	317,131	1620,790
25	1344,075	304,315	1648,390	1187,829	275,368	1463,197	1115,190	256,821	1372,011
50	1158,565	259,625	1418,190	1043,531	226,417	1269,948	964,543	206,688	1171,231
75	928,049	198,363	1126,412	807,556	164,039	971,595	733,416	144,039	877,455
150	488,011	106,044	594,055	358,176	70,759	428,935	284,825	52,689	337,514
250	301,264	62,367	363,631	183,317	29,383	212,700	113,757	16,169	129,926

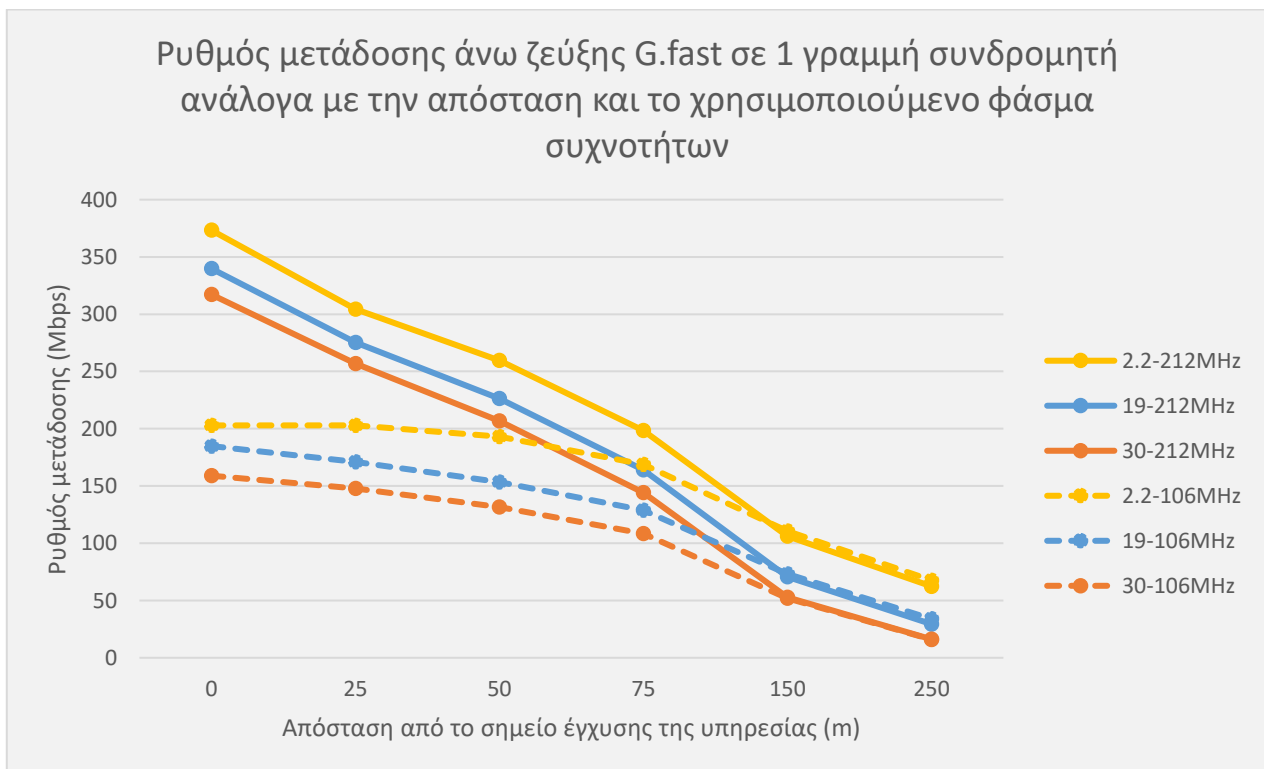
Πίνακας 5.15: Μετρήσεις πειράματος 6

Μήκος βρόχου (m)	2.2-106MHz			19-106MHz			30-106MHz		
	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)
0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
25	99,95%	100,01%	99,96%	91,47%	92,58%	91,70%	91,47%	92,99%	91,78%
50	95,14%	95,20%	95,15%	83,09%	82,99%	83,07%	83,80%	82,81%	83,60%
75	92,28%	83,16%	90,34%	77,03%	69,73%	75,51%	75,89%	68,25%	74,33%
150	64,21%	54,47%	62,14%	53,40%	39,64%	50,54%	47,66%	32,62%	44,58%
250	41,12%	33,34%	39,46%	30,04%	18,36%	27,61%	20,79%	10,02%	18,59%
Μήκος βρόχου (m)	2.2-212MHz			19-212MHz			30-212MHz		
	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)	DS Rate (Mbps)	US Rate (Mbps)	AGGR Rate (Mbps)
0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
25	88,77%	81,53%	87,34%	85,49%	81,05%	84,62%	85,54%	80,98%	84,65%
50	76,51%	69,56%	75,14%	75,10%	66,64%	73,44%	73,99%	65,17%	72,26%
75	61,29%	53,14%	59,68%	58,12%	48,28%	56,19%	56,26%	45,42%	54,14%
150	32,23%	28,41%	31,47%	25,78%	20,83%	24,81%	21,85%	16,61%	20,82%
250	19,90%	16,71%	19,27%	13,19%	8,65%	12,30%	8,73%	5,10%	8,02%

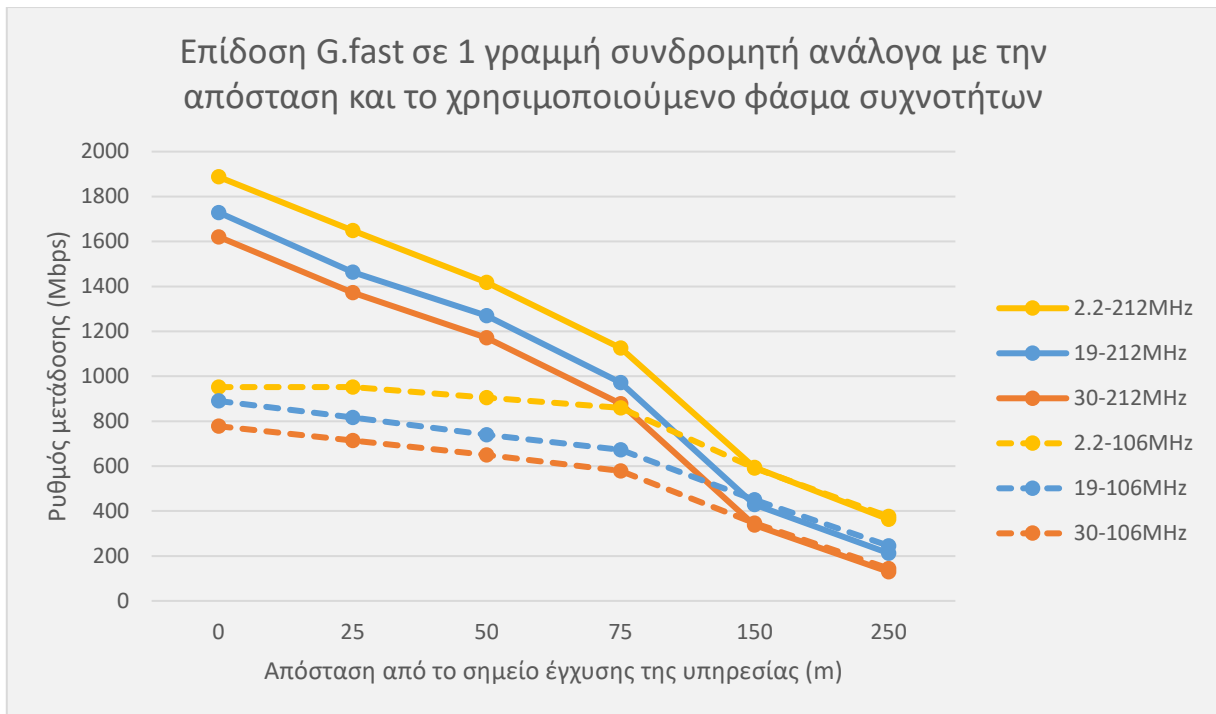
Πίνακας 5.16: Ποσοστό αρχικού ρυθμού μετάδοσης (στα 0 μέτρα) που επιτυγχάνεται συναρτήσει του βρόχου



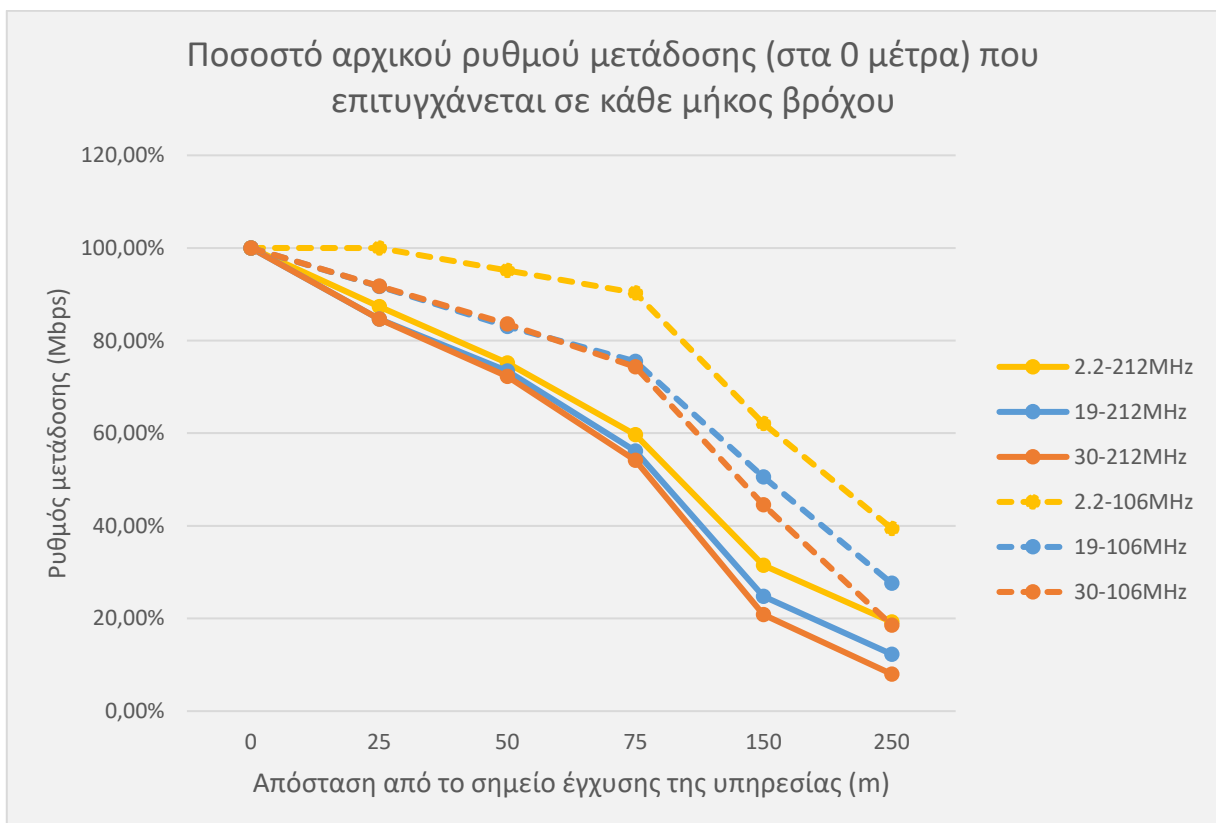
Σχήμα 5.17: Ρυθμός μετάδοσης κάτω ζεύξης G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων



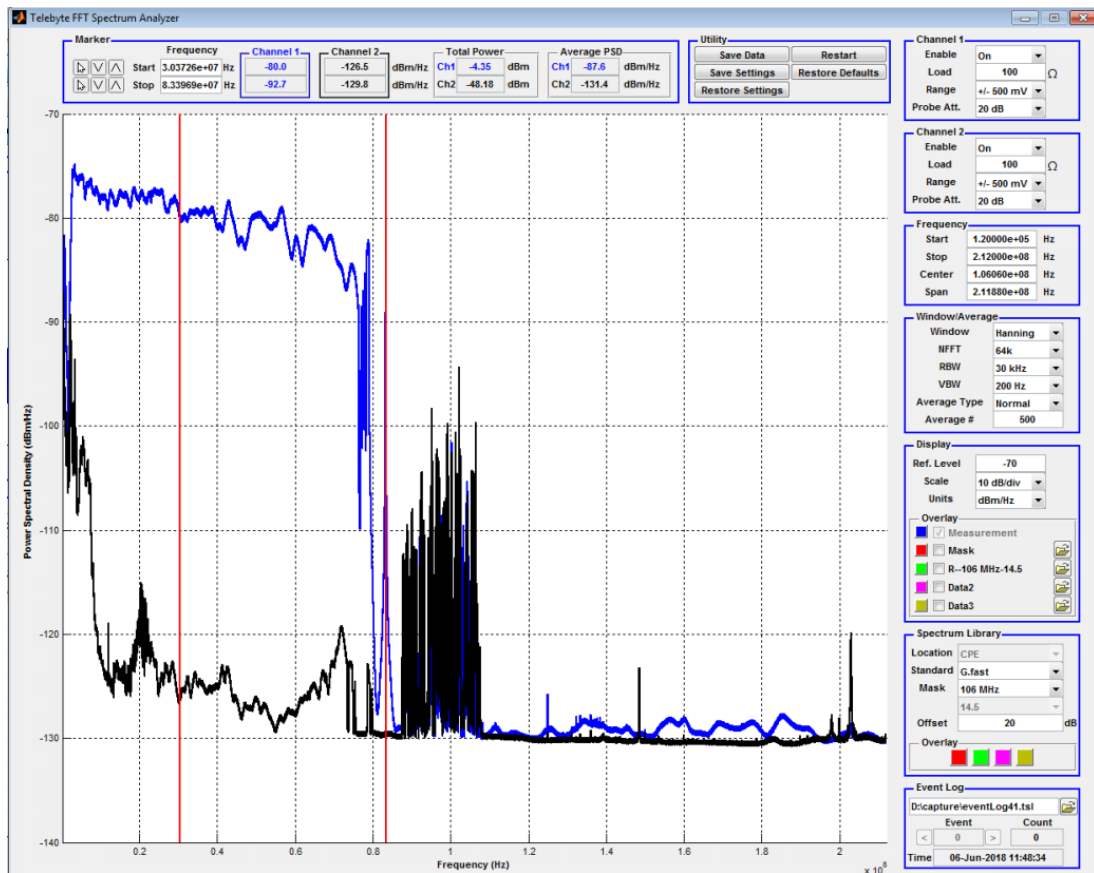
Σχήμα 5.18: Ρυθμός μετάδοσης άνω ζεύξης G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων



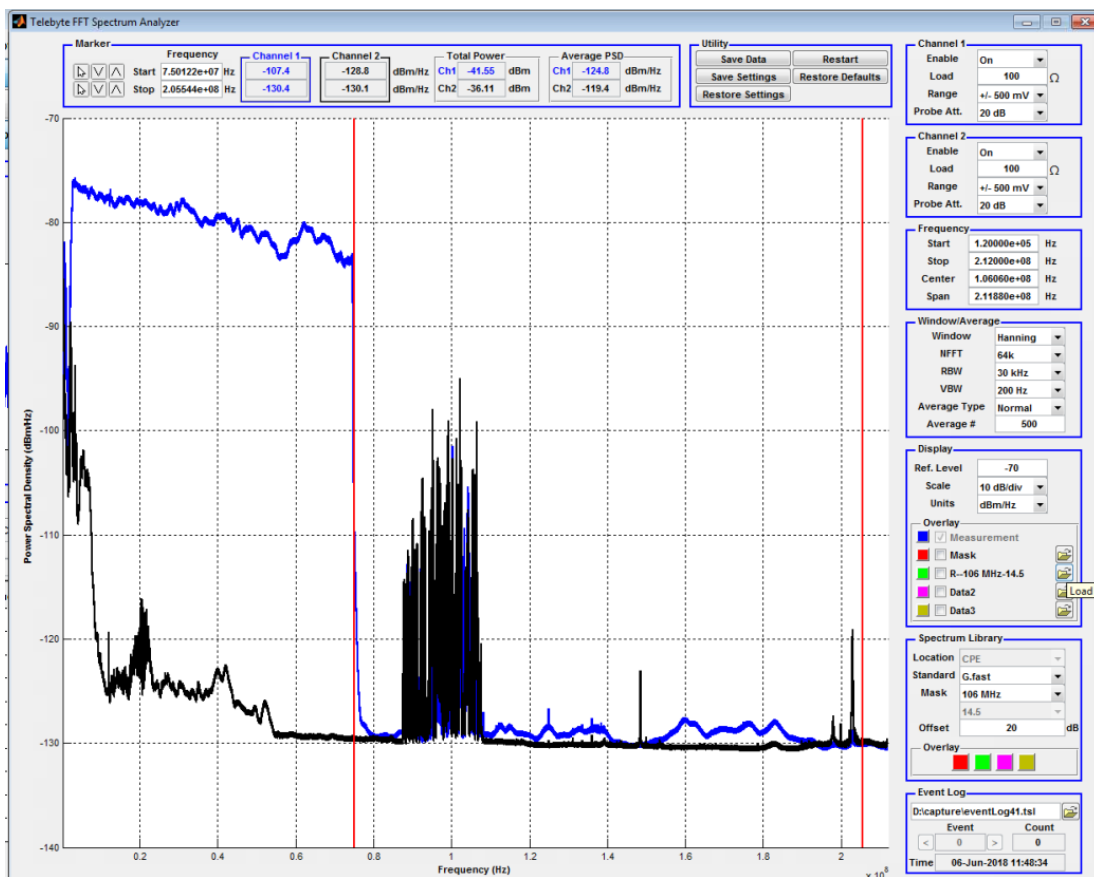
Σχήμα 5.19: Επίδοση G.fast σε 1 γραμμή συνδρομητή συναρτήσει της απόστασης και του χρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων



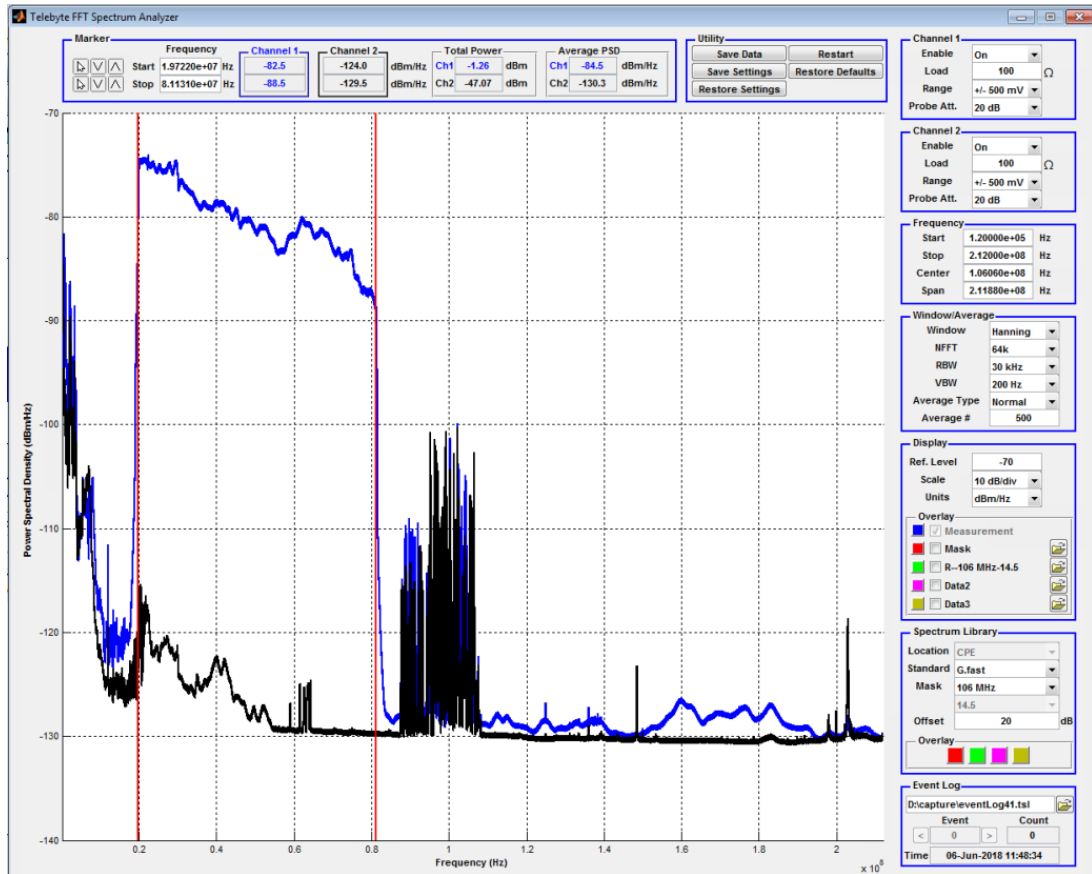
Σχήμα 5.20: Ποσοστό αρχικού ρυθμού μετάδοσης (στα 0 μέτρα) που επιτυγχάνεται συναρτήσει του μήκους βρόχου



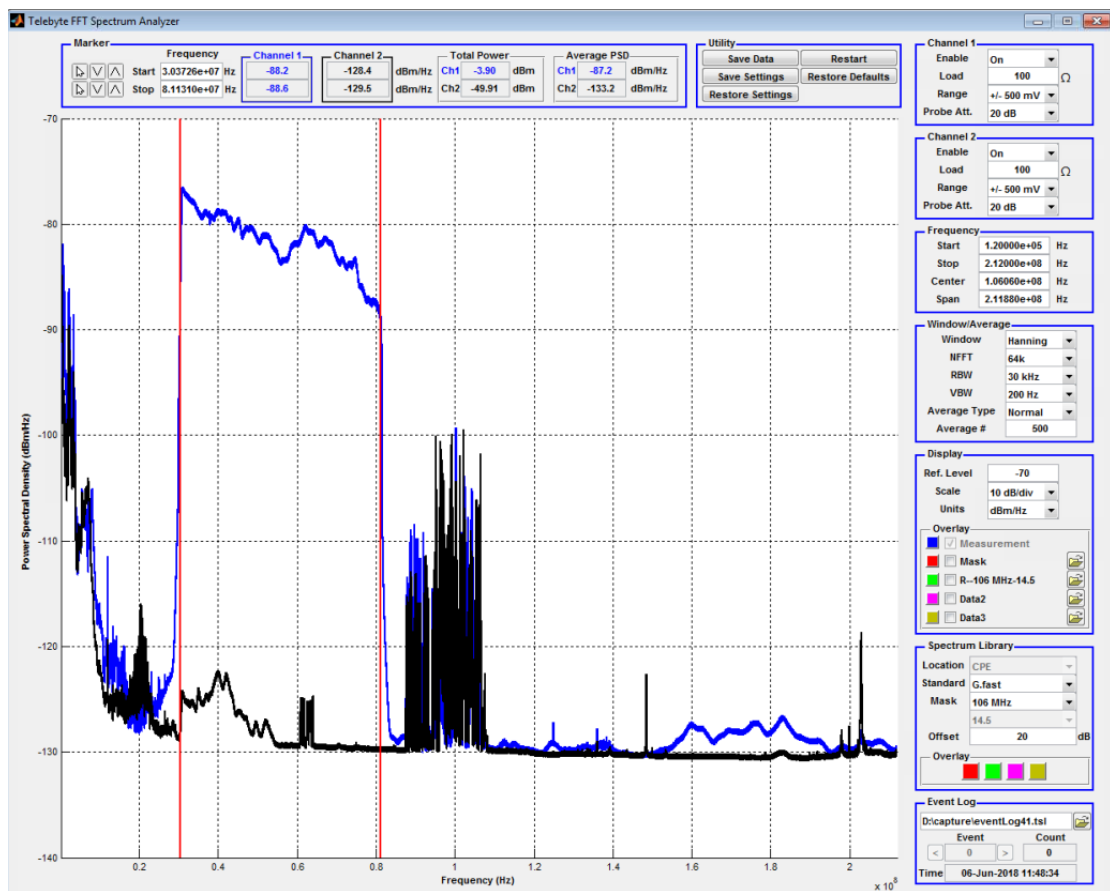
Σχήμα 5.21: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106MHz στα 150m



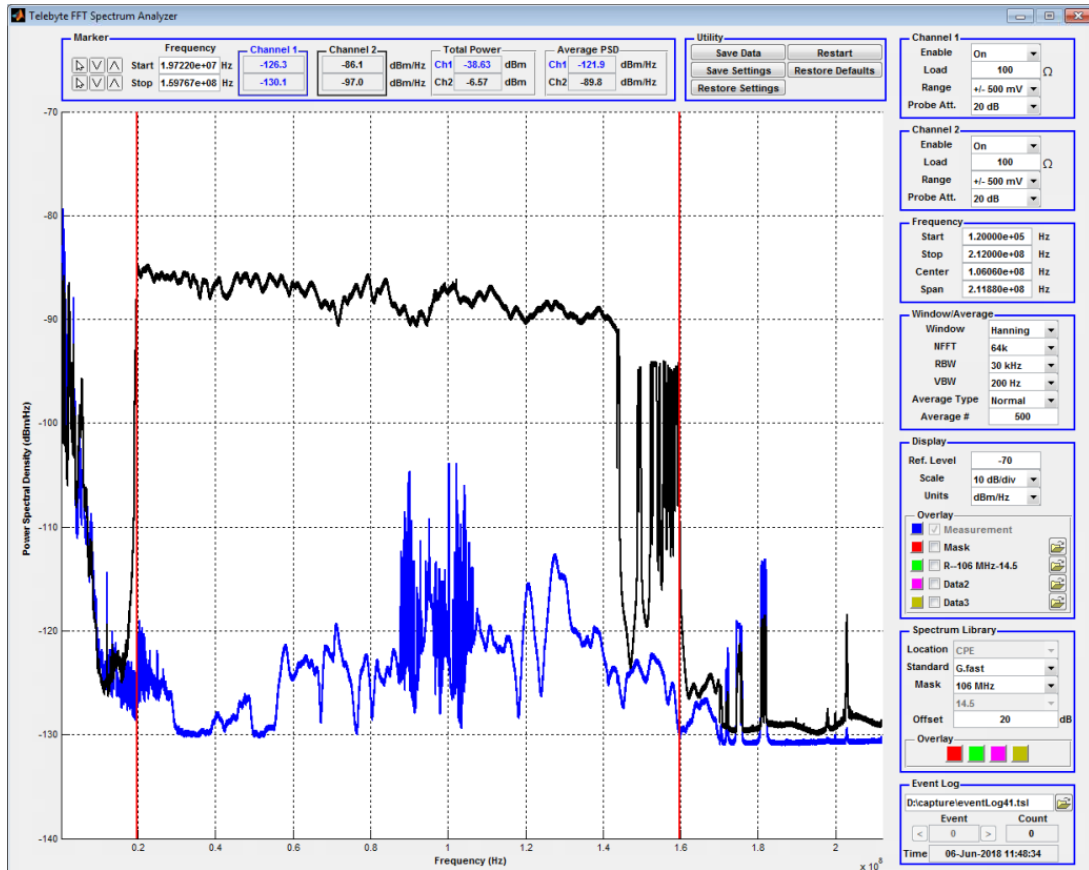
Σχήμα 5.22: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 106MHz στα 250m



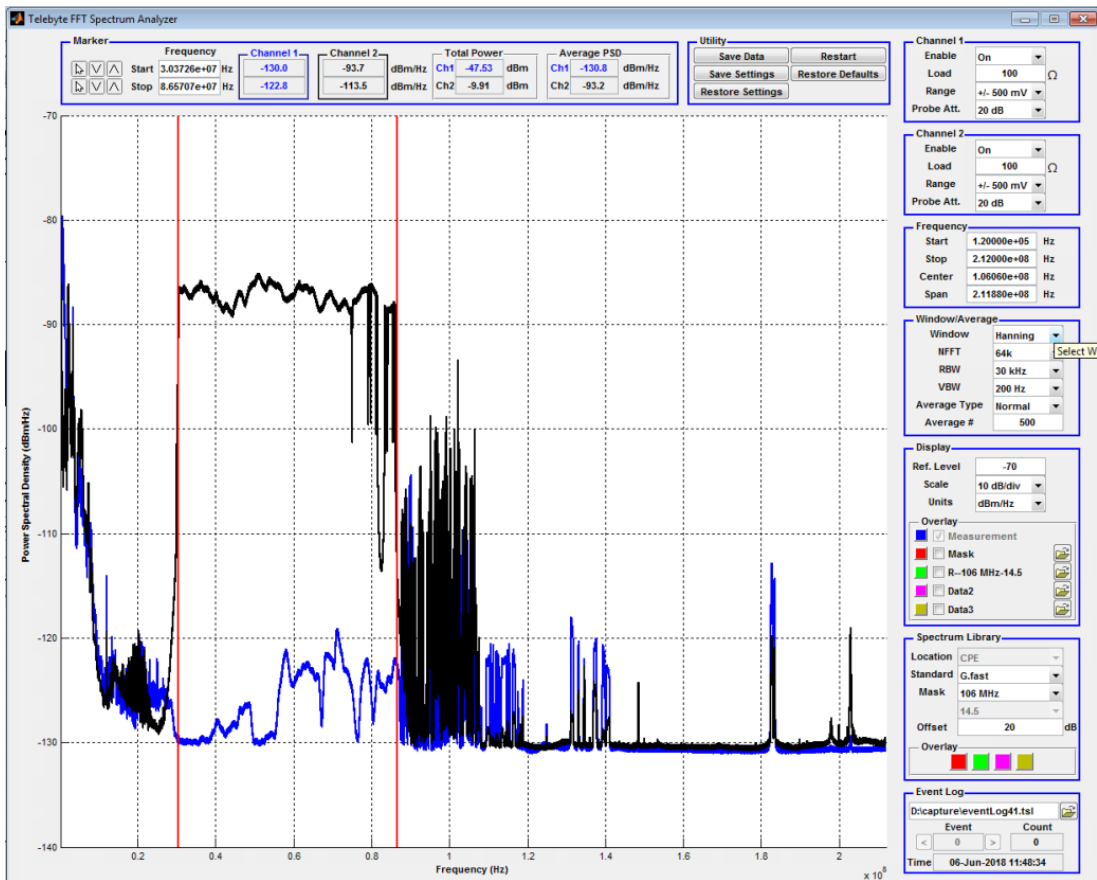
Σχήμα 5.23: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 19-106MHz στα 250m



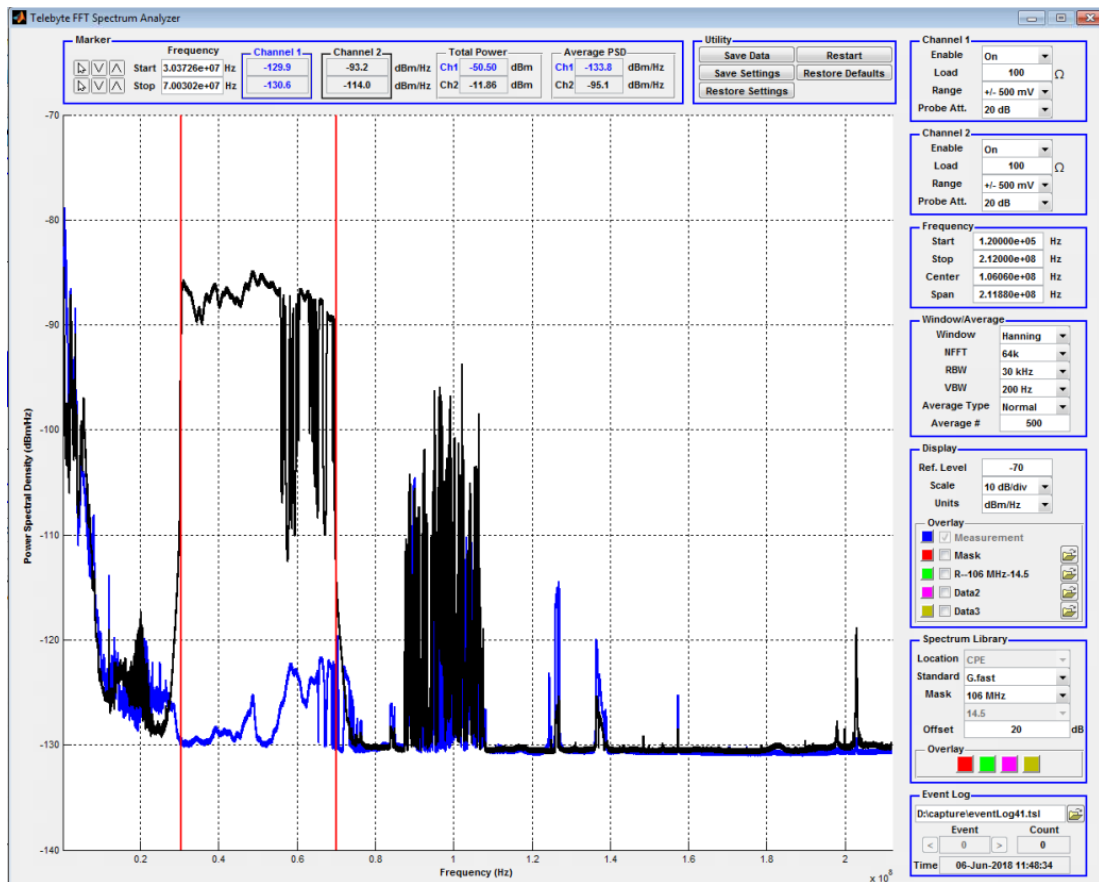
Σχήμα 5.24: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-106MHz στα 250m



Σχήμα 5.25: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 19-212MHz στα 75m



Σχήμα 5.26: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-212MHz στα 150m



Σχήμα 5.27: Κατανομή ισχύος στο προφίλ 30-212MHz στα 150m

5.3.6.4 Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι πράγματι επιτυγχάνονται οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που υπόσχεται το G.fast, οι οποίοι μειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση από το σημείο έγχυσης της υπηρεσίας. Στον Πιν.5.16 φαίνεται το ποσοστό του αρχικού ρυθμού που «επιβιώνει» σε κάθε απόσταση. Δηλαδή, θεωρώντας σε κάθε εφαρμοζόμενο φάσμα ως μέγιστο ρυθμό μετάδοσης αυτόν που μετρείται στα 0m, υπολογίζεται ποιο είναι το ποσοστό αυτού του ρυθμού που επιτυγχάνεται στα υπόλοιπα μήκη βρόχου. Με το χρωματικό κώδικα...

Επιπλέον, από τα Σχ.5.21-Σχ.5.27 φαίνονται τόσο οι αποκομμένες συχνότητες που οφείλονται στους φασματικούς περιορισμούς που έχουν τεθεί για την προστασία του VDSL2, όσο και οι εξασθενημένες συχνότητες, των οποίων ο αριθμός αυξάνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από το σημείο έγχυσης της υπηρεσίας. Ενδεικτικά, στο Σχ.5.26 φαίνεται ότι η συχνότητα εκκίνησης είναι 30,37MHz ενώ τελευταία «ζωντανή» συχνότητα είναι 70,03MHz.

5.3.7 Πείραμα 7: Επίδοση προφίλ 212 G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές

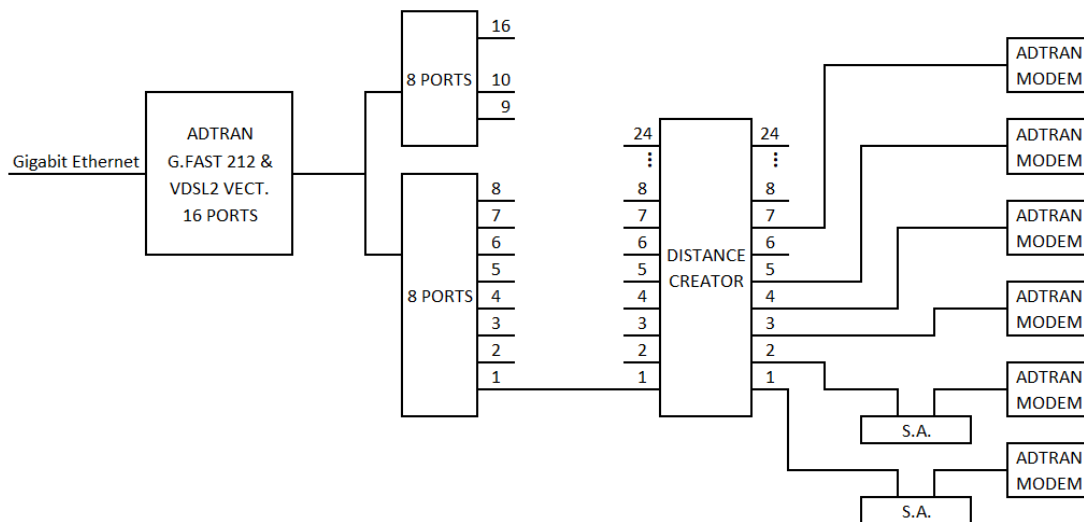
5.3.7.1 Σενάριο

Για τον υπολογισμό της επίδοσης του G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές συνδρομητών (6 ταυτόχρονα), εξετάστηκαν 6 μήκη βρόχου (0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m) με τη χρήση της τεχνικής του vectoring (VECT). Επί αυτών, μετρήθηκε ο ρυθμός μετάδοσης με και χωρίς την εφαρμογή κάποιας μάσκας στο φάσμα (2.2MHz-212MHz, 19MHz-212MHz και 30MHz-212MHz) για την προστασία υπηρεσιών VDSL2. Επίσης εξετάστηκε η επίδοση κάθε γραμμής όταν είναι ενεργή μόνη της (Single Line - SL). Για την καταγραφή της φασματικής πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιήθηκε αναλυτής φάσματος (κανάλι 1 – μπλε χρώμα: θύρα 1, κανάλι 2 – μαύρο χρώμα: θύρα 2).

Μήκος βρόχου	Μεταβαλλόμενο, 0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 212a
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	6
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz - 212MHz (full spectrum) 19MHz - 212MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 212MHz (VDSL 35b mask)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=28 (80/20)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Τεχνική σε λειτουργία	Spectral shaping, Vectoring

Πίνακας 5.17: Παράμετροι πειράματος 7

5.3.7.2 Τοπολογία



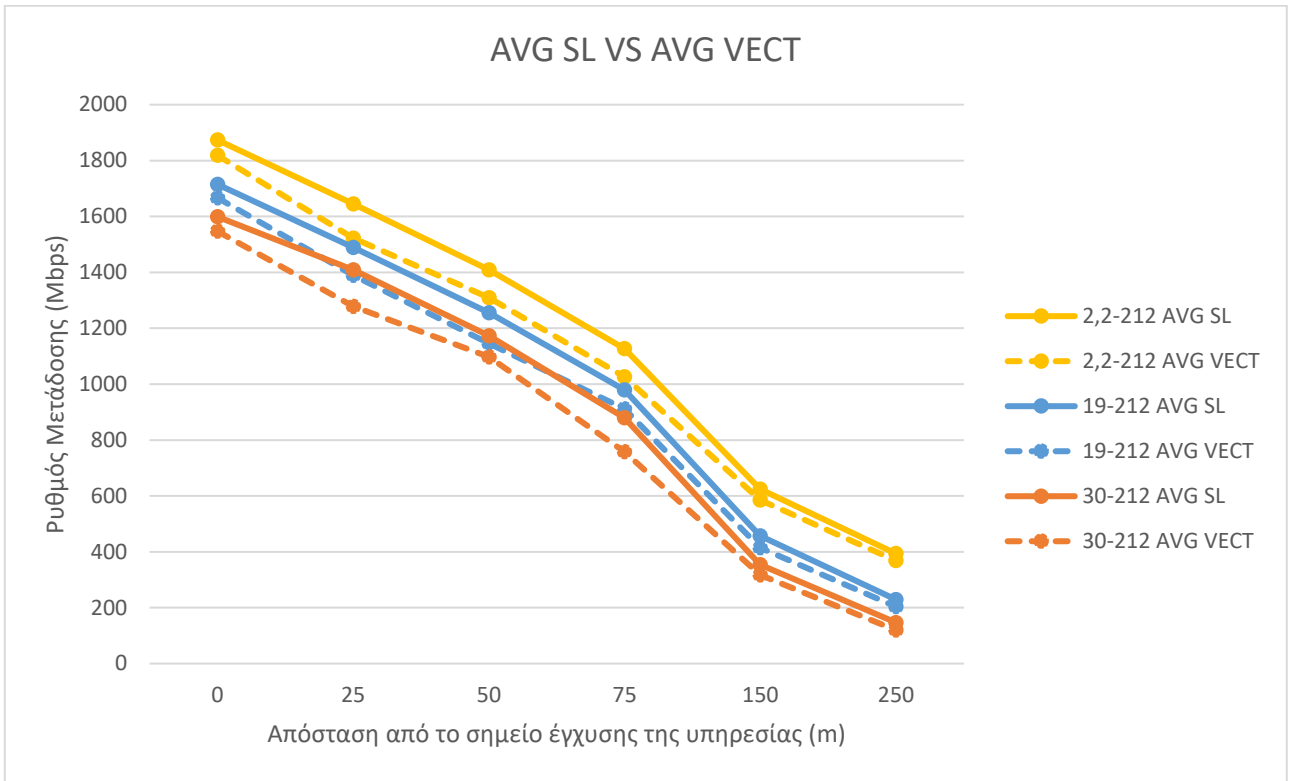
Σχήμα 5.28: Τοπολογία πειράματος 7

30-212MHz																						
LOOP LENGTH	LINE 1 (Mbps)			LINE 2 (Mbps)			LINE 3 (Mbps)			LINE 4 (Mbps)			LINE 5 (Mbps)			LINE 6 (Mbps)			AVERAGE	MIN	MAX	
	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR				
SINGLE LINE	0	1308,220	320,540	1628,760	1279,993	321,459	1601,452	1295,593	329,571	1625,164	1309,900	324,008	1633,908	1309,900	314,489	1624,389	1269,559	210,603	1480,162	1598,973	1480,162	1633,908
	25	1152,843	260,432	1413,275	1107,459	255,497	1362,956	1185,569	277,045	1462,614	1109,413	269,827	1379,240	1188,461	258,812	1447,273	1126,581	261,647	1388,228	1408,931	1362,956	1462,614
	50	998,159	211,009	1209,168	921,553	206,141	1127,694	1005,020	230,807	1235,827	1005,621	234,005	1239,626	921,851	208,411	1130,262	891,963	205,623	1097,586	1173,361	1097,586	1239,626
	75	746,737	149,676	896,413	674,760	139,016	813,776	775,071	167,465	942,536	750,132	169,467	919,599	743,849	153,115	896,964	667,509	144,463	811,972	880,210	811,972	942,536
	150	291,859	52,967	344,826	267,501	49,476	316,977	307,393	61,909	369,302	312,424	59,639	372,063	320,163	63,904	384,067	277,585	55,181	332,766	353,334	316,977	384,067
250	128,665	17,188	145,853	112,061	13,359	125,420	145,808	24,036	169,844	143,603	22,537	166,140	130,055	20,783	150,838	106,327	17,004	123,331	146,904	123,331	169,844	
VECTORED	0	1256,920	313,893	1570,813	1227,257	304,699	1531,956	1235,801	319,657	1555,458	1268,579	316,715	1585,294	1216,993	308,027	1525,020	1210,731	302,939	1513,670	1547,035	1513,670	1585,294
	25	1031,019	250,311	1281,330	990,264	244,805	1235,069	1055,628	260,385	1316,013	1009,203	255,527	1264,730	1080,993	240,199	1321,192	1005,841	242,507	1248,348	1277,780	1235,069	1321,192
	50	926,464	200,179	1126,643	885,620	196,037	1081,657	926,665	217,011	1143,676	927,785	219,709	1147,494	878,140	192,577	1070,717	827,145	185,416	1012,561	1097,125	1012,561	1147,494
	75	567,821	140,917	708,738	664,281	132,253	796,534	577,123	154,317	731,440	688,117	155,860	843,977	667,705	133,927	801,632	540,835	124,465	665,300	757,937	665,300	843,977
	150	266,281	50,463	316,744	248,399	48,324	296,723	266,651	58,085	324,736	268,032	55,955	323,987	291,797	60,176	351,973	239,583	51,409	290,992	317,526	290,992	351,973
250	103,752	15,671	119,423	99,735	12,309	112,044	114,908	20,095	135,003	121,653	20,300	141,953	98,129	19,080	117,209	77,417	15,340	92,757	119,732	92,757	141,953	
VECTORED GAIN	0	96,1%	97,9%	96,4%	95,9%	94,8%	95,7%	95,4%	97,0%	95,7%	96,8%	97,7%	97,0%	92,9%	97,9%	93,9%	95,4%	143,8%	102,3%	96,8%	102,3%	97,0%
	25	89,4%	96,1%	90,7%	89,4%	95,8%	90,6%	89,0%	94,0%	90,0%	91,0%	94,7%	91,7%	91,0%	92,8%	91,3%	89,3%	92,7%	89,9%	90,7%	90,6%	90,3%
	50	92,8%	94,9%	93,2%	96,1%	95,1%	95,9%	92,2%	94,0%	92,5%	92,3%	93,9%	92,6%	95,3%	92,4%	94,7%	92,7%	90,2%	92,3%	93,5%	92,3%	92,6%
	75	76,0%	94,1%	79,1%	98,4%	95,1%	97,9%	74,5%	92,1%	77,6%	91,7%	92,0%	91,8%	89,8%	87,5%	89,4%	81,0%	86,2%	81,9%	86,1%	81,9%	89,5%
	150	91,2%	95,3%	91,9%	92,9%	92,7%	93,6%	86,7%	93,8%	87,9%	85,8%	93,8%	87,1%	91,1%	94,2%	91,6%	86,3%	93,2%	87,4%	89,9%	91,8%	91,6%
250	80,6%	91,2%	81,9%	89,0%	92,1%	89,3%	78,8%	83,6%	79,5%	84,7%	90,1%	85,4%	75,5%	91,8%	77,7%	72,8%	90,2%	75,2%	81,5%	75,2%	83,6%	

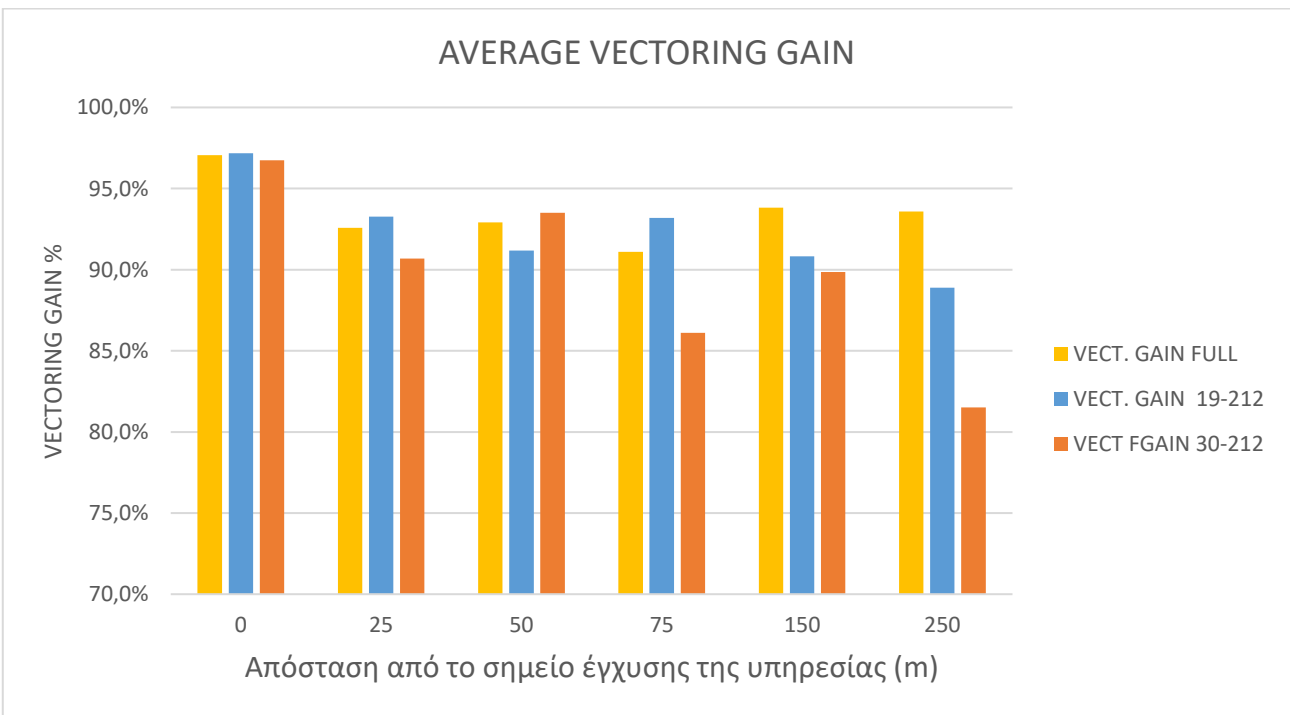
Πίνακας 5.20: Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 7 (30-212MHz)

Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 19-212]					Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 30-212]					Average aggregate rates Δ [19 vs 30]				
LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)	LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)	LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)
0	158,600	151,997	91,53%	91,64%	0	274,532	271,500	85,35%	85,07%	0	115,933	119,503	93,24%	92,83%
25	155,029	133,327	90,57%	91,24%	25	235,482	244,653	85,68%	83,93%	25	80,453	111,326	94,60%	91,99%
50	153,784	164,699	89,09%	87,42%	50	236,104	212,583	83,25%	83,77%	50	82,320	47,885	93,44%	95,82%
75	148,222	114,593	86,85%	88,84%	75	246,916	268,903	78,09%	73,81%	75	98,694	154,310	89,92%	83,08%
150	167,706	171,034	73,13%	70,79%	150	270,834	268,088	56,61%	54,22%	150	103,128	97,054	77,41%	76,59%
250	164,512	164,671	58,20%	55,29%	250	246,642	248,544	37,33%	32,51%	250	82,129	83,873	64,14%	58,81%

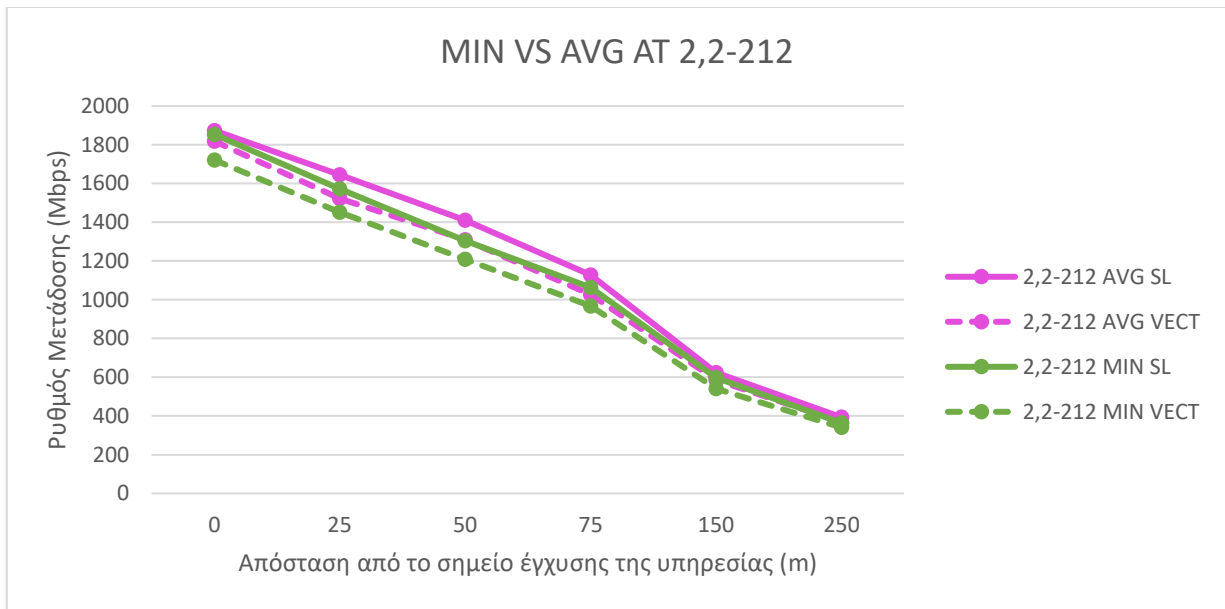
Πίνακας 5.21: Απώλειες ρυθμού μετάδοσης μεταξύ διαφορετικών προφίλ σε κάθε μήκος βρόχου



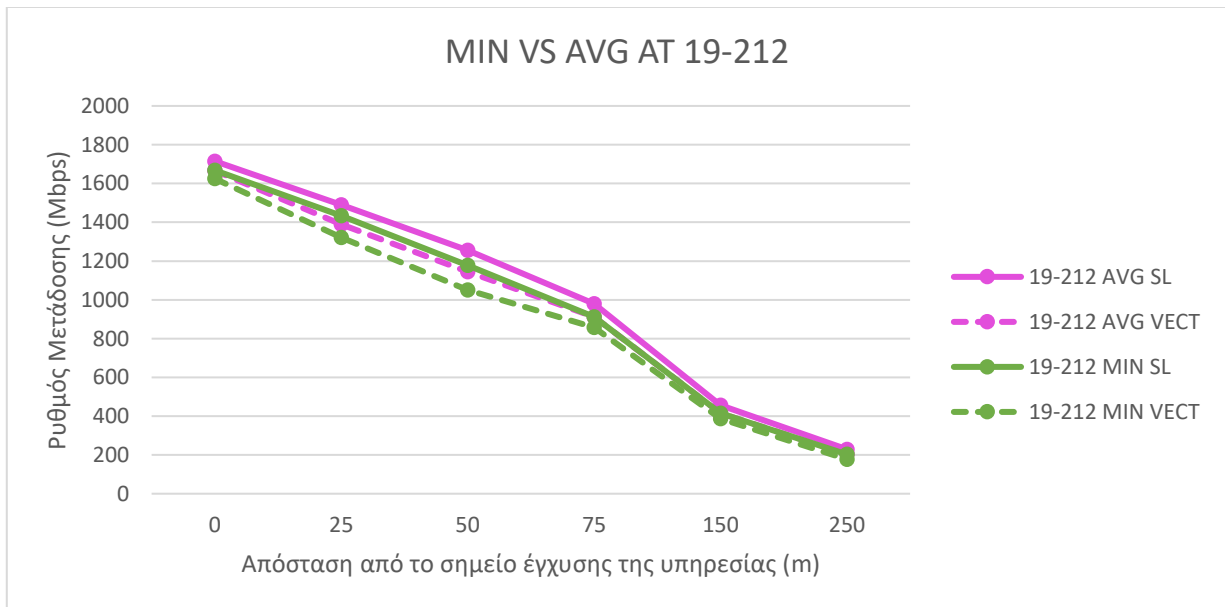
Σχήμα 5.29: AVG SL VS AVG VECT



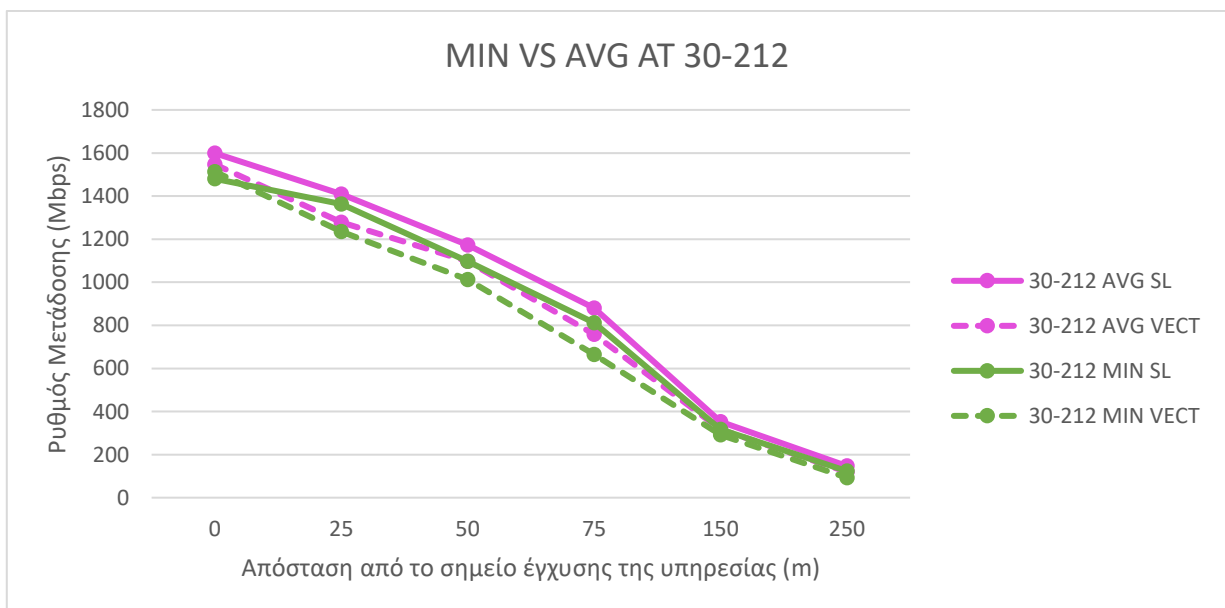
Σχήμα 5.30: AVERAGE VECTORING GAIN



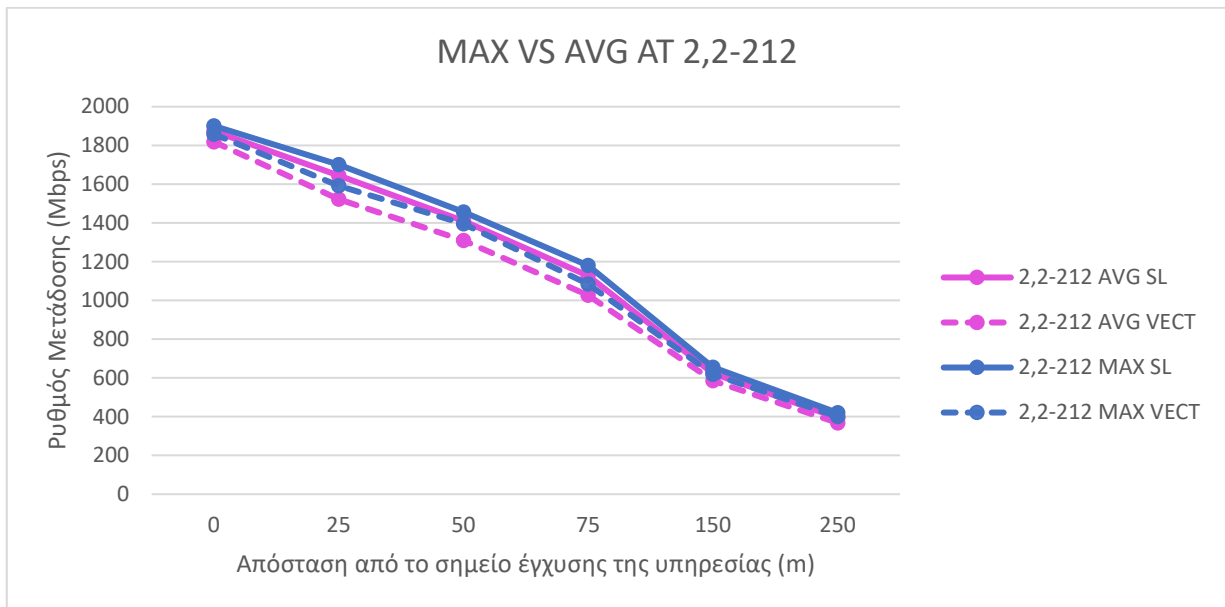
Σχήμα 5.31: MIN VS AVG AT 2.2-212



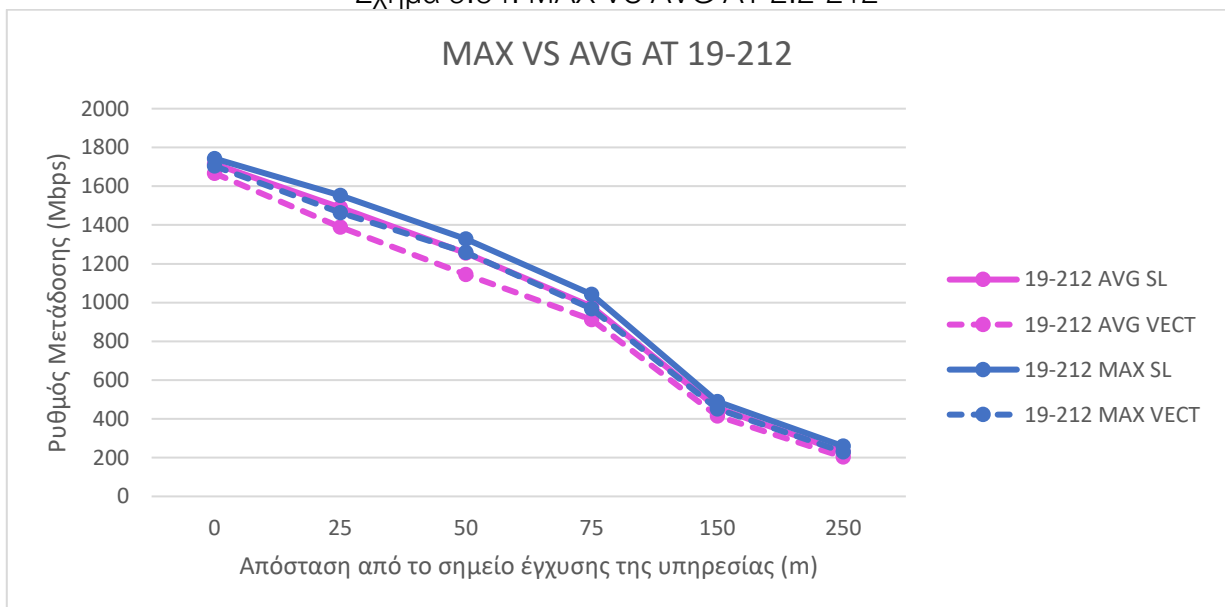
Σχήμα 5.32: MIN VS AVG AT 19-212



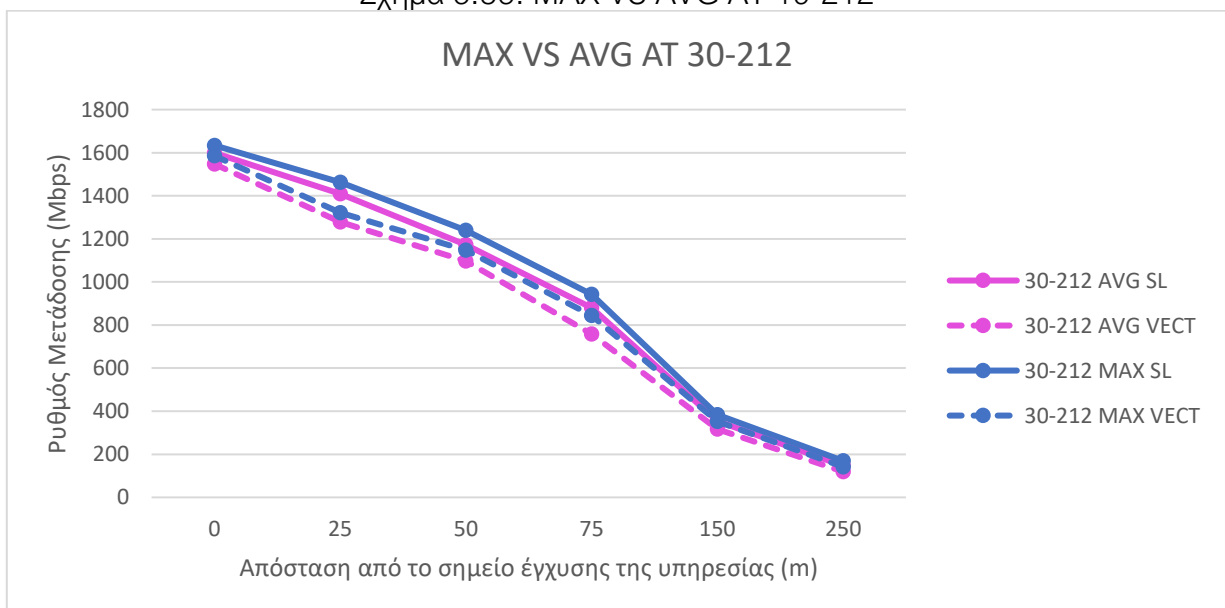
Σχήμα 5.33: MIN VS AVG AT 30-212



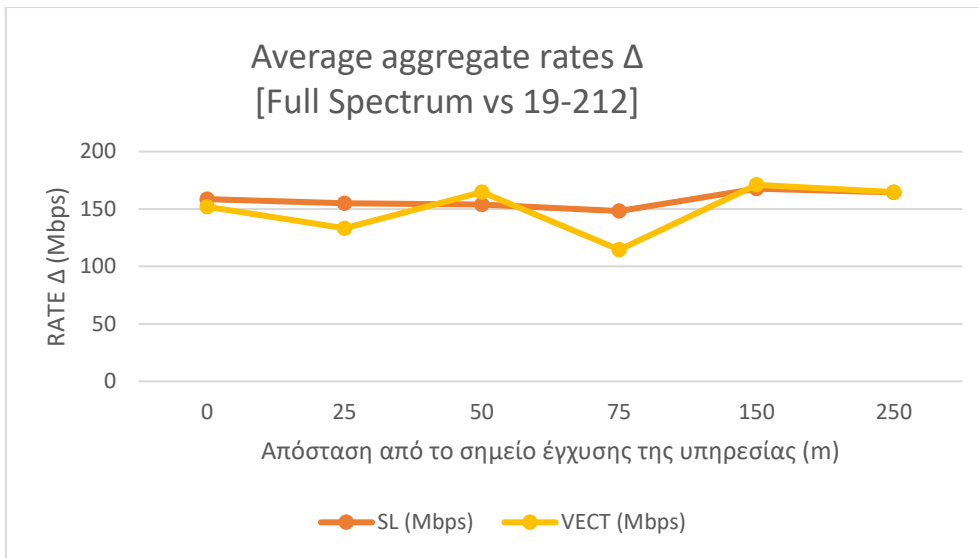
Σχήμα 5.34: MAX VS AVG AT 2.2-212



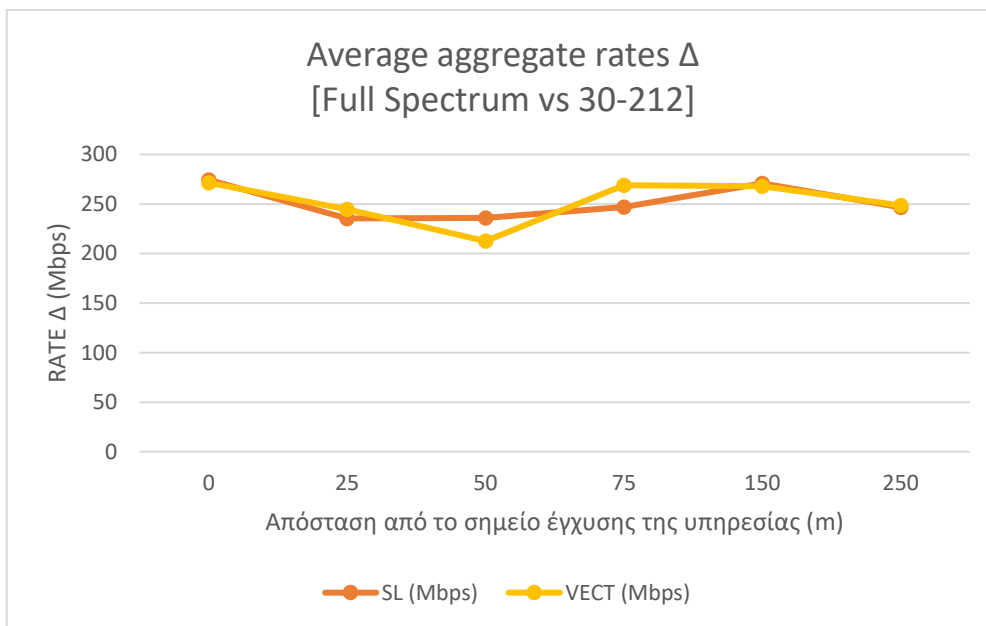
Σχήμα 5.35: MAX VS AVG AT 19-212



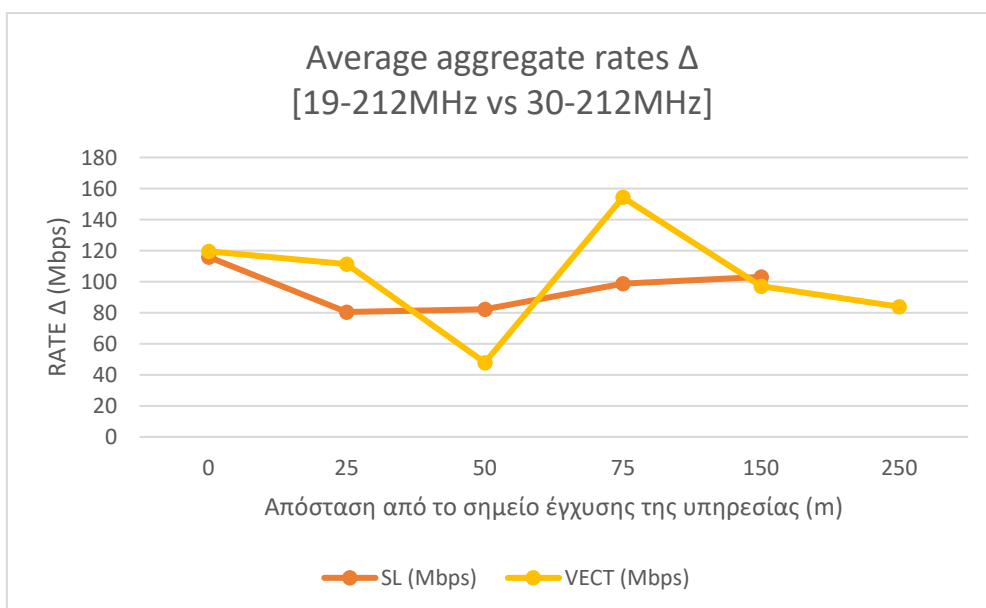
Σχήμα 5.36: MAX VS AVG AT 30-212



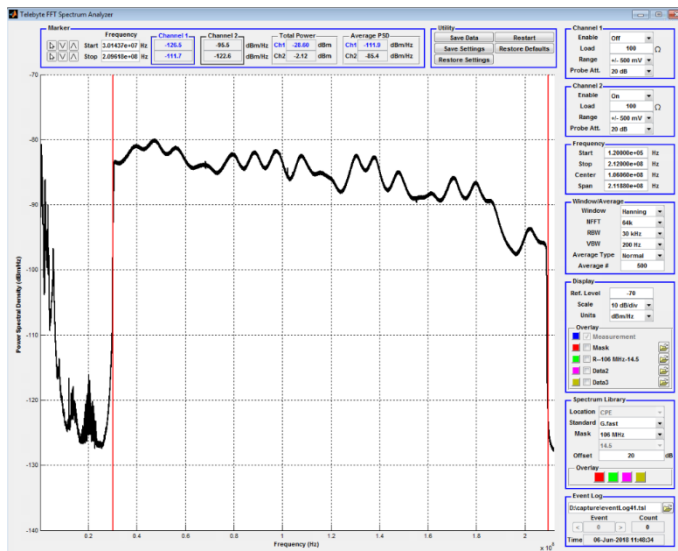
Σχήμα 5.37: Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 19-212]



Σχήμα 5.38: Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs 30-212]



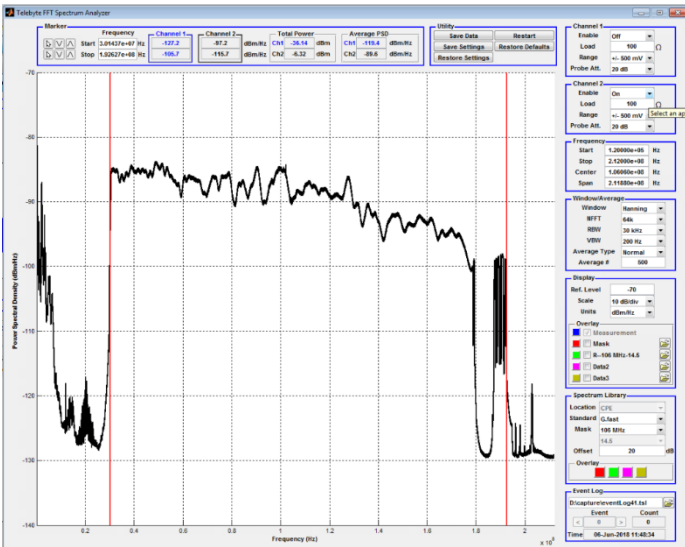
Σχήμα 5.39: Average aggregate rates Δ [19-212 vs 30-212]



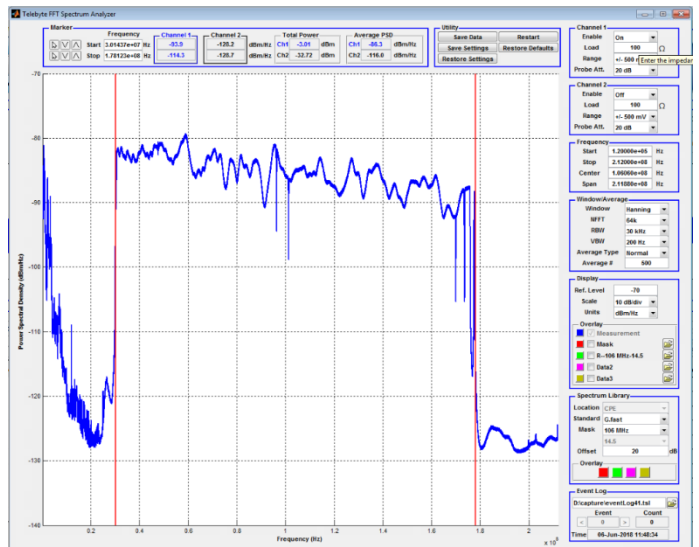
Σχήμα 5.40: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 0m



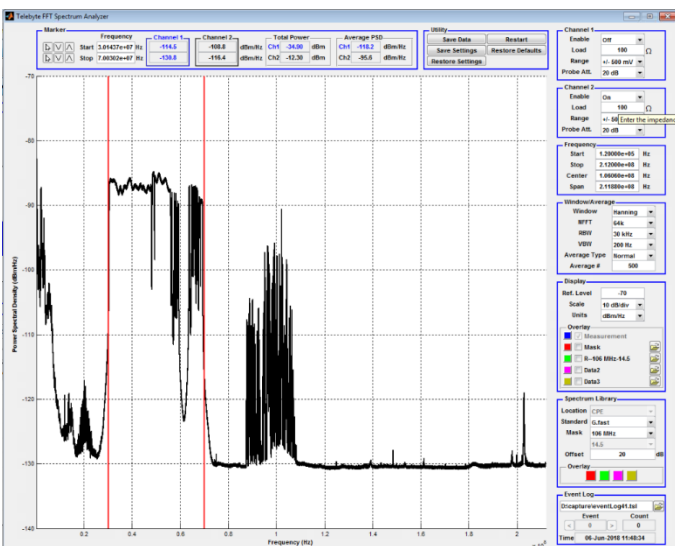
Σχήμα 5.41: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 25m



Σχήμα 5.42: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 50m



Σχήμα 5.43: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 75m



Σχήμα 5.44: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος του προφίλ 30-212 στα 250m

Σχήμα	Θύρα	Μήκος βρόχου	Συχνότητα Έναρξης	Τελευταία Συχνότητα
5.40	2	0m	30,14MHz	209,62MHz
5.41	1	25m	30,14MHz	209,17MHz
5.42	2	50m	30,14MHz	192,63MHz
5.43	1	75m	30,14MHz	178,12MHz
5.44	2	250m	30,14MHz	70,03MHz

Πίνακας 5.22: Ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα του προφίλ 30-212 στα διάφορα μήκη βρόχου

5.3.7.4 Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις του πειράματος 7 και τους υπολογισμούς επί των μετρήσεων, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το G.fast επιτυγχάνει πράγματι πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όχι μόνο κατά τη λειτουργία μίας μόνο γραμμής αλλά και κατά τη ταυτόχρονη λειτουργία πολλών γραμμών, λόγω της λειτουργίας του vectoring. Στους Πιν.5.18-5.20 σημειώνονται με σκούρο πράσινο οι περιπτώσεις όπου το κέρδος vectoring υπερβαίνει το 95%, με ανοικτό πράσινο οι περιπτώσεις όπου το κέρδος vectoring υπερβαίνει το 90%, ενώ με κίτρινο το ελάχιστο κέρδος vectoring (σε συνολικό ρυθμό). Από τη χρωματική αυτή κωδικοποίηση, αλλά και από το Σχ.5.30 συμπεραίνεται η ιδιαίτερα υψηλή απόδοση της τεχνικής αυτής.
- Κατά την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών γραμμών, παρατηρούνται σε όλες τις γραμμές οι αναμενόμενοι ρυθμοί μετάδοσης χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Τα Σχ.5.31-5.36 επιβεβαιώνουν το ανωτέρω συμπέρασμα, καθώς δείχνουν πολύ μικρή απόκλιση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής (ρυθμού μετάδοσης κάποιας γραμμής) από τη μέση τιμή.
- Επίσης, από τα Σχ.5.37-5.39 φαίνεται η επίδραση των μασκών φάσματος για την προστασία του VDSL2 17a στο ρυθμό μετάδοσης. Βάσει αυτών, μπορεί να εξαχθεί ένα ποσοτικό συμπέρασμα για το «tradeoff» (σε Mbps) μεταξύ της προστασίας του VDSL2 και της επίδοσης του G.fast (ενδεικτικά σύμφωνα με το Σχ.5.37 χάνονται σχεδόν σταθερά σε κάθε απόσταση 150Mbps).
- Τέλος, από τα Σχ.5.40-5.44 και τον Πιν.5.22 διαπιστώνεται ότι τηρούνται στην πράξη οι περιορισμοί που τίθενται κάθε φορά στο φάσμα (και μάλιστα με ακρίβεια αφού η συχνότητα έναρξης είναι 30.14MHz στην περίπτωση της μάσκας των 30MHz). Επίσης, φαίνεται και η εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων που καθίσταται εντονότερη με την αύξηση, χαρακτηριστικό που δικαιολογεί τις απώλειες στο ρυθμό μετάδοσης.

5.3.8 Πείραμα 8: Επίδοση G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές (προφίλ 106 & 212)

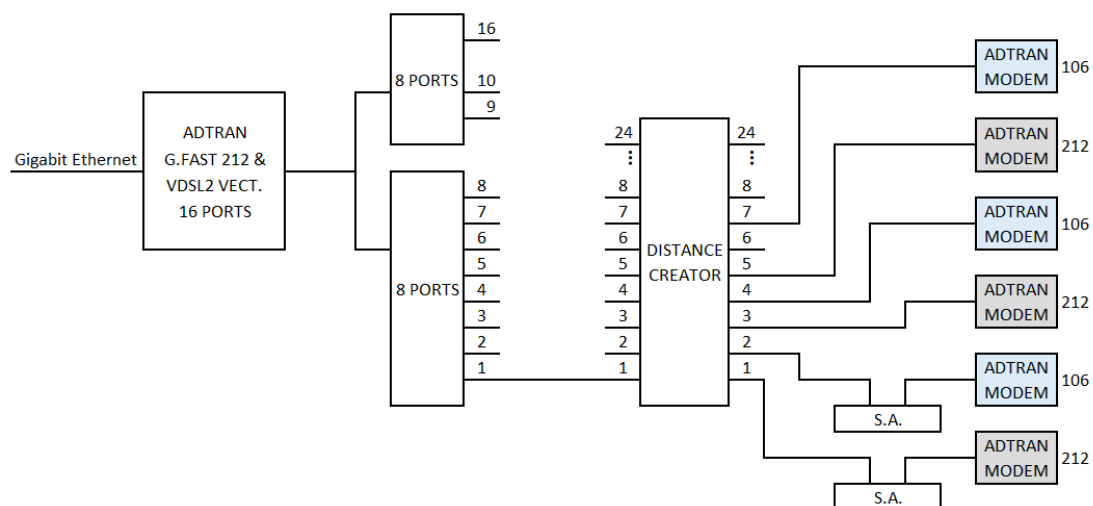
5.3.8.1 Σενάριο

Για τον υπολογισμό της επίδοσης του G.fast σε πολλές ενεργές γραμμές συνδρομητών (6 ταυτόχρονα) στις οποίες έχουν εφαρμοστεί διαφορετικά προφίλ (3 γραμμές με προφίλ 106a και 3 με προφίλ 212a) εξετάστηκαν 6 μήκη βρόχου (0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m) με τη χρήση της τεχνικής του vectoring. Επί αυτών, μετρήθηκε ο ρυθμός μετάδοσης με και χωρίς την εφαρμογή κάποιας μάσκας στο φάσμα (2.2MHz-106MHz, 19MHz-106MHz, 30MHz-106MHz και 2.2MHz-212MHz, 19MHz-212MHz, 30MHz-212MHz) για την προστασία υπηρεσιών VDSL2. Επίσης, εξετάστηκε η επίδοση κάθε γραμμής όταν είναι ενεργή μόνη της (SL). Για την καταγραφή της φασματικής πυκνότητας ισχύος, χρησιμοποιήθηκε αναλυτής φάσματος (κανάλι 1 – μπλε χρώμα: θύρα 1 — προφίλ 212, κανάλι 2 – μαύρο χρώμα: θύρα 2 - προφίλ 106).

Μήκος βρόχου	Μεταβαλλόμενο, 0m, 25m, 50m, 75m, 150m, 250m
Εξεταζόμενο προφίλ	G.fast 106a (lines 2,4,6) και 212a (lines 1,3,5)
Αριθμός ενεργών συνδρομητών	6
Χρησιμοποιούμενο φάσμα	2,2MHz - 106MHz (full spectrum) 19MHz - 106MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 106MHz (VDSL 35b mask) 2,2MHz - 212MHz (full spectrum) 19MHz - 212MHz (VDSL 17a mask) 30MHz - 212MHz (VDSL 35b mask)
Προφίλ TDD (US/DS)	Mds=28 (80/20)
Περιορισμός ρυθμού (US/DS)	Κανένας
Τεχνική σε λειτουργία	Spectral Shaping, Vectoring

Πίνακας 5.23: Παράμετροι πειράματος 8

5.3.8.2 Τοπολογία



Σχήμα 5.45: Τοπολογία πειράματος 8

106 & 212 COEXISTENCE WITH VDSL2 35b MASK																							
LOOP LENGTH (m)	LINE 1 - 212 (Mbps)			LINE 2 - 106 (Mbps)			LINE 3 - 212 (Mbps)			LINE 4 - 106 (Mbps)			LINE 5 - 212 (Mbps)			LINE 6 - 106 (Mbps)			AVERAGE	AVERAGE OF 212	MIN OF 212	MAX OF 212	
	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR	DS	US	AGGR					
SINGLE LINE	0	1308,220	320,540	1628,760	618,104	167,189	785,293	1295,593	329,571	1625,164	617,551	167,607	785,158	1309,900	314,489	1624,389	615,561	125,273	740,834	1198,266	1626,104	1624,389	1628,760
	25	1162,251	259,588	1421,839	579,577	159,407	738,984	1189,867	278,240	1468,107	589,055	159,753	748,808	1200,640	273,137	1473,777	583,660	114,645	698,305	1091,637	1454,574	1421,839	1473,777
	50	998,159	211,009	1209,168	546,275	144,219	690,494	1005,020	230,807	1235,827	547,145	153,337	700,482	921,851	208,411	1130,262	545,772	142,751	688,523	942,459	1191,752	1130,262	1235,827
	75	746,737	149,676	896,413	485,144	124,067	609,211	775,071	167,465	942,536	509,444	136,683	646,127	743,849	153,115	896,964	484,833	126,100	610,933	767,031	911,971	896,413	942,536
	150	291,859	52,967	344,826	305,119	63,136	368,255	307,393	61,909	369,302	327,031	72,388	399,419	320,163	63,904	384,067	300,681	68,388	369,069	372,490	366,065	344,826	384,067
	250	128,665	17,188	145,853	135,320	24,396	159,716	145,808	24,036	169,844	169,641	32,457	202,098	130,055	20,783	150,838	130,423	27,959	158,382	164,455	155,512	145,853	169,844
VECTORED	0	1263,172	312,063	1575,235	592,137	163,905	756,042	1264,663	323,431	1588,094	591,564	167,189	758,753	1252,908	311,011	1563,919	593,071	163,191	756,262	1166,384	1575,749	1563,919	1588,094
	25	1100,787	252,611	1353,398	516,677	154,240	670,917	1135,220	262,705	1397,925	550,580	155,859	706,439	1048,317	247,913	1296,230	527,728	148,637	676,365	1016,879	1349,184	1296,230	1397,925
	50	932,708	202,080	1134,788	511,827	138,321	650,148	936,288	219,431	1155,719	524,755	148,991	673,746	878,839	195,165	1074,004	503,800	131,459	635,259	887,277	1121,504	1074,004	1155,719
	75	641,669	138,611	780,280	446,464	116,728	563,192	662,147	151,481	813,628	466,744	127,004	593,748	608,397	141,608	750,005	433,947	110,063	544,010	674,144	781,304	750,005	813,628
	150	248,824	50,611	299,435	265,469	59,895	325,364	275,628	57,768	333,396	282,861	67,624	350,485	274,535	59,704	334,239	260,785	63,497	324,282	327,867	322,357	299,435	334,239
	250	99,805	15,433	115,238	122,911	22,612	145,523	114,819	20,021	134,840	136,724	29,891	166,615	97,153	19,145	116,298	111,467	25,643	137,110	135,937	122,125	115,238	134,840
VECTORIZING GAIN	0	96,56%	97,36%	96,71%	95,80%	98,04%	96,28%	97,61%	98,14%	97,72%	95,79%	99,75%	96,64%	95,65%	98,89%	96,28%	96,35%	130,27%	102,08%	97,34%	96,90%	96,28%	97,50%
	25	94,71%	97,31%	95,19%	89,15%	96,76%	90,79%	95,41%	94,42%	95,22%	93,47%	97,56%	94,34%	87,31%	90,77%	87,95%	90,42%	129,65%	96,86%	93,15%	92,75%	91,17%	94,85%
	50	93,44%	95,77%	93,85%	93,69%	95,91%	94,16%	93,16%	95,07%	93,52%	95,91%	97,17%	96,18%	95,33%	93,64%	95,02%	92,31%	92,09%	92,26%	94,14%	94,11%	95,02%	93,52%
	75	85,93%	92,61%	87,04%	92,03%	94,08%	92,45%	85,43%	90,46%	86,32%	91,62%	92,92%	91,89%	81,79%	92,48%	83,62%	89,50%	87,28%	89,05%	87,89%	85,67%	83,67%	86,32%
	150	85,25%	95,55%	86,84%	87,01%	94,87%	88,35%	89,67%	93,31%	90,28%	86,49%	93,42%	87,75%	85,75%	93,43%	87,03%	86,73%	92,85%	87,86%	88,02%	88,06%	86,84%	87,03%
	250	77,57%	89,79%	79,01%	90,83%	92,69%	91,11%	78,75%	83,30%	79,39%	80,60%	92,09%	82,44%	74,70%	92,12%	77,10%	85,47%	91,72%	86,57%	82,66%	78,53%	79,01%	79,39%

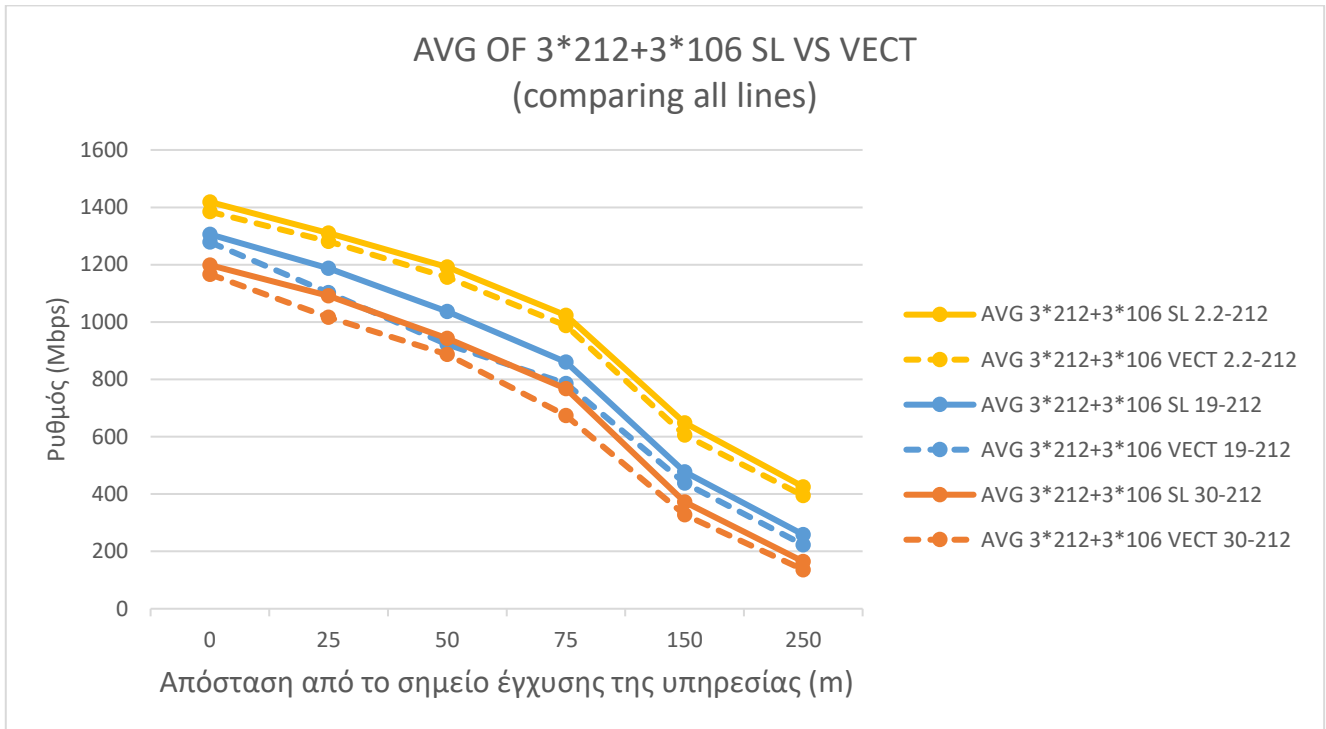
Πίνακας 5.26: Μετρήσεις και υπολογισμοί πειράματος 8 (106 & 212 coexistence with VDSL2 35b mask)

Average aggregate rates Δ and Ratio [Full Spectrum vs VDSL2 17a mask]					Average aggregate rates Δ and Ratio [Full Spectrum vs VDSL2 35b mask]					Average aggregate rates Δ and Ratio [VDSL2 17a mask vs VDSL2 35b mask]				
LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)	LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)	LOOP LENGTH (m)	SL (Mbps)	VECT (Mbps)	SL (%)	VECT (%)
0	113,023	106,163	92,03%	92,33%	0	220,390	218,175	84,46%	84,24%	0	107,367	112,012	91,78%	91,24%
25	122,900	178,072	90,62%	86,10%	25	218,832	264,043	83,30%	79,39%	25	95,932	85,971	91,92%	92,20%
50	154,267	234,535	87,05%	79,71%	50	248,802	268,630	79,11%	76,76%	50	94,536	34,095	90,88%	96,30%
75	163,010	202,238	84,07%	79,53%	75	256,532	313,794	74,94%	68,24%	75	93,522	111,556	89,13%	85,80%
150	171,309	166,780	73,57%	72,45%	150	275,769	277,440	57,46%	54,17%	150	104,460	110,660	78,10%	74,77%
250	166,872	171,155	60,76%	56,57%	250	260,859	258,189	38,67%	34,49%	250	93,987	87,034	63,63%	60,97%

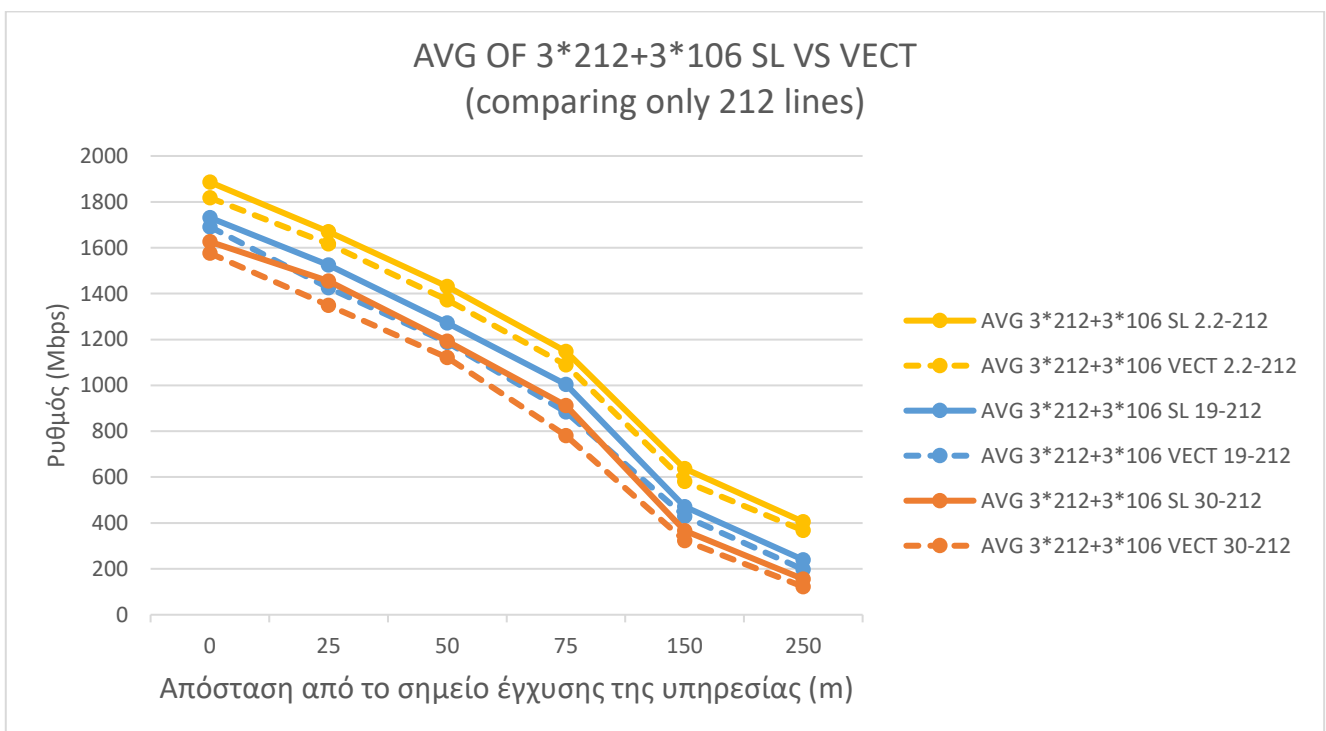
Πίνακας 5.27: Απώλειες ρυθμού μετάδοσης μεταξύ διαφορετικών προφίλ σε κάθε μήκος βρόχου

comparing AVG of lines 1/3/5 VECT						*comparing AVG of lines 1/3/5* SL					
212 lines [6x212]			212 lines [3x212 + 3x106]			212 lines [6x212]			212 lines [3x212 + 3x106]		
Full	19-212	30-212	Full	19-212	30-212	Full	19-212	30-212	Full	19-212	30-212
1834,57	1675,93	1550,43	1817,54	1691,09	1575,75	1885,78	1730,83	1626,10	1885,78	1730,83	1626,10
1525,17	1419,10	1306,18	1616,71	1425,31	1349,18	1669,56	1524,25	1441,05	1669,56	1524,25	1454,57
1305,70	1185,12	1113,68	1371,79	1187,09	1121,50	1431,34	1272,12	1191,75	1431,34	1272,12	1191,75
1047,84	936,91	747,27	1088,86	884,06	781,30	1147,22	1003,42	911,97	1147,22	1003,42	911,97
600,35	429,13	331,15	581,23	428,74	322,36	637,25	470,85	366,07	637,25	470,85	366,07
377,84	209,85	123,88	367,26	197,28	122,13	405,17	239,33	155,51	405,17	239,33	155,51

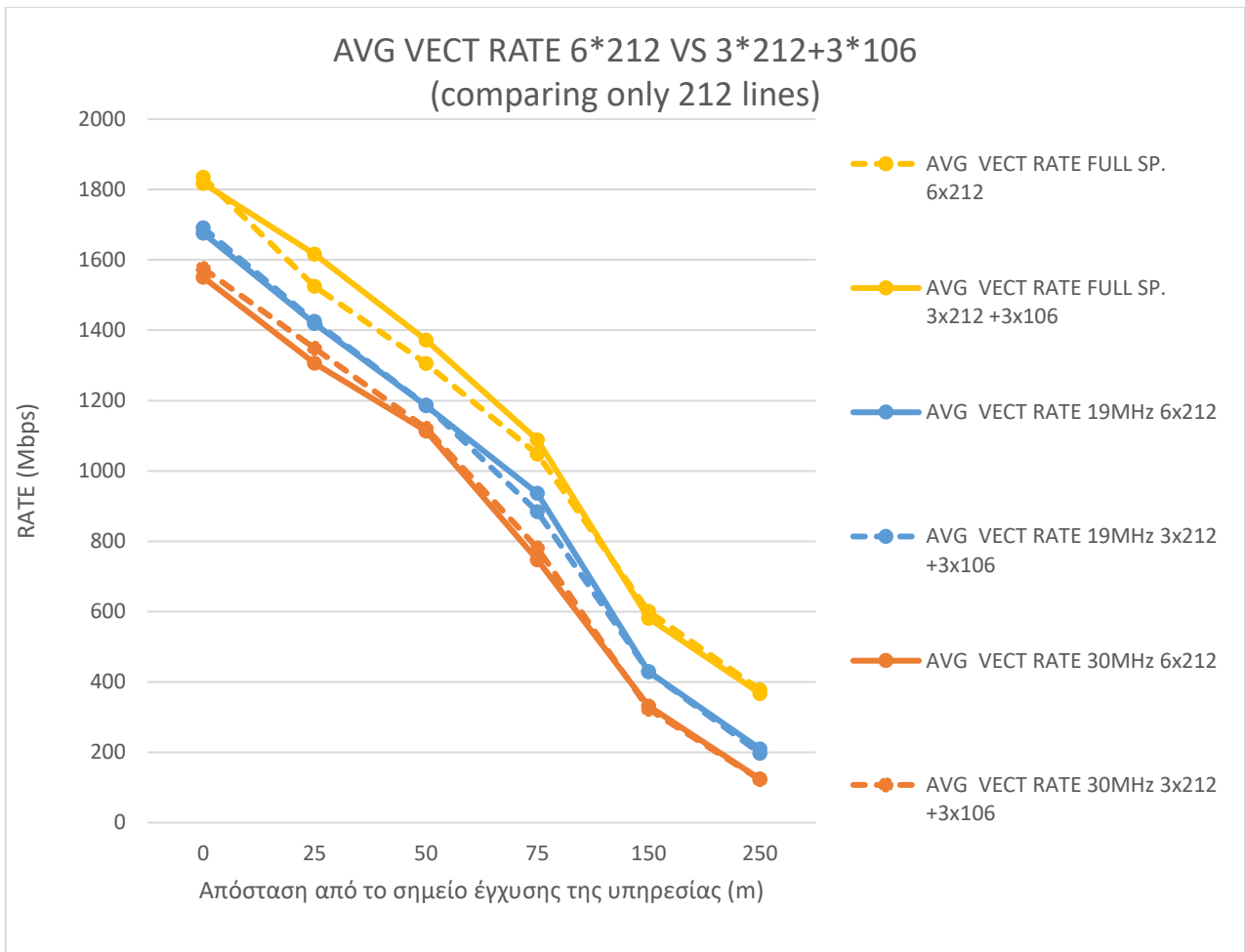
Πίνακας 5.28: Συγκριτική επίδοση γραμμών G.fast 212 στα δύο σενάρια (6x212/3x212+3x106)



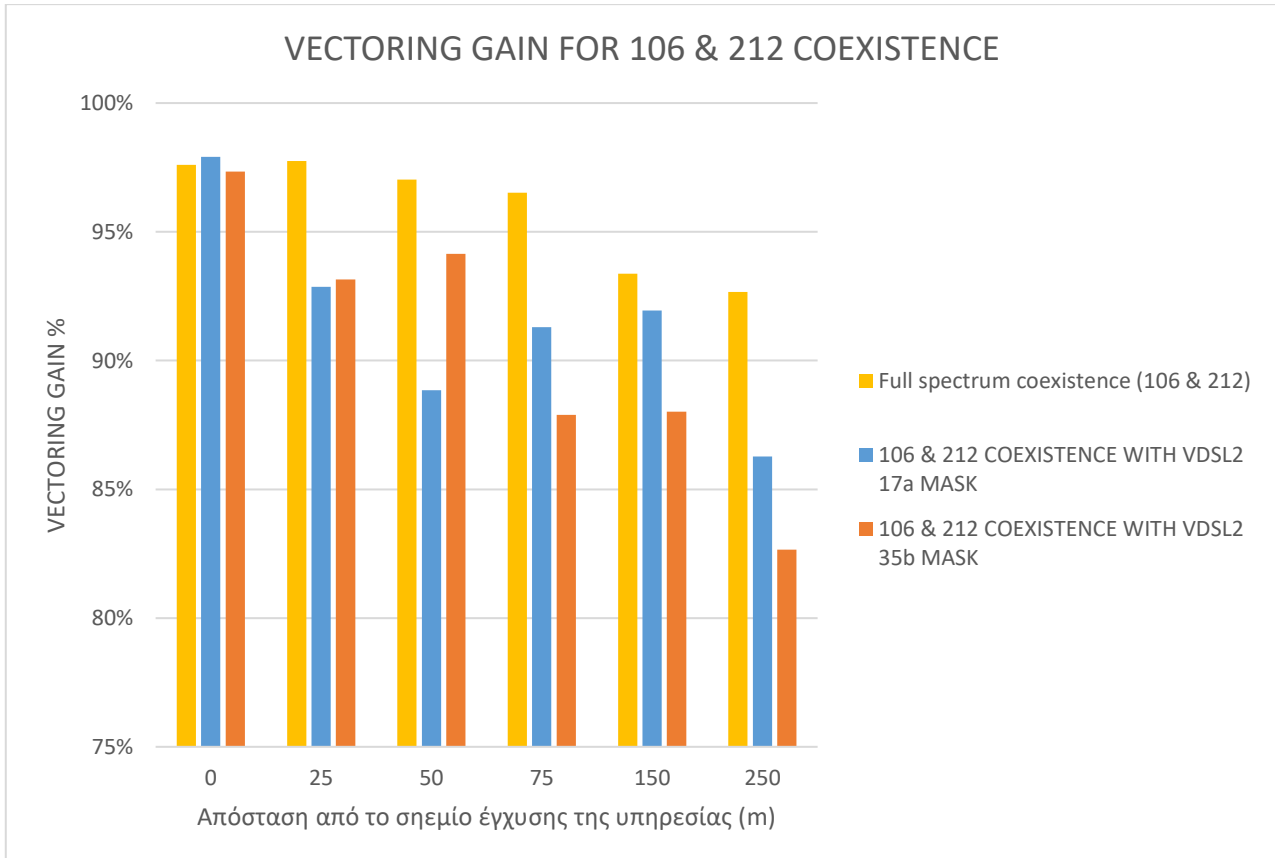
Σχήμα 5.46: AVG OF 3*212+3*106 SL VS VECT (comparing all lines)



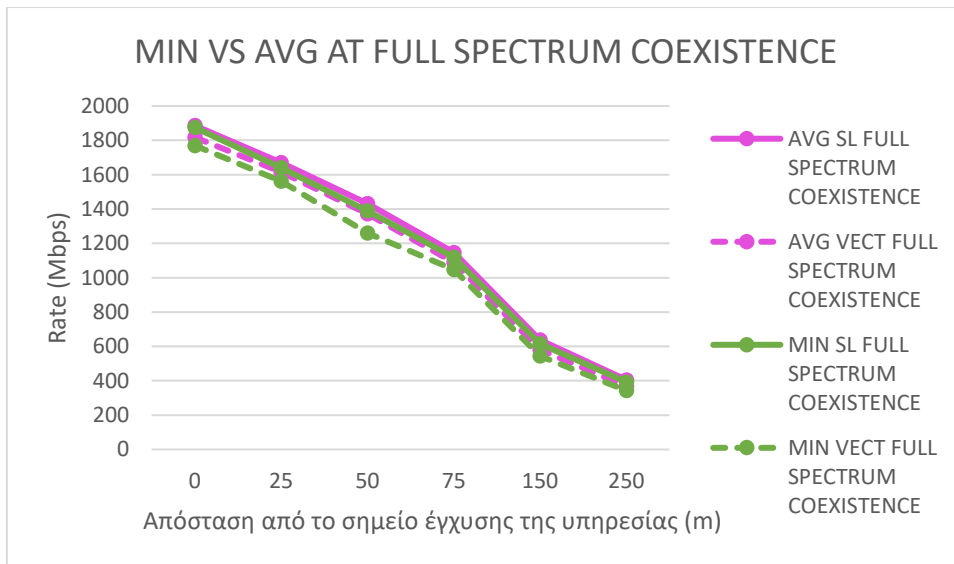
Σχήμα 5.47: AVG OF 3*212+3*106 SL VS VECT (comparing only 212 lines)



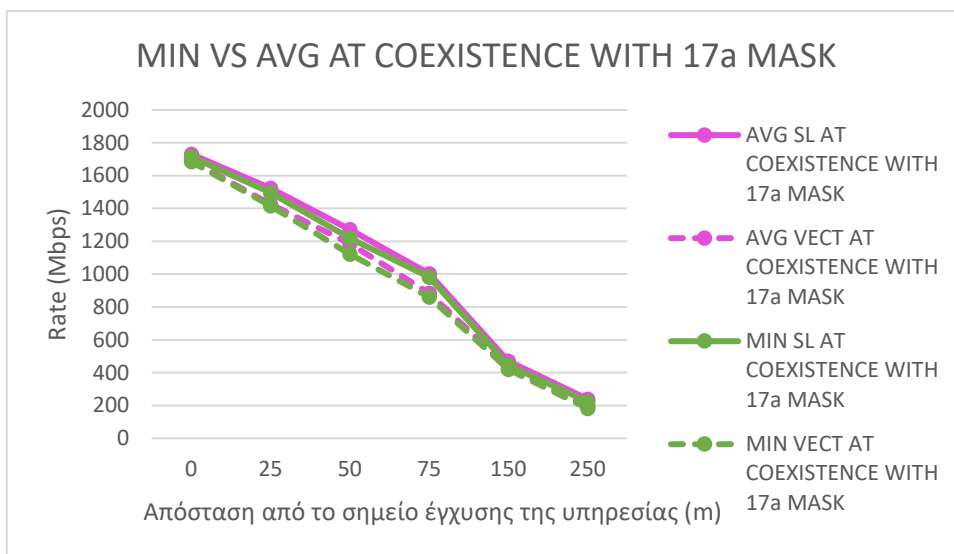
Σχήμα 5.48: AVG VECT RATE 6*212 VS 3*212+3*106 (comparing only 212 lines)



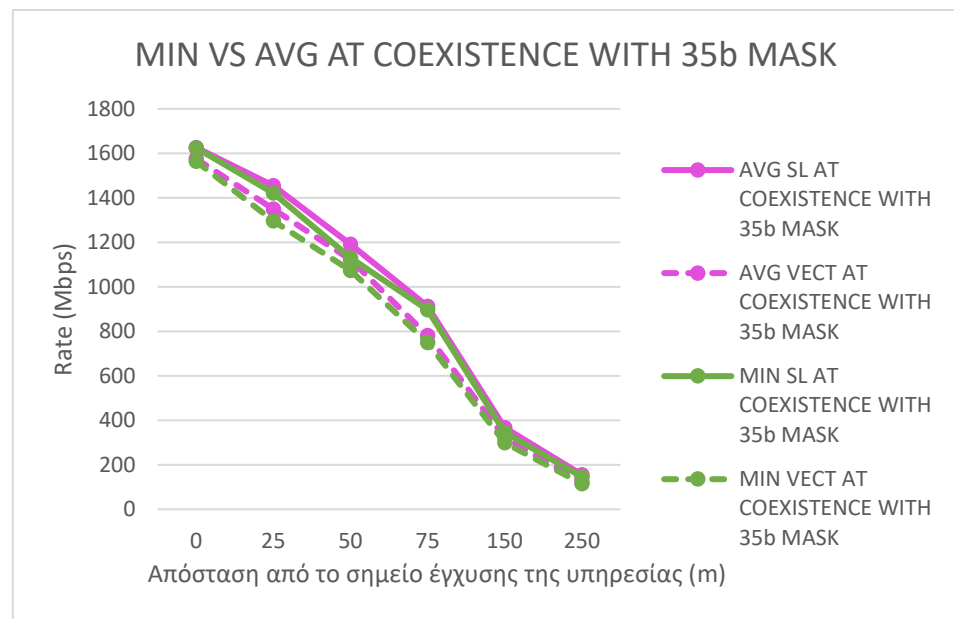
Σχήμα 5.49: VECTORING GAIN FOR 106 & 212 COEXISTENCE



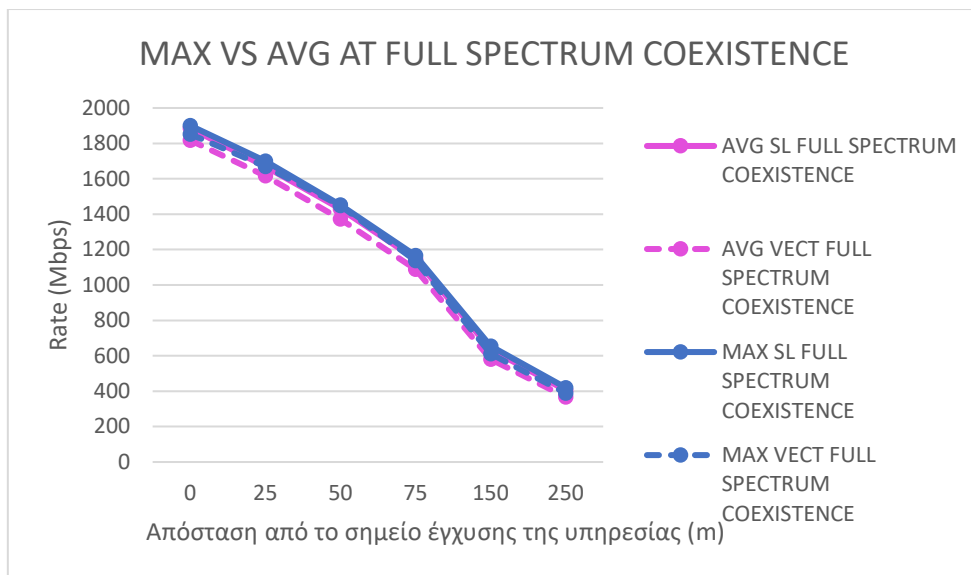
Σχήμα 5.50: MIN VS AVG AT FULL SPECTRUM COEXISTENCE



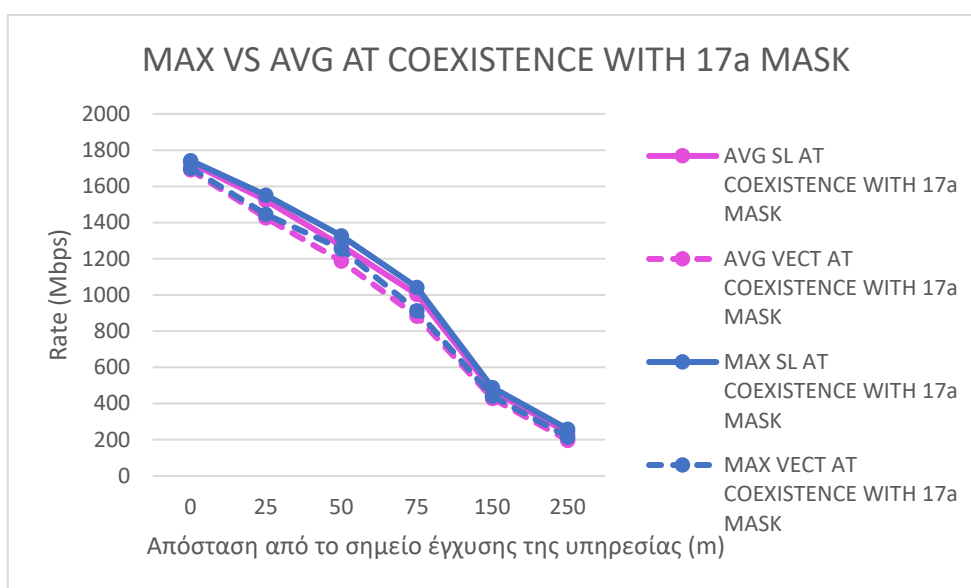
Σχήμα 5.51: MIN VS AVG AT COEXISTENCE WITH 17a MASK



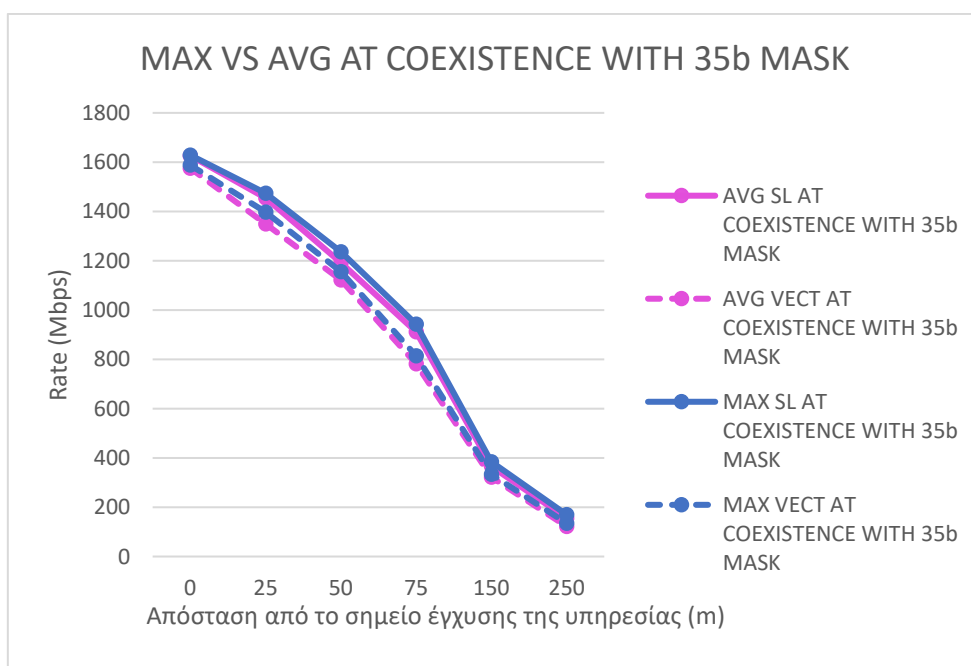
Σχήμα 5.52: MIN VS AVG AT COEXISTENCE WITH 35b MASK



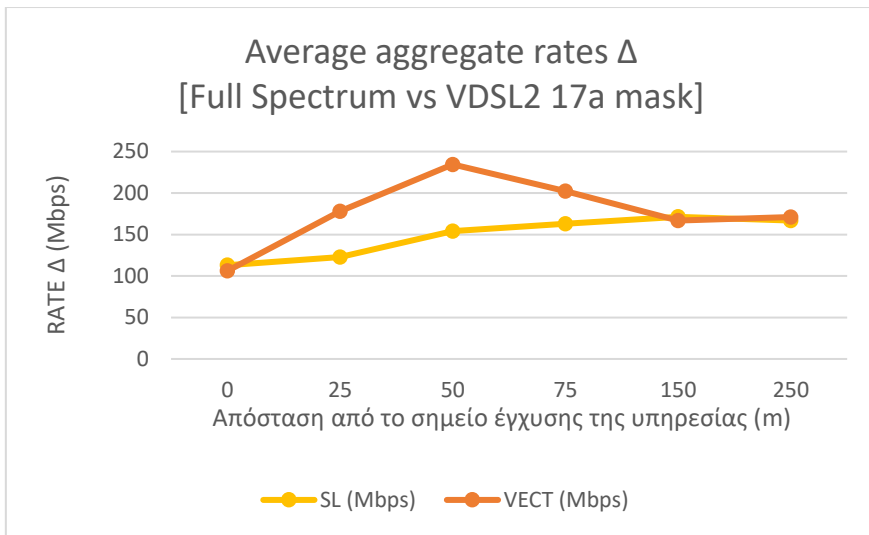
Σχήμα 5.53: MAX VS AVG AT FULL SPECTRUM COEXISTENCE



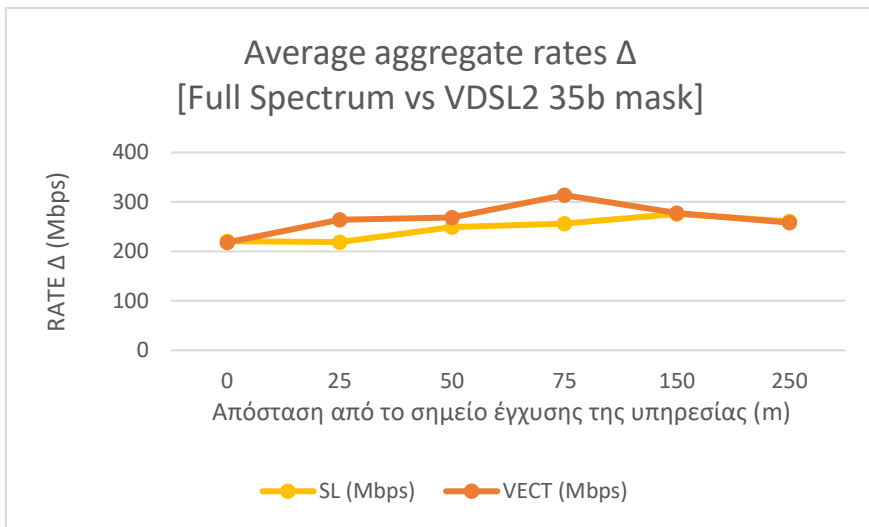
Σχήμα 5.54: MAX VS AVG AT COEXISTENCE WITH 17a MASK



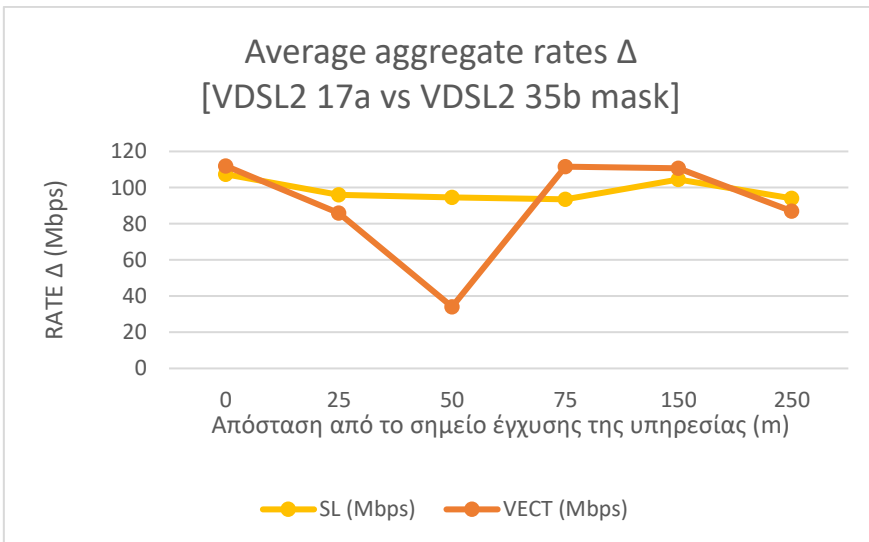
Σχήμα 5.55: MAX VS AVG AT COEXISTENCE WITH 35b MASK



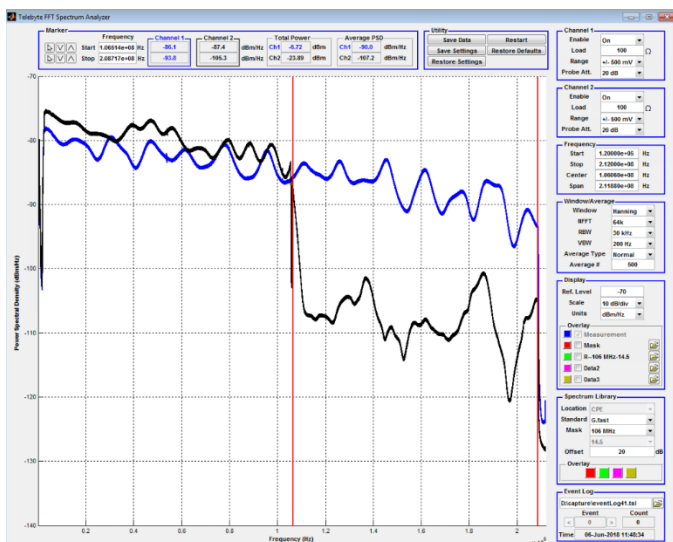
Σχήμα 5.56: Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs VDSL2 17a mask]



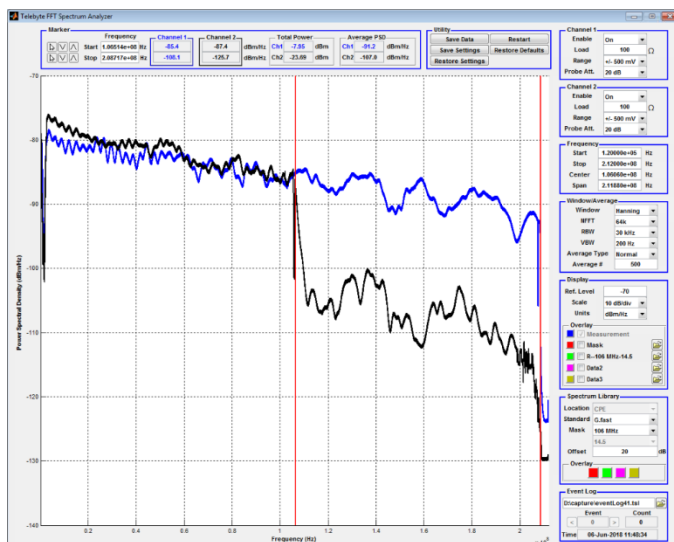
Σχήμα 5.57: Average aggregate rates Δ [Full Spectrum vs VDSL2 35b mask]



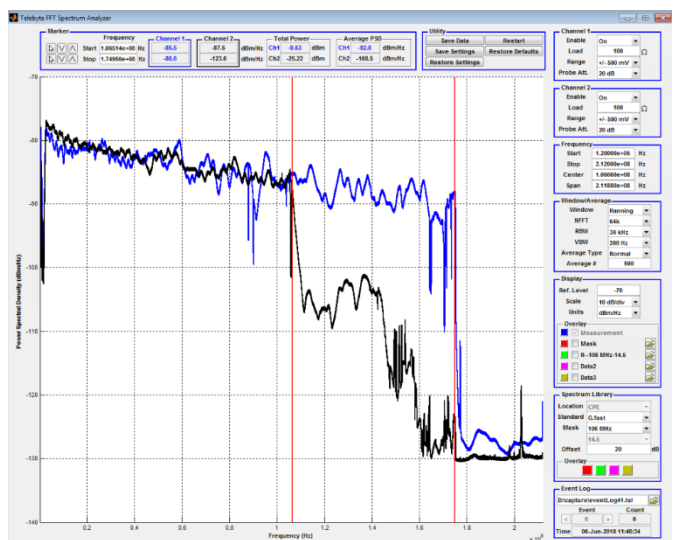
Σχήμα 5.58: Average aggregate rates Δ [VDSL2 17a vs VDSL2 35b mask]



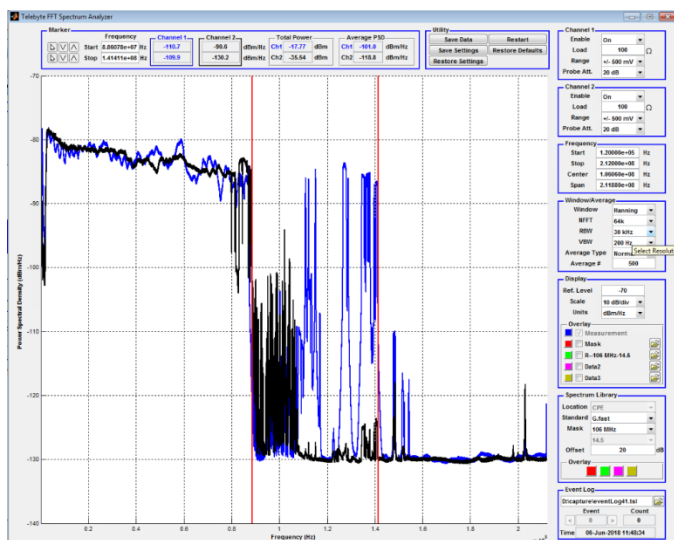
Σχήμα 5.59: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 0m



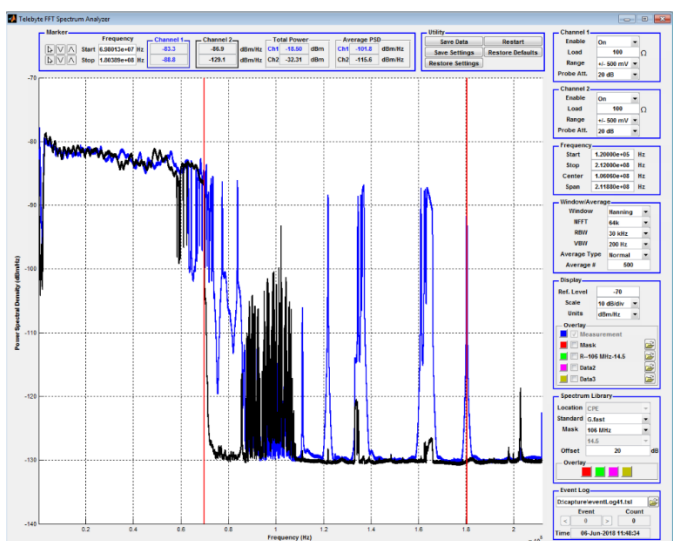
Σχήμα 5.60: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 25m



Σχήμα 5.61: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 75m



Σχήμα 5.62: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 150m

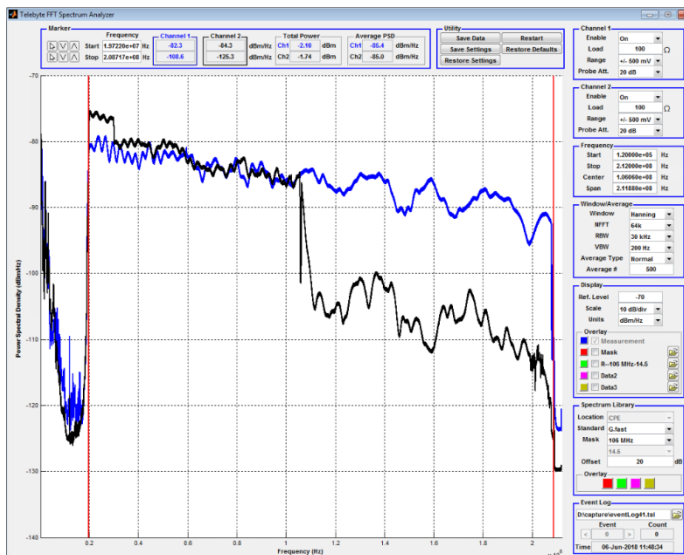


Σχήμα 5.63: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο full spectrum coexistence στα 250m

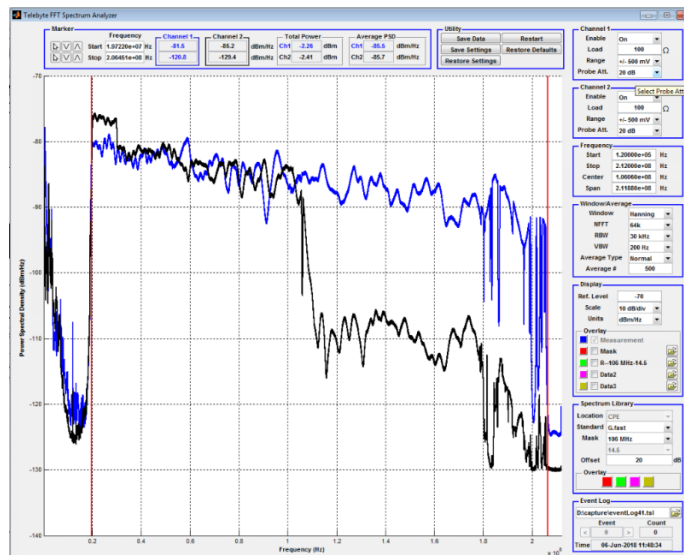
Σχήμα	Μήκος βρόχου	Τελευταία Συχνότητα προφίλ 106a	Τελευταία Συχνότητα προφίλ 212a
5.57	0m	106,51MHz	208,72MHz
5.58	25m	106,51MHz	208,72MHz
5.50	75m	106,51MHz	174,95MHz
5.60	150m	88,61MHz	141,41MHz
5.61	250m	69,8MHz	180,39MHz

Πίνακας 5.29: Τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει»²⁹ σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο full spectrum coexistence

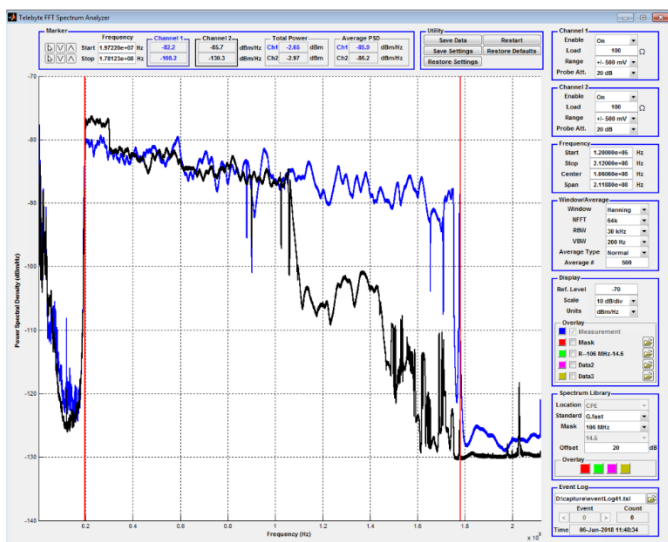
²⁹ Το bit loading του τόνου δεν είναι μηδενικό



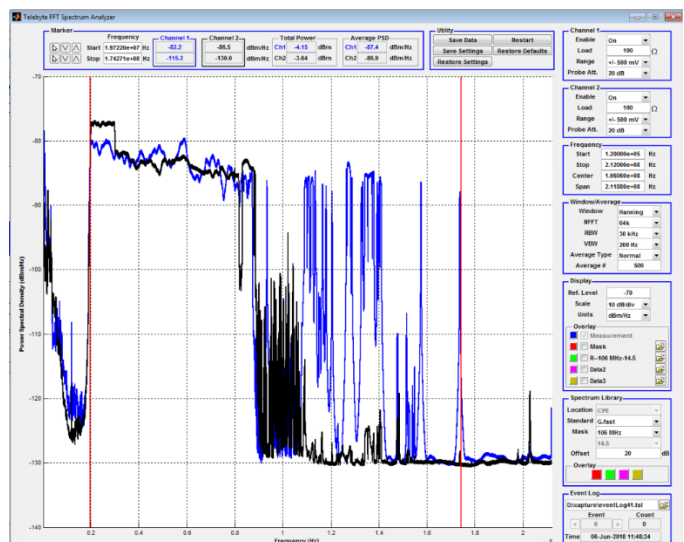
Σχήμα 5.64: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 25m



Σχήμα 5.65: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 50m



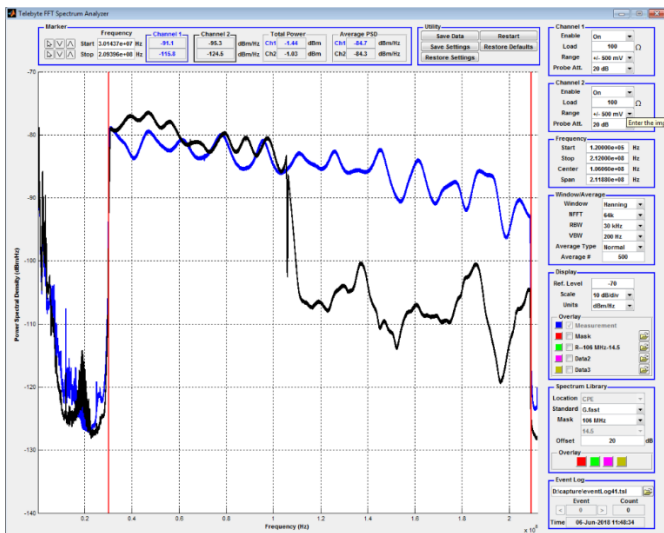
Σχήμα 5.66: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 75m



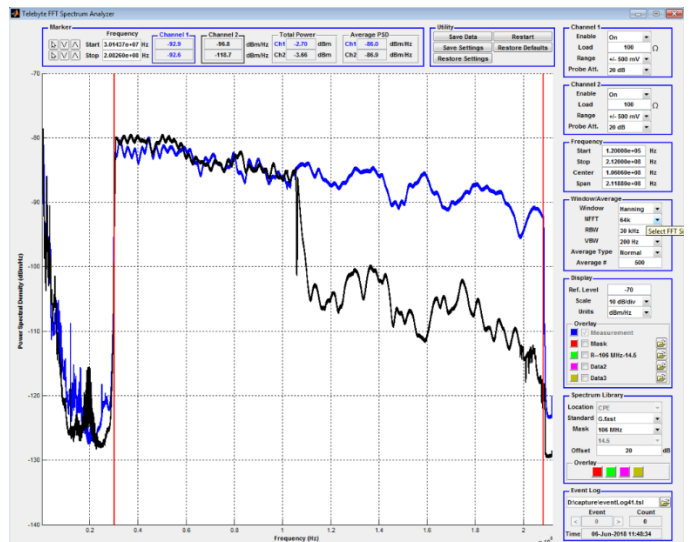
Σχήμα 5.67: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 17a mask στα 150m

Σχήμα	Μήκος βρόχου	Συχνότητα Έναρξης	Τελευταία Συχνότητα
5.62	25m	19,72MHz	208,72MHz
5.63	50m	19,72MHz	206,45MHz
5.64	75m	19,72MHz	178,12MHz
5.65	150m	19,72MHz	174,27MHz

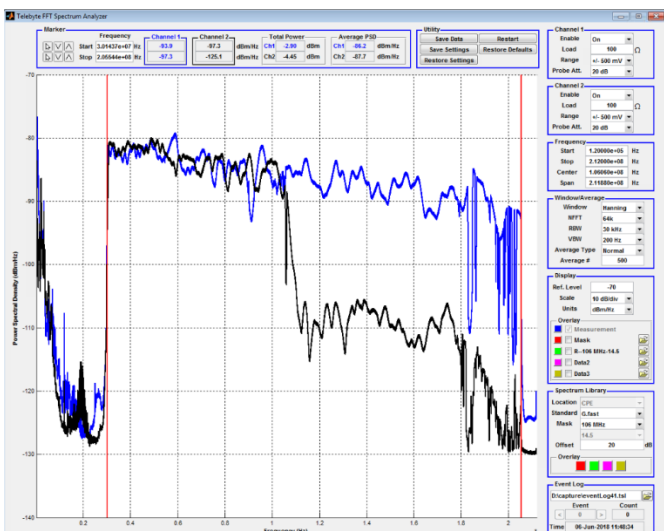
Πίνακας 5.30: Πρώτη και τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει» σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο 106 & 212 coexistence with VDSL2 17a mask



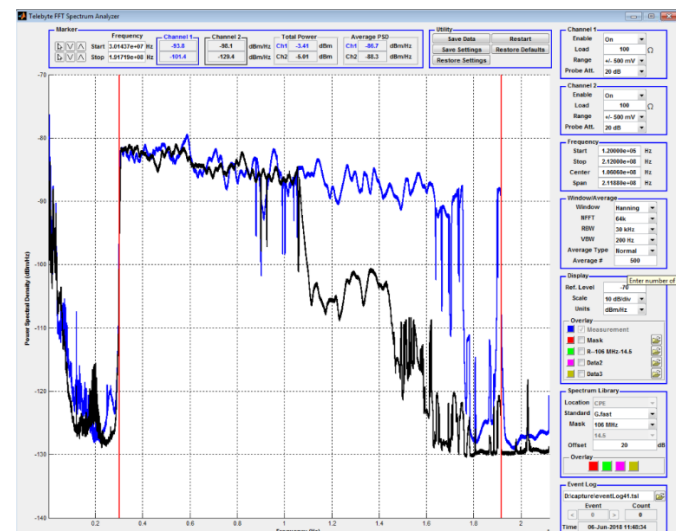
Σχήμα 5.68: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 0m



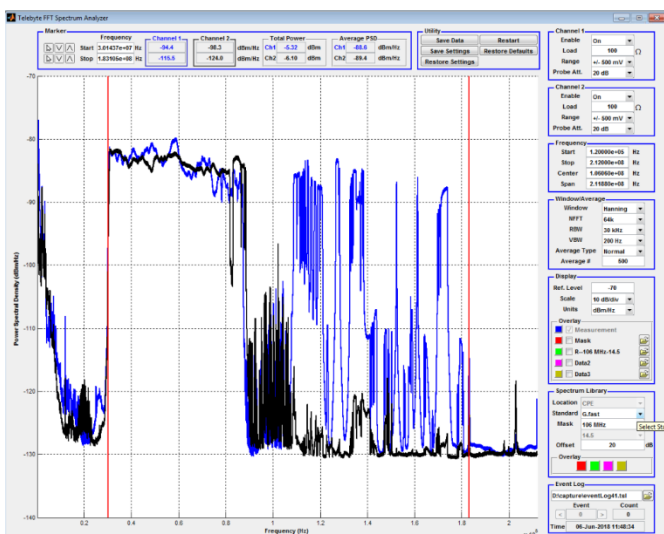
Σχήμα 5.69: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 25m



Σχήμα 5.70: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 50m



Σχήμα 5.71: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 75m

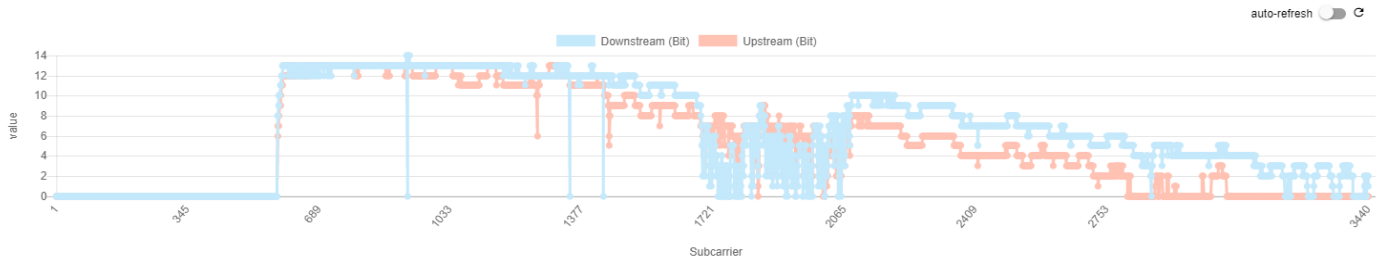


Σχήμα 5.72: Κατανομή της φασματικής πυκνότητας ισχύος στο σενάριο coexistence with VDSL2 35b mask στα 150m

Σχήμα	Μήκος βρόχου	Συχνότητα Έναρξης	Τελευταία Συχνότητα
5.66	0m	30,14MHz	209,40MHz
5.67	25m	30,14MHz	208,26MHz
5.68	50m	30,14MHz	205,54MHz
5.69	75m	30,14MHz	191,72MHz
5.70	150m	30,14MHz	183,11MHz

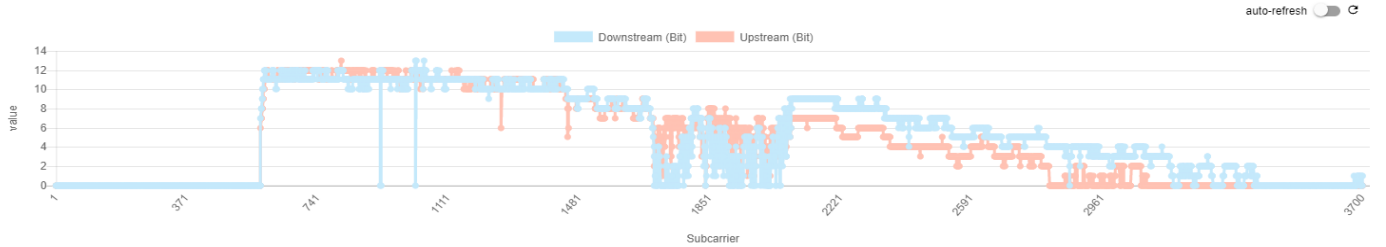
Πίνακας 5.31: Πρώτη και τελευταία συχνότητα που «επιβιώνει» σε κάθε μήκος βρόχου στο σενάριο 106 & 212 coexistence with VDSL2 35b mask

BITS



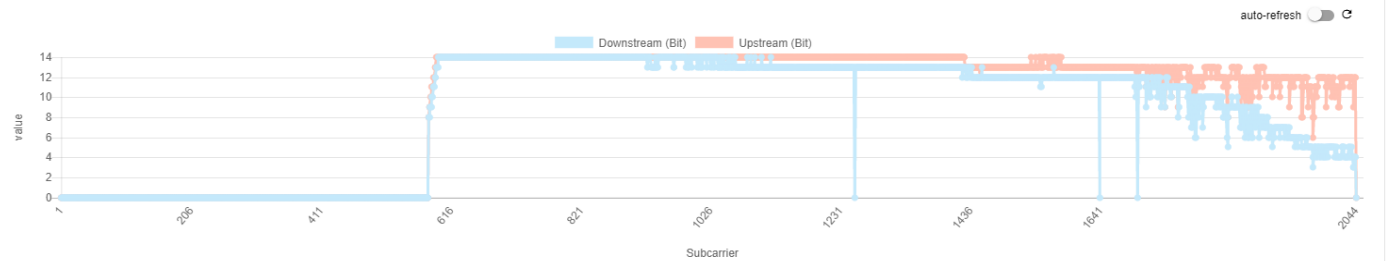
Σχήμα 5.73: SL_35-212_75m_bitloading

BITS



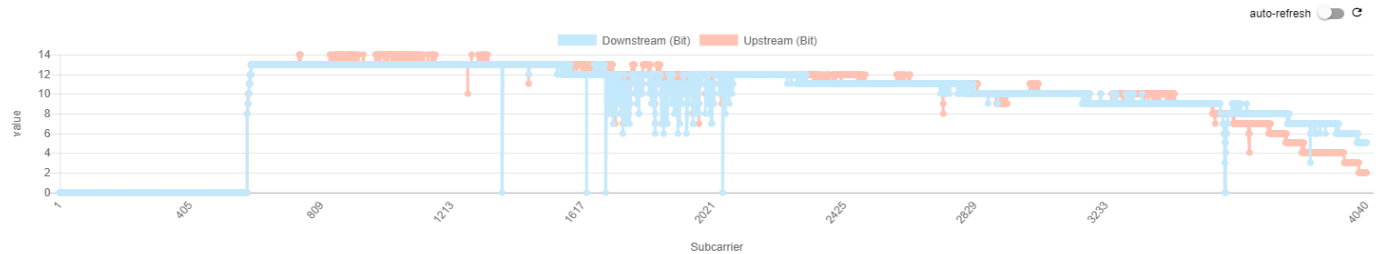
Σχήμα 5.74: VECT_35-212_75m_bitloading

BITS



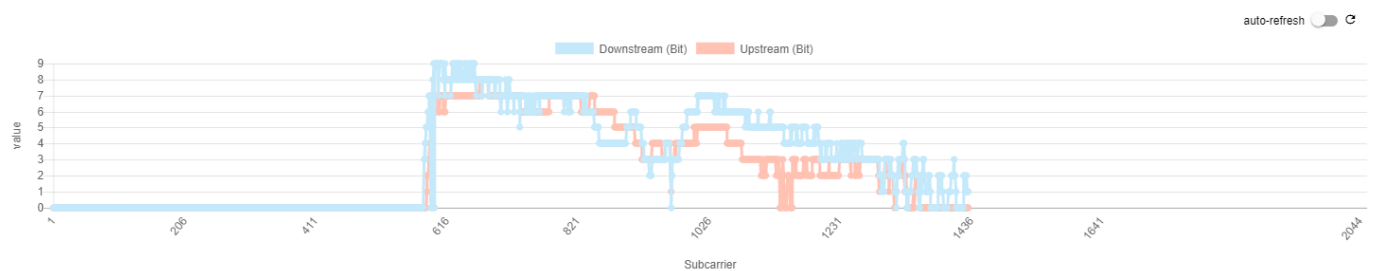
Σχήμα 5.75: VECT_30-106_0m_bitloading

BITS

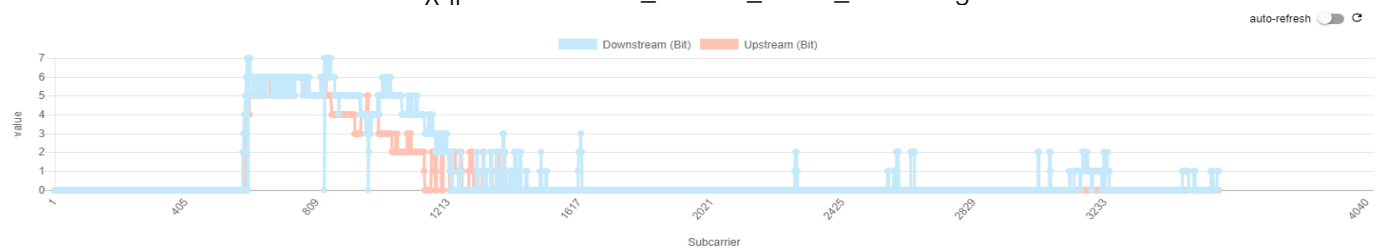


Σχήμα 5.76: VECT_30-212_0m_bitloading

BITS



Σχήμα 5.77: VECT_35-106_250m_bitloading



Σχήμα 5.78: VECT_35-212_250m_bitloading

5.3.8.4 Συμπεράσματα

Από τις μετρήσεις του πειράματος 8 και τους υπολογισμούς επί των μετρήσεων, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όπως διαπιστώνεται από το Σχ.5.46, το G.fast επιτυγχάνει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και στην περίπτωση της παράλληλης λειτουργίας των δύο διαφορετικών προφίλ ενώ δεν παρατηρείται κάποια μη αναμενόμενη συμπεριφορά (σταθερά υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης σε όλες τις γραμμές που μειώνονται με την αύξηση του μήκους βρόχου).
- Όπως φαίνεται από τους Πιν.5.24-5.26, για τους οποίους ισχύει η ίδια χρωματική κωδικοποίηση με το πείραμα 5.3.7, η απόδοση του vectoring είναι και στην περίπτωση αυτή ιδιαίτερα υψηλή. Στις μέσες τιμές (AVG), το vectoring gain υπερβαίνει το 80% σχεδόν σε όλα τα σενάρια φασματικών περιορισμών και μήκους βρόχου, με μόνο μία μέση τιμή να είναι οριακά κάτω από 80% (78,53% for 35b mask at 250m).
- Από το Σχ.5.48, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επίδοση των γραμμών με προφίλ 212 επηρεάζεται πολύ λίγο από την παρουσία των γραμμών με προφίλ 106.
- Όπως και στο πείραμα 5.3.7, κατά την ταυτόχρονη λειτουργία πολλών γραμμών, παρατηρούνται σε όλες τις γραμμές οι αναμενόμενοι ρυθμοί μετάδοσης χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Τα Σχ.5.50-5.55 επιβεβαιώνουν το ανωτέρω συμπέρασμα, καθώς δείχνουν πολύ μικρή απόκλιση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής (ρυθμού μετάδοσης κάποιας γραμμής) από τη μέση τιμή.
- Επίσης, από τα Σχ.5.56-5.58 και τον Πιν.5.27, φαίνεται η επίδραση των μασκών φάσματος για την προστασία του VDSL2 17a και του VDSL2 35b στο ρυθμό μετάδοσης. Βάσει των υπολογισμών του Πιν.27, μπορεί να εξαχθεί ένα ποσοτικό συμπέρασμα για το «tradeoff» (απώλεια ρυθμού μετάδοσης σε Mbps) μεταξύ της προστασίας του VDSL2 και της επίδοσης του G.fast, το οποίο φαίνεται πως δεν διατηρείται σταθερό καθώς αυξάνεται το μήκος βρόχου. Ποιοτικά, το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται από τα Σχ.5.56-5.58, καθώς οι γραφικές παραστάσεις δεν είναι σταθερές (ευθείες οριζόντιες γραμμές).
- Από τα Σχ.5.59-5.72 και τους Πιν.5.29-5.31, διαπιστώνεται και πάλι ότι τηρούνται στην πράξη οι περιορισμοί που τίθενται κάθε φορά στο φάσμα (και μάλιστα με ακρίβεια αφού η συχνότητα έναρξης είναι 19.72MHz και 30.14MHz στην περίπτωση της μάσκας των 19MHz και 30MHz, αντίστοιχα). Επίσης μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί σε κάθε σενάριο, η απόσταση από την οποία ξεκινά η εξασθένηση των υψηλών συχνοτήτων (μέχρι τα 50m φαίνεται ότι «επιβιώνουν» σχεδόν όλες οι συχνότητες).
- Τέλος, από τα Σχ.5.73-5.78 εξάγεται το συμπέρασμα ότι το bit loading που πρακτικά εφαρμόζεται στα εξεταζόμενα σενάρια για ορισμένα ενδεικτικά μήκη βρόχου. Είναι φανερό ότι με την αύξηση της απόστασης μειώνεται ο αριθμός των bit που ανατίθενται στις υψηλότερες συχνότητες, ενώ ολοένα και λιγότερες συχνότητες αναλαμβάνουν να μεταφέρουν το μέγιστο δυνατό αριθμό bits.

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: BACKHAULING ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ

6.1 Κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών

6.1.1 Ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών

Όπως είναι ήδη γνωστό από την Εν.1.1.1, η μετάδοση της πληροφορίας μπορεί να είναι είτε ενσύρματη (διάδοση Η/Μ κύματος που φέρει το σήμα στο εσωτερικό μίας διάταξης όπως για παράδειγμα εντός χάλκινου καλωδίου, ομοαξονικού καλωδίου ή οπτικής ίνας), είτε ασύρματη (διάδοση Η/Μ κύματος που φέρει το σήμα στον ελεύθερο χώρο). Επίσης, είναι συχνό το φαινόμενο η μετάδοση της πληροφορίας να είναι σε ένα τμήμα της ενσύρματη και σε ένα άλλο ασύρματη. Οι ασύρματες επικοινωνίες μελετούν όλες τις διαδικασίες ασύρματης σύνδεσης και επικοινωνίας μεταξύ συσκευών.

Οι κινητές και προσωπικές επικοινωνίες (mobile and personal communications) αποτελούν βασική εφαρμογή των ασυρμάτων επικοινωνιών. Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών το σημείο πρόσβασης του κάθε χρήστη δεν είναι σταθερό (καθώς ο χρήστης μετακινείται), ενώ στα δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών επιπλέον δεν υπάρχει μονοσήμαντη σχέση μεταξύ χρήστη και τερματικού, καθώς μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικό τερματικό κάθε φορά. Ο σκοπός της ανάπτυξης των ανωτέρω δικτύων είναι να καταστήσουν δυνατή την οποιασδήποτε μορφή επικοινωνία, με οποιοδήποτε πρόσωπο ή τερματικό, σε οποιοδήποτε μέρος.

Μεταξύ των πεδίων εφαρμογής των ασυρμάτων κινητών επικοινωνιών περιλαμβάνονται τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών για προσωπικές επικοινωνίες υψηλών απαιτήσεων κινητικότητας. Τα κυψελωτά δίκτυα έχουν ως στόχο την παροχή υπηρεσιών σε κινητά τερματικά, που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σε αστικές, ημιαστικές αλλά και αγροτικές περιοχές. Ο κύριος παράγοντας που συντέλεσε στην ανάπτυξη των ανωτέρω δικτύων ήταν η απαίτηση για απεριόριστη κινητικότητα των τερματικών σε συνδυασμό με την ασύρματη επικοινωνία.

Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά των κυψελωτών δικτύων που τα διαφοροποιούν από τα ενσύρματα δίκτυα τηλεφωνίας και δεδομένων είναι (i) η διαρκής παρακολούθηση και καταγραφή της περιοχής που περιφέρεται ο χρήστης για να καταστεί δυνατή η δρομολόγηση των εισερχομένων κλήσεων και (ii) η διαπομπή της επικοινωνίας του κινητού τερματικού (η αυτόματη αλλαγή συχνότητας) μεταξύ των κυψελών για να μη διακόπτεται η επικοινωνία καθώς αυτό κινείται. [1]

6.1.2 Η κυψελωτή δομή

Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ασύρματες (και όχι μόνο) επικοινωνίες είναι το περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων. Ιδανικά, ένα κινητό σύστημα επικοινωνιών πρέπει να λειτουργεί σε μία καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων και να εξυπηρετεί σχεδόν απεριόριστο αριθμό χρηστών σε απεριόριστες, όσον αφορά την έκτασή τους, περιοχές. Η κυψελωτή δομή του δικτύων κινητών επικοινωνιών αποτελεί, ως τώρα, την πιο επιτυχημένη προσέγγιση για την επίτευξη του ιδανικού αυτού συστήματος.

Στα κυψελωτά συστήματα, οι πομποί μεγάλης ισχύος που αρχικά χρησιμοποιούνταν για την κάλυψη μεγάλων περιοχών, αντικαθίστανται από πολλούς πομπούς μικρής ισχύος, κάθε ένας εκ των οποίων καλύπτει ένα μικρό τμήμα της περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος, το οποίο αποκαλείται κυψέλη (cell). Τα είδη κυψελών που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών τηλεπικοινωνιακής κίνησης είναι:

- Οι μακροκυψέλες (macrocells) που έχουν ακτίνα μερικών χιλιομέτρων και χρησιμοποιούνται για τη ραδιοκάλυψη³⁰ ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών με μέση ή χαμηλή πυκνότητα χρηστών.
- Οι μικροκυψέλες³¹ (microcells) που έχουν ακτίνα κάλυψης της τάξης περίπου 1km και χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρητικότητας των κυψελωτών συστημάτων, δηλαδή την ικανοποίηση απαιτήσεων εξυπηρέτησης περιοχών που εμφανίζουν μεγάλη συγκέντρωση χρηστών.
- Οι πικοκυψέλες³² (picocells) που έχουν ακτίνα κάλυψης της τάξης έως 250m και είναι στοιχειώδεις κυψέλες που εξασφαλίζουν ασύρματη κάλυψη μικρών χώρων, συχνά εσωτερικών όπου η κάλυψη δεν είναι ικανοποιητική.
- Οι πεμπτοκυψέλες³³ (femtocells) είναι οι μικρότερες (σε μέγεθος και ακτίνα κάλυψης) από τα τέσσερα είδη κυψελών και συνήθως χρησιμοποιούνται σε σπίτια ή μικρές επιχειρήσεις.

Κάθε κυψέλη έχει μια μονάδα εκπομπής/λήψης: το σταθμό βάσης (Base Station - BS) που αποτελεί και το σημείο πρόσβασης (Access Point - AP) στο σύστημα. Σε κάθε σταθμό βάσης κατανέμεται ένα μέρος του συνόλου των διαύλων (συχνοτήτων) που διατίθενται για το σύστημα, ενώ σε γειτονικούς σταθμούς υπάρχει μέριμνα ώστε να κατανέμονται διαφορετικές ομάδες διαύλων. Ως εκ τούτου, όλοι οι διαθέσιμοι δίαυλοι κατανέμονται σε σχετικά μικρό αριθμό γειτονικών σταθμών βάσης αλλά και ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές τόσο μεταξύ των σταθμών βάσης όσο και μεταξύ των χρηστών που εξυπηρετούνται από αυτούς. Τοποθετώντας κατάλληλα τους σταθμούς βάσης στο χώρο και κατανέμοντας παράλληλα βέλτιστα τους διαθέσιμους διαύλους, οι τελευταίοι μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν όσες φορές χρειάζεται (frequency reuse) διατηρώντας παράλληλα το επίπεδο των παρεμβολών κάτω από τα αποδεκτά όρια. [1] [2] [3]

6.1.3 Φυσική αρχιτεκτονική κυψελωτών συστημάτων

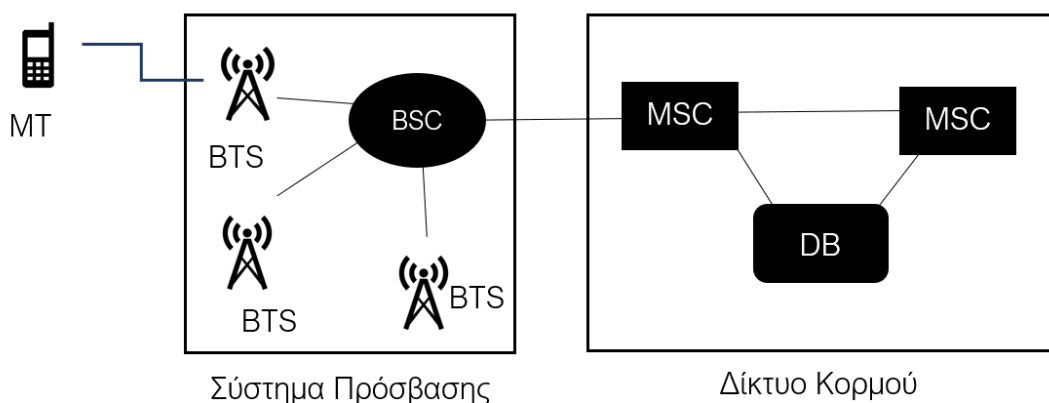
Λειτουργικά, το δίκτυο κινητών επικοινωνιών μπορεί να εννοηθεί ως ένα δίκτυο το οποίο αποτελείται από πλήθος υποδικτύων που συνδέονται μέσω του ενσύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Η επικοινωνία μεταξύ χρηστών διαφορετικών υποδικτύων εξασφαλίζεται από τη διασύνδεση όλων των υποδικτύων μέσω του ενσύρματου δικτύου.

³⁰ Η κατάλληλη τοποθέτηση σταθμών βάσης σε όλη την περιοχή κάλυψης του συστήματος

^{31 3 4} Οι μικροκυψέλες, πικοκυψέλες και πεμπτοκυψέλες στη βιβλιογραφία απαντώνται συχνά ως υποκατηγορίες των μικρών κυψελών (small cells)

Ως προς τη φυσική του αρχιτεκτονική, ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη (Σχ.6.1):

- Το κινητό τερματικό (Mobile Terminal - MT), δηλαδή η φυσική συσκευή που χρησιμοποιεί ο κινούμενος χρήστης για να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο.
- Το σύστημα πρόσβασης το οποίο είναι ένα σύστημα σταθμών βάσης (Base Station System - BSS) που παρέχει τη δυνατότητα στα τερματικά να επικοινωνούν με το δίκτυο κορμού και βρίσκεται σε άμεση επαφή μαζί τους μέσω της ασύρματης διεπαφής. Αποτελείται από έναν ελεγκτή σταθμών βάσης (Base Station Controller - BSC) που και τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης (Base Transceiver Station - BTS). Ο ελεγκτής σταθμών βάσης είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση της ασύρματης διεπαφής μέσω εντολών προς τους σταθμούς βάσης και τα κινητά τερματικά και συνδέεται από τη μία μεριά με πολλαπλούς σταθμούς βάσης και από την άλλη με ένα κέντρο μεταγωγής (βλ. από κάτω).
- Το δίκτυο κορμού (Core Network - CN), το οποίο περιλαμβάνει τα κέντρα μεταγωγής κινητών επικοινωνιών (Mobile Switching Centre - MSC) και τη βάση δεδομένων (DataBase - DB). Τα κέντρα μεταγωγής έχουν ως κύρια λειτουργία τον έλεγχο των κλήσεων προς και από τα κινητά τερματικά και συνδέονται από τη μία μεριά με το σύστημα σταθμών βάσης και από την άλλη με εξωτερικά δίκτυα. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τα τερματικά, το δίκτυο και λοιπές λειτουργίες. Παρόλο που απεικονίζεται ως ξεχωριστή οντότητα, είναι δυνατό οι πληροφορίες που περιλαμβάνει να φυλάσσονται σε οποιαδήποτε άλλη οντότητα του δικτύου.

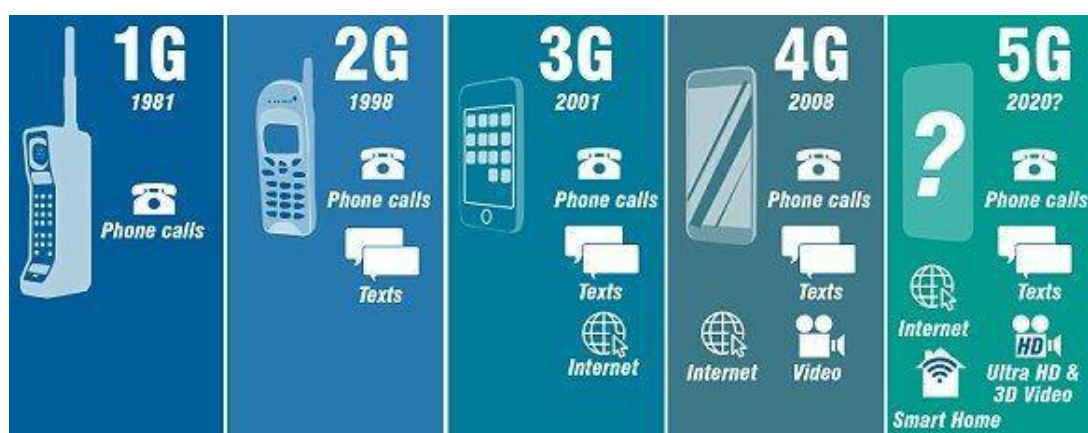


Σχήμα 6.1: Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου κινητών επικοινωνιών

6.2 Από το 1G στο 5G

6.2.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν εξελιχθεί ραγδαία. Οι γνωστοί όροι 1G, ..., 5G χαρακτηρίζουν την εκάστοτε γενιά δικτύων κινητών επικοινωνιών (G from Generation) με τους αύξοντες αριθμούς να υποδηλώνουν την εξέλιξη που πραγματοποιείται, η οποία εν γένει μπορεί να αναφέρεται στο σύστημα που χρησιμοποιείται, στην αρχιτεκτονική του, στην τεχνολογία, στην ταχύτητα που επιτυγχάνεται, στο εύρος ζώνης που αξιοποιείται, στην καθυστέρηση μετάδοσης αλλά και σε συνδυασμό των ανωτέρω. Κάθε γενιά έχει τα δικά της πρότυπα, τις δικές της τεχνικές αλλά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τη διαφοροποιούν από τις προηγούμενες γενιές. Στο Σχ.6.2 φαίνεται η διαφορά στις υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τις πέντε γενιές κινητών επικοινωνιών. [2]



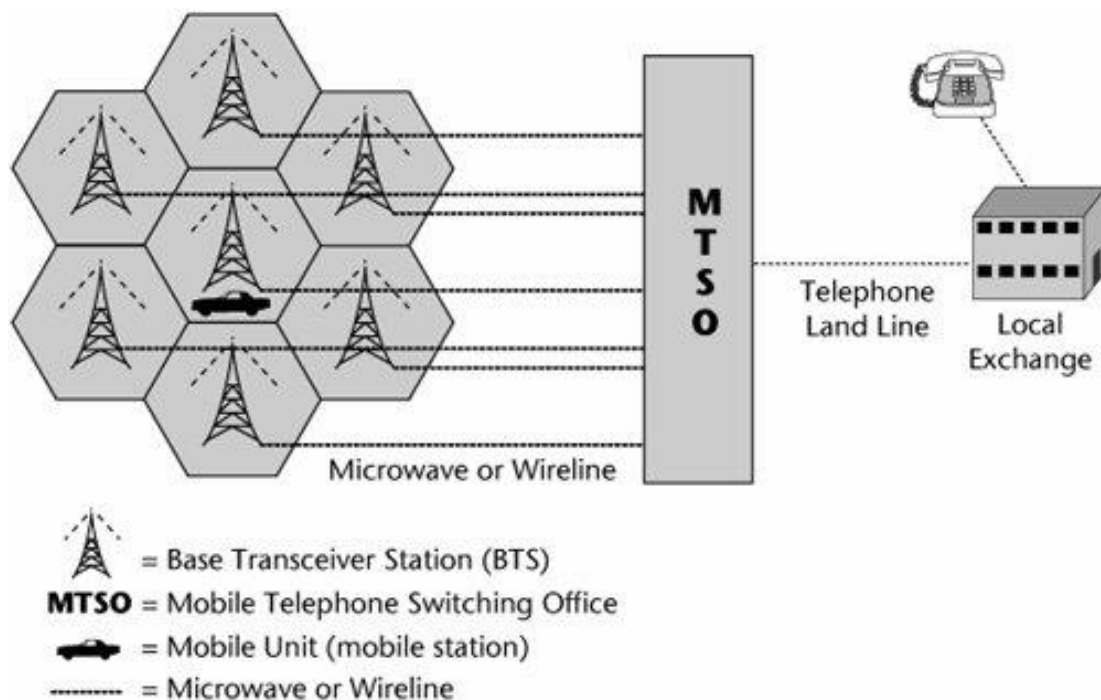
Σχήμα 6.2: Οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τις πέντε γενιές κινητών επικοινωνιών

6.2.2 1G

Η πρώτη γενιά αναφέρεται στις αναλογικές τεχνολογίες μετάδοσης που αναπτύχθηκαν για την παροχή της βασικής υπηρεσίας τηλεφωνίας. Το πρώτο αναλογικό κυβελωτό σύστημα αναπτύχθηκε από την εταιρία NTT (Nippon Telephone and Telegraph company) και άρχισε να λειτουργεί στην περιοχή του Τόκιο το 1979, ενώ σταδιακά επεκτάθηκε η χρήση του σε ολόκληρη τη χώρα.

Το AMPS (Advanced Mobile Phone Service) ήταν ένα από τα δημοφιλέστερα πρότυπα για αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 1983 στις ΗΠΑ και αργότερα σε άλλες χώρες και βασιζόταν στη διαμόρφωση συχνότητας (ενσωμάτωση της πληροφορίας στη συχνότητα του αναλογικού φέροντος σήματος) για τη μετάδοση των σημάτων. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν παρόμοια συστήματα με το AMPS, όπως το TACS (Total Access Communication System) στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ιταλία, στην Ισπανία, στην Αυστρία και στην Ιρλανδία, το NMT (Nordic Mobile Telephone) σε πολλές χώρες, το C-450 στη Γερμανία και στην Πορτογαλία, το Radiocom 2000 στη Γαλλία και το RTMS (Radio Telephone Mobile System) στην Ιταλία, τα οποία βασιζόνταν και αυτά στη διαμόρφωση συχνότητας.

Στο Σχ.6.3 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος AMPS. Το κινητό τερματικό επικοινωνεί ασύρματα με το σταθμό βάσης της κυψέλης όπου βρίσκεται, οι σταθμοί βάσης (μέσω του BSC) επικοινωνούν (ασύρματα ή ενσύρματα) με το κέντρο μεταγωγής (Mobile Telephone Switching Office - MTSO), το οποίο με τη σειρά του φροντίζει για τη σύνδεση με το δίκτυο PSTN, όπου και προωθείται η κλήση στο κατάλληλο σταθερό τηλέφωνο. Φυσικά είναι δυνατή και η αντίστροφη διαδικασία, όπου μια κλήση που εκκινεί από κάποιο σταθερό σημείο πρόσβασης να καταλήγει στο κινητό τερματικό.



Σχήμα 6.3: Αρχιτεκτονική AMPS

Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων πρώτης γενιάς παρουσιάζονται στον Πιν.6.1.

Γενιά	1G
Δεκαετία ανάπτυξης	1980
Υπηρεσίες	Αναλογική τηλεφωνία
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων	800-950MHz (ανάλογα την τεχνολογία)
Είδος πρόσβασης	FDMA
Μεταγωγή	Κυκλώματος
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	-
Δημοφιλή συστήματα	AMPS, NMT, TACS
Ακτίνα κυψέλης	2-20km
Βασικό χαρακτηριστικό	Θεμελίωση κινητών επικοινωνιών
Κύριες αδυναμίες	Κακή ποιότητα υπηρεσίας, μικρή ασφάλεια, μη αποδοτική χρήση φάσματος

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά συστημάτων πρώτης γενιάς

Μεταξύ των μειονεκτημάτων των συστημάτων πρώτης γενιάς περιλαμβάνονται:

- Η κακή ποιότητα φωνής εξαιτίας των παρεμβολών
- Ο μικρός χρόνος ζωής των μπαταριών των κινητών τηλεφώνων καθώς επίσης το μεγάλο τους μέγεθος
- Η μικρή ασφάλεια από υποκλοπές, καθώς μέσω ενός αποδιαμορφωτή FM ήταν δυνατή αποκωδικοποίηση των κλήσεων
- Ο περιορισμένος αριθμός χρηστών ανά κυψέλη και η μικρή κάλυψη των κυψελών
- Η υπηρεσία της περιαγωγής³⁴ δεν είναι δυνατή μεταξύ παρόμοιων συστημάτων
- Η μη αποδοτική αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος
- Η συχνή απόρριψη κλήσεων κατά την αλλαγή κυψέλης εξυπηρέτησης

[1] [4] [5] [6] [7] [8]

6.2.3 2G

Το 2G αναφέρεται στη δεύτερη γενιά συστημάτων κινητών επικοινωνιών που βασίστηκε στο σύστημα GSM (Global System for Mobile communications), το οποίο αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη άλλων προτύπων ασύρματων συστημάτων μετάδοσης. Η βασική του διαφορά από τα συστήματα πρώτης γενιάς εντοπιζόταν στην αρχιτεκτονική του, η οποία επέτρεπε τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων και αρχικά χρησιμοποιήθηκε παράλληλα με τα ήδη υπάρχοντα αναλογικά συστήματα.

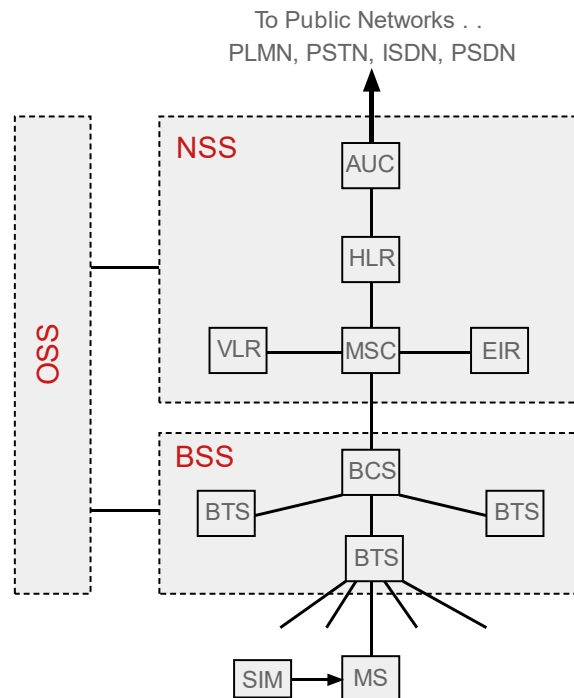
Η δεύτερη γενιά κατάφερε αισθητά πιο αποδοτική χρήση του φάσματος μέσω των αποδοτικών σχημάτων πρόσβασης που χρησιμοποιούσε (TDMA, FDMA, CDMA) με αποτέλεσμα να γνωρίσει μεγάλη επιτυχία στις υπηρεσίες φωνής. Επιπλέον εισήγαγε την υποστήριξη νέων υπηρεσιών όπως η αποστολή μηνυμάτων SMS και MMS (Short Message Service, Multimedia Message Service), τη δυνατότητα περιαγωγής σε όλη την Ευρώπη καθώς επίσης και τη μετάδοση δεδομένων με πολύ χαμηλούς ρυθμούς για fax, email και αρχεία. Ακόμη, προσέφερε τη δυνατότητα για κωδικοποιημένη μετάδοση φωνής, καθιστώντας την υπηρεσία περισσότερο εύρωστη σε υποκλοπές σε σχέση με τα συστήματα 1G. Ωστόσο, και σε αυτή τη γενιά οι παρεμβολές και η συχνή απόρριψη κλήσεων εξακολουθούσαν να συγκαταλέγονται μεταξύ των σημαντικότερων μειονεκτημάτων.

Αργότερα, προκειμένου να είναι δυνατή η υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, αναπτύχθηκαν νέα συστήματα, όπως το General Packet Radio Service (GPRS) το οποίο υποστήριζε ρυθμούς έως 171kbps ενώ συχνά αναφέρεται και ως 2.5G και το EDGE – (Enhanced Data GSM Evolution) το οποίο υποστήριζε ρυθμούς της τάξης έως 473.6kbps ενώ συχνά αναφέρεται και ως 2.75G. Μία ακόμη δημοφιλής τεχνολογία που αναπτύχθηκε με τον ίδιο στόχο ήταν η CDMA2000 που προσέφερε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 384kbps.

³⁴ Η υπηρεσία διεθνούς περιαγωγής (International Roaming) παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί το κινητό του τηλέφωνο ενώ βρίσκεται στο εξωτερικό και να κάνει χρήση όλων των υπηρεσιών που είναι διαθέσιμες στη χώρα του (κλήσεις, SMS, MMS, υπηρεσίες δεδομένων, κ.λπ.).

Η αρχιτεκτονική ενός GSM συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ.6.4. Το σύστημα GSM αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα:

- Το υποσύστημα δικτύου και μεταγωγής ή αλλιώς δίκτυο κορμού (Network and Switching Subsystem - NSS)
- Το υποσύστημα σταθμών βάσης (Base Station Subsystem - BSS)
- Το υποσύστημα λειτουργίας και υποστήριξης (Operation and Support Subsystem - OSS)
- Τον κινητό σταθμό (Mobile Station - MS) ή (όπως είναι ευρύτερα γνωστό) το κινητό τηλεκίνημα



Σχήμα 6.4: Αρχιτεκτονική GSM

Το υποσύστημα NSS, είναι ένα δίκτυο δεδομένων το οποίο περιλαμβάνει τις οντότητες που είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο και την επαφή με όλο το δίκτυο. Το κέντρο μεταγωγής επικοινωνεί, όπως αναμένεται, με τους ελεγκτές σταθμών βάσης (BCS) και εντός του υποσυστήματος, με τα διάφορα είδη καταχωρητών (Visitor Location Register – VLR, Home Location Register - HLR, Equipment Location Register - ELR) οι οποίοι είναι στην πραγματικότητα βάσεις δεδομένων που περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τους συνδρομητές, τις υπηρεσίες που τους παρέχονται αλλά και τον εξοπλισμό τους. Ακόμη στο NSS περιλαμβάνεται και η βάση δεδομένων AUC (Authentication Centre) η οποία περιέχει πληροφορίες για την πιστοποίηση των χρηστών.

Το υποσύστημα BSS περιλαμβάνει τις ήδη γνωστές οντότητες BCS και BTS, ενώ χρησιμοποιεί τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (radio access technology) προκειμένου πολλοί χρήστες να έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση στο σύστημα. Με τον όρο τεχνολογία ραδιοπρόσβασης νοείται ο φυσικός τρόπος διασύνδεσης εντός ενός δικτύου που χρησιμοποιεί τη μετάδοση ραδιοκυμάτων για την επικοινωνία.

Το υποσύστημα OSS είναι συνδεδεμένο τόσο με το υποσύστημα NSS όσο και με τους ελεγκτές σταθμών βάσης. Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τον

έλεγχο όλου του GSM δικτύου καθώς επίσης για τον έλεγχο της κίνησης στο υποσύστημα σταθμών βάσης. Καθώς οι σταθμοί βάσης πολλαπλασιάζονται με την αύξηση των συνδρομητών, μερικές από τις λειτουργίες συντήρησης μεταφέρονται στους σε αυτούς, προκειμένου να μην αυξηθεί πολύ το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων δεύτερης γενιάς παρουσιάζονται στον Πιν.6.2.

Γενιά	2G (2.5G, 2.75G)
Δεκαετία ανάπτυξης	1990 – Αρχές 2000
Υπηρεσίες	Ψηφιακή τηλεφωνία, SMS, MMS, μεταφορά δεδομένων χαμηλής ταχύτητας
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων	900MHz / 1,8GHz / 1,9GHz
Είδος πρόσβασης	TDMA, FDMA, CDMA
Μεταγωγή	Κυκλώματος
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	64Kbps (171Kbps, 473.6Kbps, 384Kbps)
Δημοφιλή συστήματα	GSM (GPRS, EDGE, CDMA2000)
Ακτίνα κυψέλης	Έως 35km με μακρο/μικρο/πικο/πεμπτοκυψέλες
Βασικό χαρακτηριστικό	Κινητές επικοινωνίες για όλους, ψηφιακή μορφή σημάτων
Κύριες αδυναμίες	Χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, παρεμβολές

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά συστημάτων δεύτερης γενιάς

[1] [4] [5] [6] [9]

6.2.4 3G

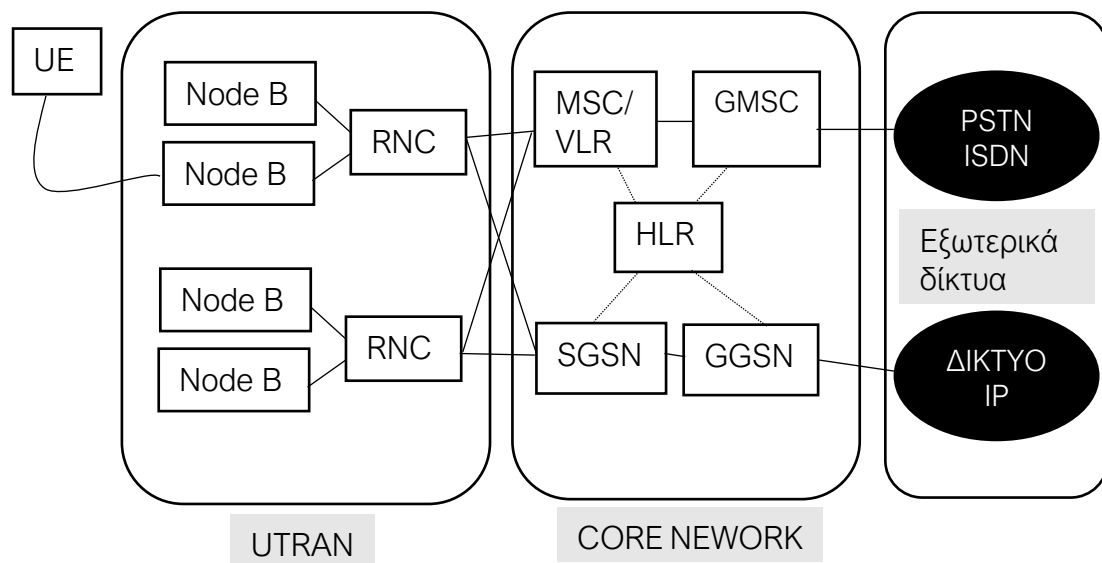
Η μετάβαση στην τρίτη γενιά συστημάτων σηματοδοτήθηκε από την ανάπτυξη και εφαρμογή του συστήματος UMTS (Universal Mobile Telecommunication Service) το οποίο υποστήριζε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και αισθητά καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Μεταξύ των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της τρίτης γενιάς συγκαταλέγονται η δυνατότητα πραγματοποίησης βίντεο κλήσεων, η παγκόσμια περιαγωγή και η σημαντικά βελτιωμένη ποιότητα τηλεφωνικών κλήσεων. Την ίδια περίοδο ξεκίνησε η ανάπτυξη και ευρεία χρήση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smart phones) παράλληλα με την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών για την υποστήριξη υπηρεσιών όπως η χρήση των κοινωνικών δικτύων, οι βίντεο-κλήσεις, τα παιχνίδια αλλά και για εφαρμογές υγείας.

Στα μειονεκτήματα των συστημάτων 3^{ης} γενιάς συμπεριλαμβάνονται:

- Το υψηλό κόστος των νέων τερματικών των χρηστών
- Η υψηλή κατανάλωση ισχύος των τερματικών των χρηστών
- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των δικτύων σε σχέση με αυτό των προηγούμενων γενιών
- Οι υψηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για την υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης
- Το υψηλό κόστος δέσμευσης των ανωτέρω ζωνών συχνοτήτων

Η εξέλιξη των 3G δικτύων μέσω των συστημάτων HSPA (High Speed Packet Access) και του HSPA+ (evolved HSPA) προσέφερε σημαντικά βελτιωμένη δικτυακή απόδοση ενώ σταδιακά οδήγησε στην ανάπτυξη των συστημάτων τέταρτης γενιάς. Το σύστημα HSPA αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως 3.5G, το HSPA+ ως 3.75G ενώ η πλέον εξελιγμένη μορφή του είναι γνωστή ως 3.9G ή αλλιώς LTE (Long Term Evolution).

Η αρχιτεκτονική του δικτύου UMTS παρουσιάζεται στο Σχ.6.5. Τα στοιχεία του δικτύου ομαδοποιούνται στο επίγειο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network - UTRAN) που χειρίζεται τις λειτουργίες σχετικές με το ραδιοδίκτυο και το δίκτυο κορμού που είναι υπεύθυνο για τη μεταγωγή και δρομολόγηση των κλήσεων και των δεδομένων προς τα εξωτερικά δίκτυα. Η συσκευή του χρήστη (User Equipment - UE) αποτελεί, ως αναμένεται, τη διεπαφή μεταξύ χρήστη και δικτύου πρόσβασης.



Σχήμα 6.5: Αρχιτεκτονική UMTS

Το UTRAN αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία. Τα Node B αποτελούν τους σταθμούς βάσεις και συνδέονται με τον ελεγκτή ασύρματου δικτύου (Radio Network Controller - RNC). Ο RNC έχει τη δικαιοδοσία και τον έλεγχο των ασύρματων πόρων των κόμβων που συνδέονται με αυτόν και είναι επίσης το σημείο πρόσβασης όλων των υπηρεσιών που παρέχει το UTRAN στο δίκτυο κορμού.

Στο δίκτυο κορμού, τα στοιχεία MSC/VLR είναι τα γνωστά από την αρχιτεκτονική του GSM ενώ το GMSC (Gateway MSC) είναι το διαβιβαστικό κέντρο μεταγωγής που συνδέει του UMTS με τα εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής. Η οντότητα SGSN (Serving GPRS Support Node) επιτελεί παρόμοιες λειτουργίες με το MSC/VLR αλλά για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου και το GGSN (Gateway GPRS Support Node) είναι το αντίστοιχο διαβιβαστικό κέντρο για τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου.

Αξίζει να σημειωθεί πως το UMTS ήταν συμβατό με τις παλαιότερες γενιές ασύρματων κινητών τεχνολογιών, λόγω της δυνατότητάς του να συνυπάρχει με τα συστήματα GSM και AMPS.

Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων τρίτης γενιάς παρουσιάζονται στον Πιν.6.3.

Γενιά	3G (3.5G, 3.75G, 3.9G)
Δεκαετία ανάπτυξης	2000
Υπηρεσίες	Ψηφιακή τηλεφωνία, μηνύματα, μεταφορά δεδομένων, υποστήριξη βίντεο κλήσεων
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων	2,1GHz
Είδος πρόσβασης	WCDMA
Μεταγωγή	Κυκλώματος/Πακέτου
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	2,4Mbps
Δημοφιλή συστήματα	UMTS, HPSA, HPSA+, LTE
Ακτίνα κυψέλης	
Βασικό χαρακτηριστικό	Μετάδοση δεδομένων
Κύριες αδυναμίες	Κόστος (τερματικών, ανάπτυξης και συντήρησης δικτύου, δέσμευσης ζωνών συχνοτήτων)

Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά συστημάτων τρίτης γενιάς

[1] [4] [5] [6] [10]

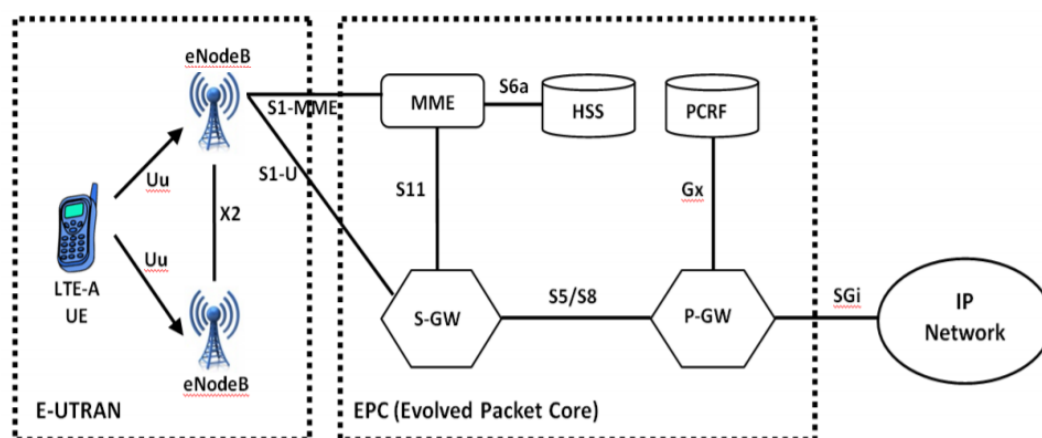
6.2.5 4G

Το 4G αντιπροσωπεύει τη γενιά τεχνολογιών κινητών επικοινωνιών που αναπτύχθηκε για να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις για ευρυζωνική μετάδοση δεδομένων και ευρυεκπομπή, παράλληλα με το συνεχώς αυξανόμενο όγκο χρηστών. Τα συστήματα 4G είναι στην ουσία οι βελτιωμένες εκδοχές των 3G συστημάτων που αναπτύχθηκαν από την IEEE και προσφέρουν σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες από αυτά, βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας καθώς επίσης υποστηρίζουν πιο περίπλοκες υπηρεσίες δεδομένων.

Το LTE καθώς επίσης όλες οι εξελιγμένες μορφές του χρησιμοποιούνται σε αυτή τη γενιά. Η ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και δεδομένων είναι δυνατή με τα LTE συστήματα, γεγονός που αυξάνει δραστικά το ρυθμό μετάδοσης. Όλες οι υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών φωνής, μεταδίδονται μέσω IP πακέτων. Πολύπλοκα σχήματα διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χωρητικότητας της άνω και κάτω ζεύξης. Ασύρματες τεχνολογίες μετάδοσης όπως η WiMax εισήχθησαν με τα 4G για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης και της απόδοσης των δικτύων.

Στα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων τέταρτης γενιάς συγκαταλέγονται οι αυξημένοι ρυθμοί μετάδοσης έως 1Gbps, η βελτιωμένη ασφάλεια μετάδοσης, η χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης σε εφαρμογές κρίσιμης σημασίας, η υψηλή ευκρίνεια σε εφαρμογές video streaming and gaming καθώς επίσης και η υποστήριξη υπηρεσιών φωνής μέσω των IP πακέτων. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος εξοπλισμού και υποδομών, το υψηλό κόστος δέσμευσης των ζωνών συχνοτήτων σε πολλές χώρες, το υψηλό κόστος συμβατών τερματικών συσκευών και η χρονοβόρα ανάπτυξη και αναβάθμιση των συστημάτων.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου LTE παρουσιάζεται στο Σχ.6.6 και αποτελείται από: το κινητό τερματικό (UE), το εξελιγμένο δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Evolved UTRAN: E-UTRAN) και το δίκτυο κορμού(εξελιγμένο δίκτυο πακέτων: Evolved Packet Core – EPC).



Σχήμα 6.6: Αρχιτεκτονική LTE

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (E-UTRAN ή αλλιώς LTE) είναι υπεύθυνο για την ασύρματη σύνδεση μεταξύ των κινητών τερματικών και των κεραιών των παρόχων και περιλαμβάνει τις κατωτέρω οντότητες:

- Τα LTE τερματικά (LTE Mobile Terminals), δηλαδή τις κινητές συσκευές που υποστηρίζουν το LTE πρότυπο.
- Τους κόμβους (E-UTRAN Node B or evolved Node Bs or eNBs), οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε όλη την έκταση του δικτύου του παρόχου και συνδέουν το κινητό τερματικό με το δίκτυο κορμού.

Το δίκτυο κορμού στο LTE που είναι γνωστό με τον όρο EPC, είναι υπεύθυνο για την παροχή όλων των υπηρεσιών στους κινητούς χρήστες. Μέσω των οντοτήτων που διαθέτει συνδέει τα κινητά τερματικά μεταξύ τους όπως επίσης συνδέει το κινητό δίκτυο με το δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας αλλά και με το διαδίκτυο. Αποτελείται από τις ακόλουθες οντότητες:

- Η μονάδα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management Entity - MME) είναι ο κύριος κόμβος ελέγχου και είναι υπεύθυνη για τη σηματοδότηση κινητικότητας και ασφάλειας, τον εντοπισμό και την καταγραφή των κινητών τερματικών.
- Η πύλη εξυπηρέτησης (Serving Gateway: S-GW) μεταφέρει την κίνηση των χρηστών από τα τερματικά στα εξωτερικά δίκτυα και διασυνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού.
- Η πύλη πακέτων δεδομένων δικτύου (Packet Data Network Gateway: P-GW) συνδέει το δίκτυο κορμού με τα εξωτερικά δίκτυα και είναι υπεύθυνη για τη δρομολόγηση της κίνησης προς και από αυτά.
- Ο εξυπηρετητής οικείων συνδρομητών (Home Subscriber Server - HSS) είναι η βάση δεδομένων όλων των χρηστών κινητής που περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που τους αφορούν, ενώ επιφορτίζεται με τις λειτουργίες πιστοποίησης των χρηστών και εγκατάστασης των κλήσεων και των συνεδριών.
- Ο κόμβος PCRF (Policy and Charging Rules Function) είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή των πολιτικών πραγματικού χρόνου και φόρτισης (real-time policy rules and charging) στο δίκτυο κορμού.

Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων τέταρτης γενιάς παρουσιάζονται στον Πιν.6.4.

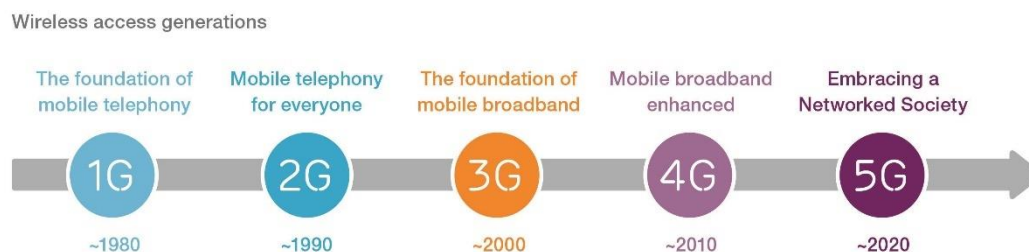
Γενιά	4G
Δεκαετία ανάπτυξης	2010-2016
Υπηρεσίες	Τηλεφωνία (VoIP), μηνύματα, μετάδοση δεδομένων, HD video streaming & gaming
Χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων	800Mbps, 1800Mbps, 2600Mbps (Στην Ελλάδα)
Είδος πρόσβασης	OFDMA/ MIMO/ SC-FDMA
Μεταγωγή	Κυκλώματος/Πακέτου
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	Ως 1Gbps
Δημοφιλή συστήματα	LTE
Ακτίνα κυψέλης	
Βασικό χαρακτηριστικό	Βελτιωμένη απόδοση ως προς τις υπηρεσίες δεδομένων
Κύριες αδυναμίες	Κόστος (τερματικών, ανάπτυξης και συντήρησης δικτύου, δέσμευσης ζωνών συχνοτήτων)

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά συστημάτων τέταρτης γενιάς

[5] [6] [11] [12]

6.2.6 Σύνοψη

Συνοψίζοντας την εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών (Σχ.6.7), φαίνεται πως με την πρώτη γενιά συστημάτων θεμελιώθηκαν οι βασικές αρχές για τις κινητές επικοινωνίες, ενώ με τη δεύτερη γενιά οι κινητές επικοινωνίες έγιναν διαθέσιμες προς όλους. Με την τρίτη γενιά τέθηκαν οι βάσεις για τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες, ενώ η εξέλιξή τους οδήγησε στην τέταρτη γενιά. Μέσω των τεχνολογιών 3G και 4G κατέστη δυνατή η διασύνδεση μεταξύ ανθρώπων αλλά και αντικειμένων (στην περίπτωση του LTE), ενώ, χάρη στην πέμπτη γενιά, αναμένεται πως θα είναι δυνατή κάθε είδους διασύνδεση (ανθρώπων-ανθρώπων, ανθρώπων-αντικειμένων, αντικειμένων-αντικειμένων). Δηλαδή, θα είναι δυνατό να συνδεθεί ο οποιοσδήποτε, σε οποιοδήποτε μέρος και οποιαδήποτε στιγμή οποιοδήποτε θέλει.



Σχήμα 6.7: Η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών

6.3 Η πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών (5G)

6.3.1 Γενικά για το 5G

Η πέμπτη γενιά κινητών δικτύων σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των υπηρεσιών δεδομένων, της ανάπτυξης του τομέα του IoT (Internet of Things) αλλά και τις καινοτομίες που επιφυλάσσει το μέλλον. Όπως φαίνεται, με το 5G θα δημιουργηθεί ένα περιβάλλον όπου θα υπάρχει πλήρης διασυνδεσιμότητα μεταξύ δισεκατομμυρίων συσκευών και στο οποίο θα παρέχονται σημαντικά βελτιωμένες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων ταχείας ανταπόκρισης και αξιοπιστίας, πολύ μικρής καθυστέρησης σε πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Αναμένεται επίσης η βελτιστοποίηση πολλών ακόμη παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις κινητές τηλεπικοινωνίες όπως είναι η διεκπεραιωτικότητα, η ποιότητα υπηρεσιών (QoS) αλλά και η ποιότητα της εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) χάρη στις οποίες θα μπορέσει να αναπτυχθεί και να υποστηριχθεί μία νέα γενιά εφαρμογών, υπηρεσιών και ευκαιριών (Σχ.6.8).

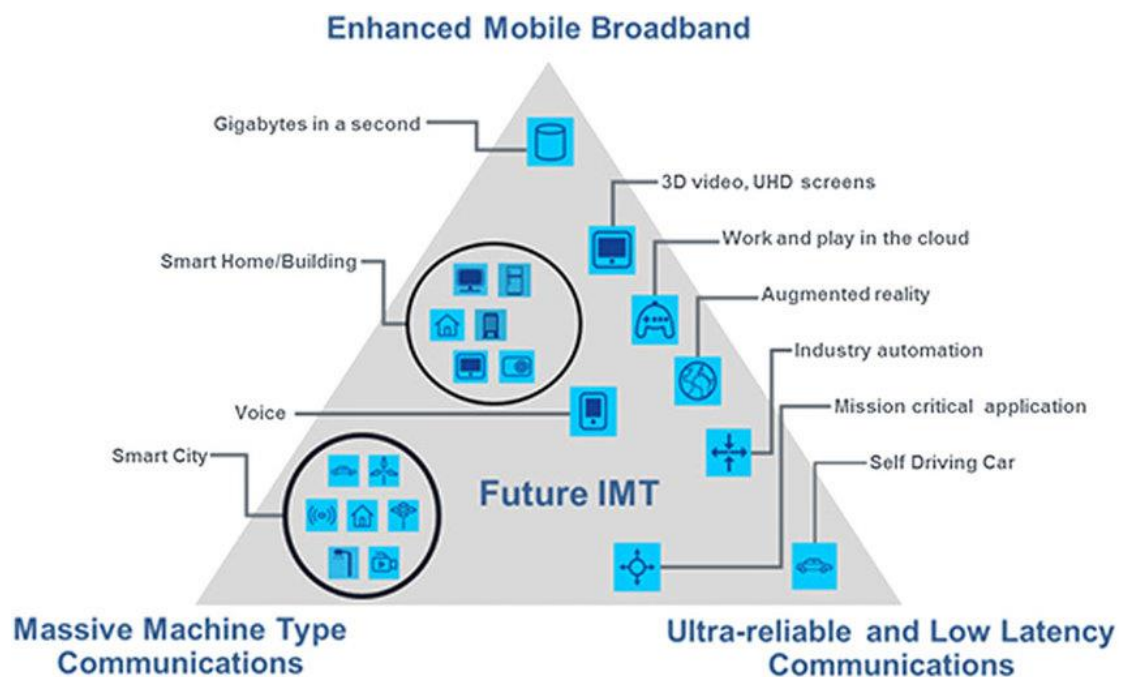


Σχήμα 6.8: Η πέμπτη γενιά κινητών επικοινωνιών

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών οι υπηρεσίες των κινητών δικτύων 5G μπορούν να χωριστούν σε τρεις γενικές κατηγορίες (Σχ.6.9):

1. Μαζικές επικοινωνίες M2M (Massive Machine to Machine communications), οι οποίες περιλαμβάνουν τη σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα σε τεράστια κλίμακα. Ως εκ τούτου αναμένεται επανάσταση, μεταξύ άλλων, στις βιομηχανικές διεργασίες, στις εφαρμογές που σχετίζονται με τη γεωργία αλλά και στην επικοινωνία των επιχειρήσεων.

2. Επικοινωνίες υψηλής αξιοπιστίας και μικρής καθυστέρησης (Ultra-reliable low latency communications) οι οποίες είναι καίριας σημασίας και περιλαμβάνουν τον έλεγχο συσκευών, εφαρμογές στη βιομηχανική ρομποτική, επικοινωνία μεταξύ οχημάτων (V2V communications), αυτόματη οδήγηση και ασφαλέστερα δίκτυα μεταφορών. Ακόμη, χάρη στην πολύ μικρή καθυστέρηση ανοίγονται νέοι ορίζοντες στον τομέα της απομακρυσμένης ιατρικής φροντίδας, καθιστώντας εφικτές νέου τύπου παροχές σε ασθενείς.
3. Βελτιωμένες κινητές ευρυζωνικές επικοινωνίες (Enhanced mobile broadband) παρέχοντας σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι νέες εφαρμογές αναμένεται να περιλαμβάνουν σταθερή ασύρματη πρόσβαση (Fixed Wireless Access) στο διαδίκτυο για οικιακούς χρήστες, εφαρμογές υπαίθριας ευρυεκπομπής χωρίς την ανάγκη για φορητά εξωτερικών μεταδόσεων αλλά και μεγαλύτερη συνδεσιμότητα για χρήστες που είναι διαρκώς σε κίνηση.

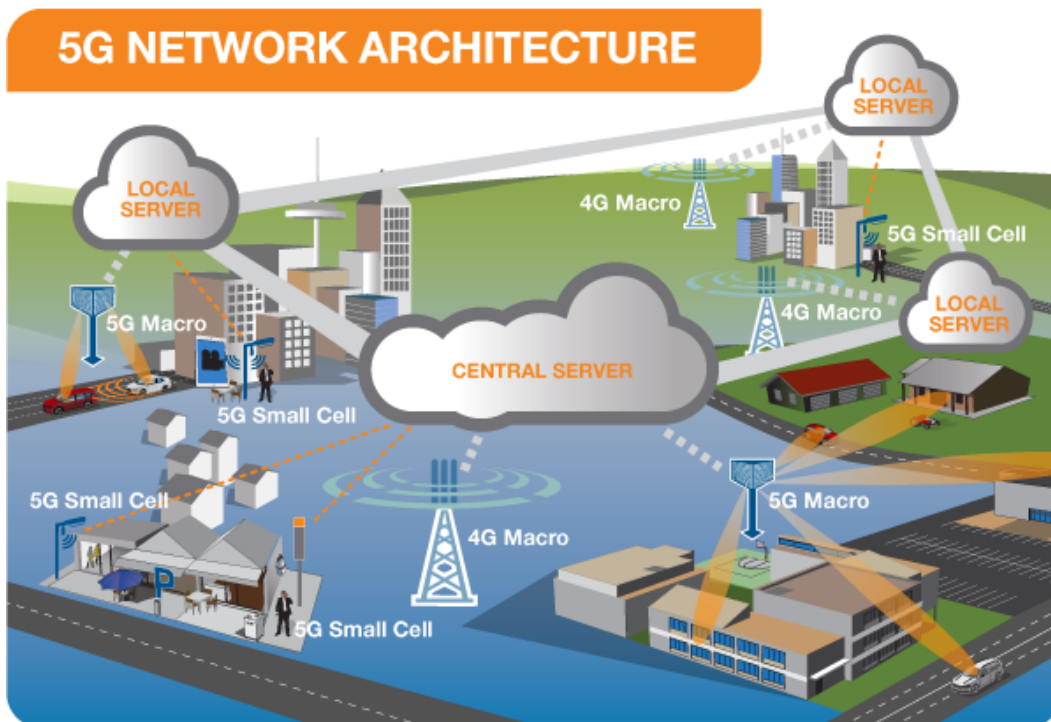


Σχήμα 6.9: Υπηρεσίες δικτύων 5G

[5] [13] [14]

6.3.2 Αρχιτεκτονική δικτύων 5G

Φαίνεται πως, αρχικά, οι περισσότεροι πάροχοι σκοπεύουν να ενσωματώσουν τα δίκτυα 5G στα υπάρχοντα 4G δίκτυα. Στο Σχ.6.10 φαίνεται η δομή ενός 5G δικτύου με ταυτόχρονη λειτουργία του 4G και του 5G όπου οι κεντρικοί και τοπικοί εξυπηρετητές παρέχουν μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης στους χρήστες.



Σχήμα 6.10: Δίκτυο 5G

Όπως συμβαίνει και στις προηγούμενες γενιές δικτύων, το δίκτυο 5G αποτελείται από δύο βασικά υποδίκτυα: το δίκτυο ραδιοπρόσβασης και το δίκτυο κορμού.

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network-RAN) περιλαμβάνει υποδομές διαφόρων τύπων όπως μικρές κυψέλες, πύργους, ιστούς και ειδικά σχεδιασμένα συστήματα σε κτήρια που συνδέουν τους χρήστες αλλά και τις ασύρματες συσκευές στο κύριο δίκτυο κορμού.

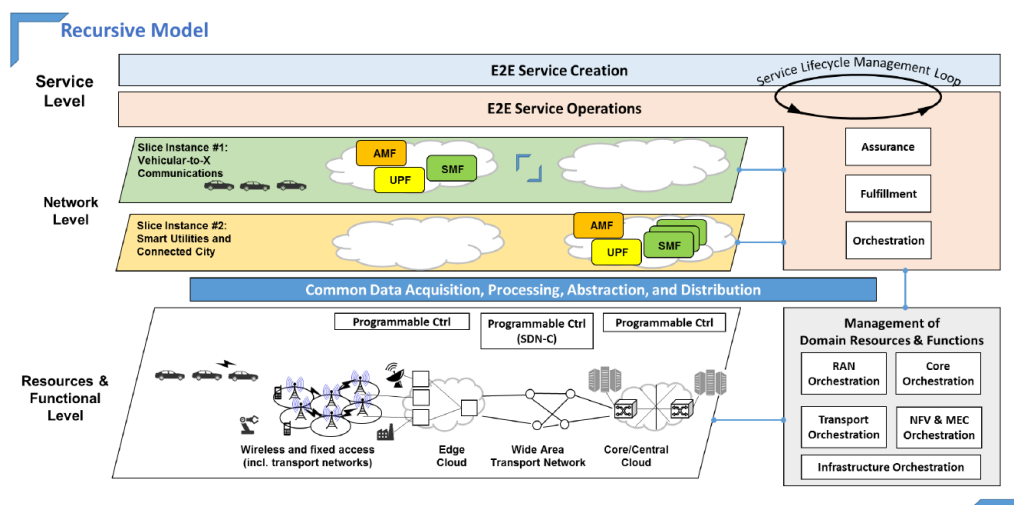
Οι μικρές κυψέλες αναμένεται να αποτελέσουν βασικό χαρακτηριστικό των 5G δικτύων, ιδίως όσες λειτουργούν στη χιλιοστομετρική ζώνη συχνοτήτων (mmWave). Για την παροχή συνεχούς σύνδεσης οι κυψέλες θα είναι καταναμημένες βάσει των τοπικών απαιτήσεων συνδεσιμότητας των χρηστών και θα λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τις μακροκυψέλες που επιφορτίζονται με την ευρεία κάλυψη.

Οι 5G μακροκυψέλες θα χρησιμοποιούν κεραιές MIMO, οι οποίες θα μπορούν, λόγω της δομής τους, να στέλνουν και να λαμβάνουν μεγάλο όγκο δεδομένων ταυτόχρονα. Ως αποτέλεσμα, περισσότεροι χρήστες θα δύναται να συνδεθούν στο δίκτυο ταυτόχρονα, διατηρώντας υψηλή τη διεκπεραιωτικότητα. Συχνά οι κεραιές MIMO αναφέρονται και ως Massive MIMO λόγω του μεγάλου αριθμού στοιχείων και συνδέσεων που περιέχουν, παρά το μέγεθός τους, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό των ήδη υπάρχοντων κεραιών σταθμών βάσης των δικτύων 3G και 4G.

Το δίκτυο κορμού είναι αυτό που διαχειρίζεται όλες τις κινητές συνδέσεις φωνής, δεδομένων και διαδικτύου. Στην περίπτωση του 5G, το δίκτυο κορμού ανασχεδιάζεται προκειμένου να ενσωματώσει όλες τις υπηρεσίες διαδικτύου και νέφους (internet and cloud services) και επιπλέον περιέχει καταναμημένους εξυπηρετητές σε όλο το δίκτυο για την παροχή βελτιωμένων χρόνων απόκρισης.

Στα προηγμένα χαρακτηριστικά του 5G περιλαμβάνονται ο τεμαχισμός του δικτύου (network slicing) και η εικονοποίηση λειτουργιών δικτύου (network function virtualization), δύο λειτουργίες που θα λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο κορμού. Ο τεμαχισμός του δικτύου αποτελεί μία έξυπνη λύση για τον διαμοιρασμό του δικτύου για συγκεκριμένο κλάδο, επιχείρηση ή εφαρμογή. Για παράδειγμα, υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης θα μπορούν να λειτουργούν σε ένα τμήμα του δικτύου ανεξάρτητα από άλλους χρήστες. Η εικονοποίηση λειτουργιών δικτύου είναι η δυνατότητα πραγματοποίησης λειτουργιών δικτύου σε πραγματικό χρόνο σε οποιαδήποτε τοποθεσία εντός της πλατφόρμας νέφους (cloud) του παρόχου. Για παράδειγμα, λειτουργίες οι οποίες παλαιότερα απαιτούσαν να έχει ο πάροχος στην κατοχή του το υλικό (hardware) επί του οποίου θα λειτουργούσαν, όπως για παράδειγμα υπηρεσίες προστασίας και κρυπτογράφησης στο χώρο των επιχειρήσεων, τώρα είναι δυνατό να λειτουργούν σε εικονικές μηχανές.

Στο Σχ.6.11 φαίνεται η αρχιτεκτονική του 5G, όπως αυτή παρουσιάστηκε τον Ιούνιο του 2019 από την ομάδα εργασίας «5G PPP Architecture Working Group» που αποτελεί μέρος της 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership), της ευρωπαϊκής σύμπραξης που συγκροτήθηκε με στόχο την ανάπτυξη της τεχνολογίας, της αρχιτεκτονικής αλλά και των προτύπων για τις κινητές επικοινωνίες της νέας γενιάς (5G). Στο Σχ.6.11 διακρίνεται η ύπαρξη πλέον ενός δικτύου νέφους (στο ακραίο δίκτυο – edge cloud αλλά και στο δίκτυο κορμού core/central cloud) αλλά και η λειτουργία του network slicing (network level->slice interface #1, slice interface #2). [13] [15] [16] [17]



Σχήμα 6.11: Αρχιτεκτονική 5G

6.3.3 G.fast as a backhaul solution for 5G networks

6.3.3.1 Τι είναι το «backhaul network»

Ο όρος *Backhaul Network (BN)*, χρησιμοποιείται ευρέως στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, συχνά απαντάται με τους συνώνυμους όρους back-net και backbone network (δίκτυο «ραχοκοκαλιάς») ενώ στερείται ακριβής ελληνικής απόδοσης. Στα κυβελωτά δίκτυα, με τον όρο backhaul εννοείται το δίκτυο που συνδέει τους κόμβους eNBs με το δίκτυο κορμού και αποτελείται κυρίως από οπτικές ίνες, χάλκινα καλώδια, μικροκυματικές ζεύξεις και, σε ορισμένες περιπτώσεις, από δορυφορικές ζεύξεις. [15]

6.3.3.2 Backhauling in 5G

Στα δίκτυα πριν το LTE, ο RNC (ελεγκτής ασυρμάτου δικτύου) λειτουργούσε ως BN συγκεντρωτής της κίνησης από όλους σταθμούς βάσης της εμβέλειάς του προς το δίκτυο κορμού. Στα δίκτυα LTE, παρά την απουσία του RNC, η συγκέντρωση της κίνησης εξακολουθεί να είναι επιθυμητή. Στα δίκτυα 5G, το BN έχει γίνει πιο πολύπλοκο. Παράγοντες όπως το εύρος ζώνης και η μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση καθιστούν τις οπτικές ίνες τη μόνη βιώσιμη επιλογή για τη σύνδεση των σταθμών βάσης με το πρώτο σημείο συγκέντρωσης της κίνησης. Ωστόσο, γίνεται έρευνα με στόχο την ανάπτυξη του ήδη υπάρχοντος BN για την υποστήριξη των απαιτήσεων του 5G δικτύου, αλλά και την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε αυτό. Στον Πιν.6.5 παρουσιάζονται όλες οι δυνατές ενσύρματες επιλογές backhauling. [15]

Technology	Options	Upstream Throughput	Downstream Throughput	Latency/ jitter	Distance
Fibre PtP	PtP	≥10Gbps	≥10 Gbps	< 1msec	~20Km
PON/VDSL2	FTTC	10 – 50 Mbps	80-100 Mbps	3.8-11.8msec one-way	<1Km copper length
GPON	FTTP	1.24Gbps	2.5Gbps	1-7msec	Up to 29Km
NGPON	FTTP	2.5Gbps	5Gbps	1-7msec	Up to 29Km
EPON	FTTP	1Gbps	1Gbps	1-7msec	N/A
10G-EPON	FTTP	1Gbps	10Gbps	1-7msec	N/A
VDSL2		15Mbps	75Mbps	5-15msec one-way	1Km
VDSL2 ph2		20Mbps	100Mbps	3msec	1.5Km
VDSL ph4		40Mbps	230Mbps	3msec	1.5Km
VDSL ph8		150Mbps	750Mbps	3msec	1.5Km
G.FAST 50m	50m	1Gbps	1Gbps	< 1msec	5 m
G.FAST 100m	100m	500Mbps	500Mbps	< 1msec	100m
G.FAST 200m	200m	200Mbps	200Mbps	< 1msec	200m
DOCSIS 3.0		108Mbps	304Mbps	10-20msec	1.5Km
DOCSIS 3.1		1Gbps	5-10Gbps	N/A	N/A
Euro DOCSIS	3.0	108Mbps	400Mbps	10-20msec	1.5Km

Πίνακας 6.5: Backhauling solutions σε δίκτυα 5G

6.3.3.3 G.fast as a backhaul solution

Από τον Πιν.6.5 φαίνεται πως μία από τις δυνατές επιλογές backhauling είναι το G.fast. Καθώς η τοποθέτηση οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα ακριβή, χρονοβόρα και ενδεχομένως αδύνατη επιλογή ορισμένες φορές, η χρήση του G.fast αποτελεί μία ελκυστική εναλλακτική λύση σε αυτές τις περιπτώσεις.

Τα τελευταία χρόνια, ερευνητές της British Telecom παρουσίασαν πώς το G.fast μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης, επιτυγχάνοντας ταχύτητες της τάξης των 150-200Mbps. Με αυτόν τον τρόπο, εξαλείφεται η ανάγκη των παρόχων να επενδύσουν σε δαπανηρές backhaul ζεύξεις υψηλής χωρητικότητας μέσω οπτικών ινών. Μέσω της πολύ πιο οικονομικής σύνδεσης μεταξύ του σταθμού βάσης και του δικτύου κορμού, οι υπηρεσίες RAN που θα παρέχονται μέσω του G.fast θα οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του κόστους ανάπτυξης των δικτύων 4G και 5G στο μέλλον. Ακόμη, υπάρχουν πάροχοι οι οποίοι στρέφονται προς το διάδοχο του G.fast (G.mgfast) το οποίο έχει σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τη νέα δομή του δικτύου ραδιοπρόσβασης. [18] [19]

Ωστόσο, φαίνεται πως οι πάροχοι έχουν στρέψει την προσοχή τους στις τεχνολογίες που παρέχονται αποκλειστικά μέσω των οπτικών ινών, με την τεχνολογία NG-PON2 να είναι η δημοφιλέστερη επιλογή σύμφωνα με την ADTRAN καθώς προσφέρει μία κλιμακούμενη αρχιτεκτονική, υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και, συγκριτικά με άλλες λύσεις που περιλαμβάνουν οπτικές ίνες, χαμηλό κόστος για τους παρόχους. [20]

6.4 Συμπεράσματα

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών αναπτύσσεται διαρκώς καθώς οι εξελίξεις στην τεχνολογία επιτρέπουν νέες καινοτομίες και ιδέες να εφαρμοστούν παρέχοντας λύσεις υψηλής ποιότητας στους πελάτες, οι οποίοι με τη σειρά τους γίνονται ολοένα πιο απαιτητικοί. Στις ενσύρματες επικοινωνίες είναι ξεκάθαρο πως, για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων, οι οπτικές ίνες θα αποτελέσουν μελλοντικά την προτιμότερη επιλογή. Όμως μέχρι τη στιγμή που αυτές θα είναι διαθέσιμες σε όλους με τις προδιαγραφές που επιθυμούν, το ερώτημα μετατρέπεται στο ποια θα αποτελέσει την προσωρινή λύση.

Όπως σε κάθε πρόβλημα, έτσι και στις τηλεπικοινωνίες, κάθε απόφαση ανάγεται στο ζύγισμα των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που προσφέρει κάθε επιλογή. Είναι κρίσιμης σημασίας η συνειδητοποίηση της ανταλλακτικής σχέσης (tradeoff) που συνδέει τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις καθώς και η ιεράρχηση των προδιαγραφών που πρέπει αυτές να πληρούν προκειμένου να γίνεται κάθε φορά η βέλτιστη επιλογή. Δεν είναι πάντα υπαρκτή μία επιλογή που να κυριαρχεί ξεκάθαρα των υπολοίπων.

Επιστρέφοντας στο αρχικό ερώτημα, το G.fast φαίνεται πως αποτελεί μία ικανοποιητική λύση για τις ενσύρματες επικοινωνίες, καθώς πληροί προδιαγραφές ταχύτητας, ποιότητας, κόστους και ευκολίας στην ανάπτυξη. Είναι ξεκάθαρο όμως πως αποτελεί προσωρινή λύση, μέχρι να αντικατασταθεί από τις τεχνολογίες των δικτύων που αποτελούνται μόνο από οπτικές ίνες. Μάλιστα, όπως φαίνεται, πολλοί πάροχοι δεν την επιλέγουν ούτε προσωρινά, καθώς έχουν ήδη επικεντρωθεί στην ανάπτυξη δικτύων οπτικών ινών. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικουρικά στην ανάπτυξη οπτικών δικτύων ώστε να εξυπηρετηθούν συνδρομητές σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή για τεχνικούς ή άλλους λόγους η εγκατάσταση οπτικών ινών. Η χρήση αυτή είναι εφικτή λόγω των εφάμιλλων ταχυτήτων που προσφέρουν οι δύο τεχνολογίες.

6.5 Βιβλιογραφία

- [1] Μιχαήλ Ε. Θεολόγου, «ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ», Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
- [2] <http://www.unisonsite.com/pdf/resource-center/Think%20Small%20Unison-whitepaper-7D.pdf>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network
- [4] Ms. Lopa J. Vora, «EVOLUTION OF MOBILE GENERATION TECHNOLOGY: 1G TO 5G AND REVIEW OF UPCOMING WIRELESS TECHNOLOGY 5G», IJMTER, 2015
- [5] Opeoluwa Tosin Eluwole, Nsima Udoh, Mike Ojo, Chibuzo Okoro and Akintayo Johnson Akinyoadе, «From 1G to 5G, What Next?», IAENG International Journal of Computer Science, 2018
- [6] <https://www.rfpage.com/evolution-of-wireless-technologies-1g-to-5g-in-mobile-communication/>
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Mobile_Phone_System
- [9] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/2g-gsm/network-architecture.php>
- [10] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-umts/network-architecture.php>
- [11] <https://pdfs.semanticscholar.org/b2ab/1c503c76a4b3870feaec5c3a6a157972a555.pdf>
- [12] <https://www.frequencycheck.com/countries/greece>
- [13] <http://www.emfexplained.info/?ID=25916#How%20does%205G%20work>
- [14] Huawei Technologies, «5G Network Architecture - A High Level Perspective», 2016
- [15] MONA JABER, MUHAMMAD ALI IMRAN, RAHIM TAFAZOLLI AND ANVAR TUKMANOV, «5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey», IEEE ACCESS, 2016
- [16] 5G PPP Architecture Working Group, “View on 5G Architecture”, Version 3.0, June 2019
- [17] <https://5g-ppp.eu/>
- [18] <https://www.prnewswire.com/news-releases/bt-trials-cloud-ran-over-gfast-in-step-towards-5g-300217292.html>
- [19] <https://rethinkresearch.biz/articles/uk-operators-trial-massive-mimo-5g-broadcast-and-g-fast-backhaul/>
- [20] <https://portal.adtran.com/web/fileDownload/doc/33802>

