



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Ενσύρματα Δίκτυα Πρόσβασης Ευρείας Ζώνης

**Σημειώσεις για το μάθημα: Δίκτυα Πρόσβασης Ευρείας Ζώνης
(ΚΔΕ02)**

Θεοφάνης Γ. Ορφανουδάκης

Τρίπολη, Οκτώβριος 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<i>Περιεχομενα</i>	<i>iii</i>
<i>Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή</i>	<i>1</i>
<i>Κεφάλαιο 2 – Τεχνολογίες Ψηφιακού Συνδρομητικού Βρόχου (Digital Subscriber Line-DSL)</i>	<i>3</i>
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2 ΔΙΚΤΥΑΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ DSL	5
2.1 Εισαγωγή	5
2.2 Λειτουργικές μονάδες και υποσυστήματα	6
2.2.1 Γραμμή μεταφοράς (Digital Local Line - DLL)	7
2.2.2 Διαχωριστής (xDSL Splitter).....	11
2.2.3 Διαποδιαμορφωτής συνδρομητή (DSL Modem-Remote/ATU-R)	12
2.2.4 Διαποδιαμορφωτής συνδρομητικού κέντρου (DSL Modem-Central Office/ATU-C).....	13
2.2.5 Πολυπλέκτης πρόσβασης (DSL Access Multiplexer - DSLAM)	13
2.2.6 Συσκευές δρομολόγησης (Routing/Switching).....	15
3 ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ	16
3.1 Ενθυλάκωση κατά το πρότυπο RFC 1483	19
3.1.1 Ενθυλάκωση LLC.....	19
3.1.2 Πολύπλεξη VC	21
3.2 Το πρωτόκολλο PPP	22
3.2.1 Φάσεις εξέλιξης σύνδεσης PPP	23
3.2.2 Μηχανή καταστάσεων (state machine) PPP	25
3.2.3 Link Control Protocol (LCP)	26
3.2.4 Password Authentication Protocol (PAP).....	28
3.2.5 Challenge Authentication Protocol (CHAP).....	30
3.2.6 Internet Protocol Control Protocol (IPCP).....	31
3.2.7 Ενθυλάκωση πακέτων PPP σε πλαίσια κατωτέρων στρωμάτων	33
4 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ DSL	36
4.1 ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DSL	36
4.1.1 SDSL (Symmetric DSL).....	37
4.1.2 HDSL (High Data-Rate DSL).....	37
4.1.3 HDSL2 (2nd Generation HDSL)	38
4.1.4 SHDSL (Single-pair High-bit-rate DSL)	38
4.2 Μειονεκτήματα των συμμετρικών γραμμών DSL	39
4.3 ΑΣΥΜΜΕΤΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DSL	40
4.3.1 ADSL.....	40
4.3.2 VDSL.....	54
<i>Κεφάλαιο 3 – Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PON)</i>	<i>63</i>
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	63
2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ	64
2.1 Παθητικό Δέντρο	64
2.2 Παθητικός Δακτύλιος	65
2.3 Παθητικός Διάυλος	66

2.4	<i>Σύγκριση</i>	66
3	<i>ΦΥΣΙΚΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ</i>	67
3.1	<i>Πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου (TDMA) στα δίκτυα PON</i>	68
4	<i>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ</i>	71
4.1	<i>ATM PON (APON) – Broadband PON (BPON)</i>	71
4.1.1	<i>Χαρακτηριστικά και λειτουργία</i>	71
4.1.2	<i>Δομή πλαισίων και έλεγχος πρόσβασης (MAC)</i>	73
4.1.3	<i>Οφέλη των APON</i>	74
4.2	<i>EPON</i>	75
4.2.1	<i>Χαρακτηριστικά</i>	75
4.2.2	<i>Στοιβία πρωτοκόλλων και λειτουργία</i>	76
4.2.3	<i>Οφέλη των EPON</i>	85
4.3	<i>GPON</i>	85
4.3.1	<i>Φυσικό υπόστρωμα GPON</i>	87
4.3.2	<i>Υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (TC)</i>	88
4.3.3	<i>Πρωτόκολλο MAC</i>	90
4.3.4	<i>Δομή πλαισίου TC</i>	93
4.4	<i>Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON</i>	102
4.4.1	<i>Σύγκριση APON με EPON</i>	102
4.4.2	<i>Σύγκριση EPON με GPON</i>	103
	<i>Κεφάλαιο 4 – Αναβάθμιση Δικτύων Καλωδιακής Τηλεόρασης σε Αμφίδρομικά Ευρυζωνικά Δίκτυα Πρόσβασης (Hybrid Fiber-Coaxial – HFC)</i>	105
1	<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i>	105
2	<i>ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ HFC ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</i>	106
2.1	<i>Οπτικό τμήμα δικτύων HFC</i>	106
2.2	<i>Ομοαξονικό τμήμα δικτύων HFC</i>	107
2.2.1	<i>Αρχιτεκτονικές αμφίδρομων συστημάτων HFC</i>	108
2.2.2	<i>Κατανομή φάσματος και απόδοση καναλιών εκπομπής σε δίκτυα HFC</i>	110
2.2.3	<i>Χαρακτηριστικά του διαύλου μετάδοσης</i>	112
2.2.4	<i>Εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης για τη μετάδοση προς και από το χρήστη</i>	114
2.2.5	<i>Εναλλακτικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής</i>	115
3	<i>ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ</i>	117
3.1	<i>Αναγκαίες λειτουργίες του φυσικού στρώματος για την υποστήριξη του καναλιού επιστροφής και του υποστρώματος MAC</i>	117
3.2	<i>Λειτουργικές απαιτήσεις του υποστρώματος MAC και μηχανισμοί για τον έλεγχο πρόσβασης στο κοινό κανάλι</i>	118
3.2.1	<i>Σχήματα διευθυνσιοδότησης στο υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης</i>	119
3.3	<i>Μηχανισμοί για τον έλεγχο πρόσβασης στο κοινό κανάλι</i>	120
3.4	<i>Πρότυπο DAVIC 1.3</i>	121
3.5	<i>Πρότυπο DOCSIS</i>	125
3.5.1	<i>Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης (MAC) του προτύπου DOCSIS</i>	128
	<i>Κεφάλαιο 5 – Βιβλιογραφία/Αναφορές</i>	133

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων τις τελευταίες δεκαετίες καθώς και η αύξηση του όγκου των πληροφοριών αλλά και των εφαρμογών, που κάνουν χρήση αυτών και απαιτούν τη διακίνησή τους μέσω δικτύων, έχουν επιφέρει μια μεγάλης κλίμακας αναβάθμιση των δικτύων κορμού, τόσο ως προς τις ταχύτητες μετάδοσης, όσο και ως προς την ευελιξία υποστήριξης ανομοιογενών εφαρμογών με διατήρηση υψηλής στάθμης ποιότητας υπηρεσίας. Η ανάπτυξη αυτή των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης έχει ως κύριο στόχο την προσφορά νέων υπηρεσιών σε όσο το δυνατόν ευρύτερο τομέα της παγκόσμιας κοινότητας. Τελικό στάδιο αυτής της εξέλιξης αποτελεί το αποκαλούμενο *δίκτυο πρόσβασης* (access network), που αποτελεί νευραλγικό τομέα στην εξέλιξη δικτύων για την πρόσβαση μεγάλης μάζας χρηστών στις αναπτυσσόμενες *«λεωφόρους των πληροφοριών»* (information highways). Για να ευοδωθεί η προσπάθεια της παγκόσμιας κοινότητας να επιτύχει την επέκταση των υπάρχοντων δικτύων ευρείας ζώνης μέχρι τους τελικούς χρήστες και να παρέχει δυνατότητα πρόσβασης στα μεγάλης χωρητικότητας δίκτυα κορμού πρέπει να δοθεί κατάλληλη τεχνική λύση στο αποκαλούμενο *«πρόβλημα του τελευταίου μιλίου»* (last mile problem). Το πρόβλημα αυτό συνίσταται στην παροχή σε επίπεδο γειτονιάς και κατοικίας οποιουδήποτε τύπου γραμμής σύνδεσης ικανής να μεταφέρει τους ρυθμούς ροής που απαιτούνται για την πρόσβαση σε ευρείας ζώνης δίκτυα. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί αντικείμενο μεγάλης έκτασης έρευνας καθώς όλες οι διαφαινόμενες λύσεις απαιτούν την ανάπτυξη ειδικών τεχνικών λύσεων με μεγάλο κόστος. Για αυτό το λόγο αποτελεί μέγιστης σημασίας πλεονέκτημα η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υπάρχοντων υποδομών για την αποφυγή επιπλέον κόστους έργων εγκατάστασης νέων.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το τηλεφωνικό δίκτυο αποτελεί το ευρύτερα εκτεταμένο δίκτυο στον κόσμο και ότι ο μεγαλύτερος συντελεστής κόστους στην εγκατάσταση οποιασδήποτε καλωδιακής υποδομής αποτελείται από το κόστος εργασιών σε επίπεδο δομικών έργων, εκσκαφών κλπ. γίνεται προφανής η ανάγκη αξιοποίησης ήδη εγκατεστημένων υποδομών. Για την αξιοποίηση του τεραστίου μήκους εγκατεστημένων γραμμών τηλεφωνικού δικτύου αναπτύχθηκαν οι τεχνολογίες DSL, οι οποίες όμως αντιμετωπίζουν δυσκολίες στο προσφερόμενο από τα χάλκινα τηλεφωνικά καλώδια εύρος ζώνης και οδηγούν σε σχετικά δαπανηρές λύσεις για την επίτευξη περιορισμένων σε σχέση με ανταγωνιστικές τεχνολογίες ταχυτήτων.

Μεγάλη έκταση ομοαξονικών καλωδίων έχει επίσης εγκατασταθεί για την παροχή αναλογικού σήματος τηλεόρασης σε σπίτια μέσω των δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης (Cable TV, CATV). Η υποδομή αυτή είναι ακόμη περισσότερο ελκυστική από τη λύση της τεχνολογίας DSL καθώς το προσφερόμενο εύρος ζώνης των ομοαξονικών καλωδίων

είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Η αρχιτεκτονική των δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης παρουσιάζει επίσης ένα πλεονέκτημα σε σχέση με την ευελιξία από οικονομοτεχνικής απόψεως ως προς την πολιτική αναβάθμισης του δικτύου με οπτικές ίνες οι οποίες αποτελούν και το μέσο με την μέγιστη χωρητικότητα σήμερα το οποίο μπορεί να επιτύχει ιδιαίτερα αξιόπιστη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι βρισκόμαστε σήμερα στο ενδιάμεσο στάδιο αντικατάστασης του ομοαξονικού καλωδίου που αποτελεί το αρχικό τμήμα του συνολικού καλωδιακού δικτύου με οπτική ίνα η οποία αναβαθμίζει πλήρως την ποιότητα του προσφερόμενου σήματος και την χωρητικότητα του δικτύου για τη συγκεκριμένη επιφάνεια και κάλυψη.

Στην πληρέστερη εξέλιξή του το δίκτυο πρόσβασης θα ήταν επιθυμητό, εάν αυτό καθίσταται εφικτό για λόγους κόστους, να είναι αμιγώς οπτικό. Αυτό θα έδινε τη μέγιστη δυνατή ευελιξία παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών σε μεγάλο πλήθος συνδρομητών. Οι αντίστοιχες τοπολογίες επέκτασης της οπτικής ίνας στο δίκτυο πρόσβασης μπορούν να βασιστούν στους παραδοσιακούς δακτυλίους των σύγχρονων οπτικών δικτύων SONET/SDH ή τοπολογίες σημείο-προς-σημείο, η μεγαλύτερη κάλυψη όμως και συνεπώς οικονομικότερη και ελκυστικότερη λύση για τη διείσδυση των οπτικών ινών μέχρι τους τελικούς συνδρομητές είναι η ανάπτυξη δενδροειδών τοπολογιών ίνας με την τεχνική των παθητικών οπτικών δικτύων (Passive Optical Networks – PON).

Στην παρούσα σειρά σημειώσεων παρουσιάζουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών αυτών τεχνολογιών ευρυζωνικών δικτύων πρόσβασης δομημένα σύμφωνα με την παραπάνω σειρά στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2 - Τεχνολογίες Ψηφιακού Συνδρομητικού Βρόχου (Digital Subscriber Line- DSL)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αναμφισβήτητα το ευρύτερα διαδεδομένο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο (ως προς τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών και ως προς την γεωγραφική κάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο) από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα και για πολλές δεκαετίες ήταν το τηλεφωνικό δίκτυο. Η τεράστια αξία του έγκειται στην απλότητα και την αξιοπιστία του. Από την φωνητική επικοινωνία μέχρι και την αρχική του χρήση για αναλογική και μετέπειτα ψηφιακή μετάδοση δεδομένων για όλες τις εφαρμογές που απαιτούσε ο μέσος χρήστης μπορούσαν να ικανοποιηθούν από αυτό χρησιμοποιώντας ένα απλό ζεύγος χάλκινου καλωδίου. Ωστόσο η έκρηξη στην χρήση του Διαδικτύου (Internet) στα τέλη τις δεκαετίας του '80 και στις αρχές τις δεκαετίας του '90 και οι νέες υπηρεσίες που αναπτύσσονται γύρω από αυτό, καθώς και ο όγκος των δεδομένων που άρχισαν να διακινούνται μέσω αυτού, κατέστησαν το παραδοσιακό τηλεφωνικό δίκτυο ξεπερασμένο για τις νέες απαιτήσεις ευρυζωνικής πρόσβασης λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης που αυτό παρείχε και ανάγκασαν την παγκόσμια κοινότητα να αναζητήσει νέες λύσεις. Μία πρώτη προφανής τεχνολογική επιλογή αποτελούσε η χρήση μέσων μετάδοσης με μεγαλύτερο εύρος ζώνης, όπως για παράδειγμα οι οπτικές ίνες.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης οπτικών ινών είναι πολύ ελκυστικά και τα οπτικά δίκτυα παραμένουν αξεπέραστα ως προς τις δυνατότητες και την ποιότητα μετάδοσης ευρέως φάσματος. Τα οπτικά δίκτυα επικοινωνιών δίνουν τη δυνατότητα για επίτευξη πολύ μεγάλων ρυθμών μετάδοσης, σε μεγάλες αποστάσεις παραμένοντας ανεπηρέαστες από εξωτερικές πηγές θορύβου. Το βασικότερο πρόβλημα της τεχνολογίας αυτής είναι το οικονομικό κόστος για την κατασκευή/προμήθεια εξοπλισμού (οπτικών ινών, laser και πομποδεκτών, πολυπλέκτων, μεταγωγέων κλπ.), εγκατάσταση και διαχείριση οπτικών δικτύων. Η χρήση οπτικών ινών για ευρυζωνικές εφαρμογές εκτιμάται συμφέρουσα για

μεγάλες εταιρίες με αυξημένες ανάγκες διακίνησης δεδομένων (π.χ μεγάλο αριθμό ταυτόχρονα συνδεδεμένων χρηστών, απαιτητικές εφαρμογές ως προς τον όγκο και την καθυστέρηση μετάδοσης των δεδομένων, μεταφορά δεδομένων από τη μια πόλη σε μια άλλη κλπ.). Για μικρές εταιρίες όμως, όπως επίσης και για απλή οικιακή χρήση η εγκατάσταση και χρήση οπτικών ινών παραμένει ασύμφορη και μη απαραίτητη, γιατί μόνο ένα μικρό μέρος της χωρητικότητάς της θα αξιοποιούνταν και το κόστος για τον τελικό χρήστη θα ήταν αρκετά μεγάλο σε σχέση με το όφελος που θα είχε από την χρήση της. Επίσης καθώς το τελικό τμήμα σύνδεσης των συνδρομητών αποτελεί δυσανάλογα και το μεγαλύτερης έκτασης σε μήκος καλωδίου μέρος του δικτύου το κόστος αλλαγής όλων των καλωδίων χαλκού που χρησιμοποιούνταν από οικιακούς χρηστές θα ήταν τεράστιο. Αυτός ήταν και το βασικότερο κίνητρο που οδήγησε στην αναζήτηση νέων τεχνολογιών που θα αξιοποιούσαν στο ήδη εγκατεστημένο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και θα μπορούσαν να συνυπάρξουν αρμονικά με αυτό.

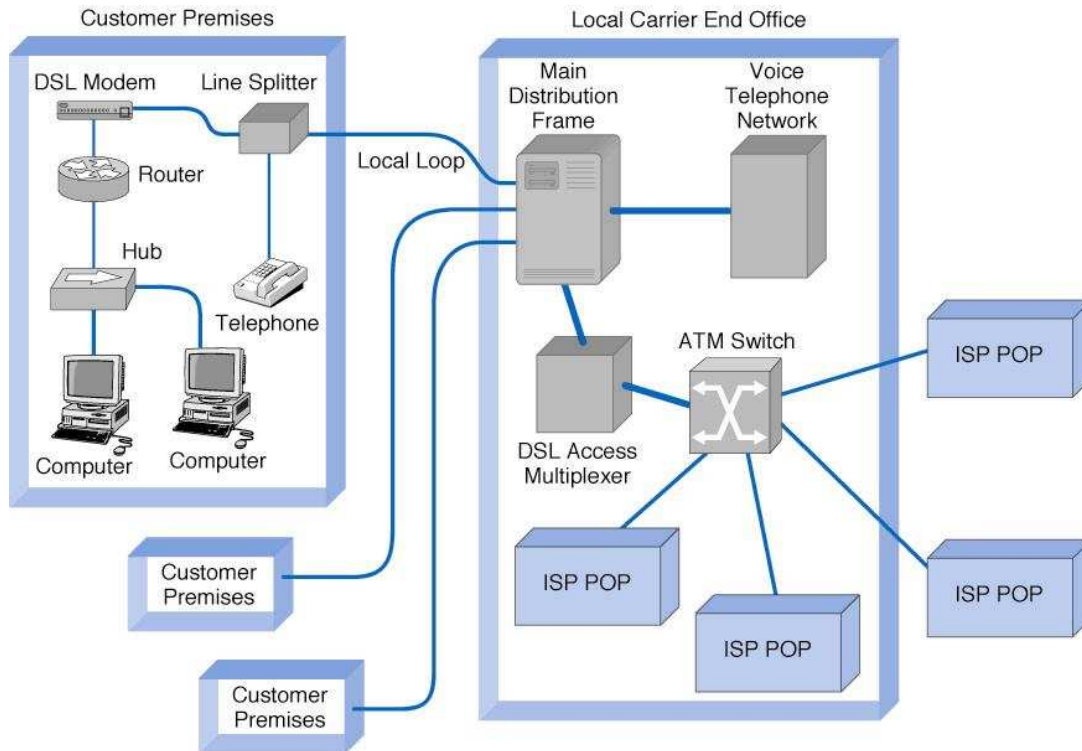
Η πρώτη τεχνολογία που αναπτύχθηκε για την ικανοποίηση των παραπάνω αναγκών ήταν το ψηφιακό δίκτυο ολοκληρωμένων υπηρεσιών ISDN (**I**ntegrated **S**ervices **D**igital **N**etwork), που για την εποχή της κρίθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική ([2]). Η τεχνολογία ISDN τέθηκε σε εφαρμογή στα μέσα τις δεκαετίας του '80 αλλά η πραγματική επανάσταση που σημειώθηκε από την ανάπτυξη και χρήση του Διαδικτύου με την ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των υπολογιστών και η παροχή υπηρεσιών με ανάγκη διακίνησης όλο και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων γρήγορα έφερε τα δίκτυα ISDN σε κορεσμό και κατέστησε την εγκατάσταση συνδέσεων ISDN μια προσωρινή λύση. Έτσι οι εταιρείες για να ικανοποιήσουν την όλο και αυξανόμενη ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων επέκτειναν την συγκεκριμένη τεχνολογία με έναν αριθμό εναλλακτικών λύσεων που συνολικά αναφέρονται ως τεχνολογίες ψηφιακού συνδρομητικού βρόχου (**D**igital **S**ubscriber **L**ine-DSL). Οι τεχνολογίες DSL έδωσαν την δυνατότητα πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο διαδίκτυο χρησιμοποιώντας τις κοινές τηλεφωνικές γραμμές εκμεταλλευόμενες τις αχρησιμοποίητες συχνότητες στις τηλεφωνικές γραμμές χαλκού για μεταβίβαση κίνησης με ταχύτητες πολλών Mbit/sec, ενώ παράλληλα επιτρέπουν σε φωνή και σε δεδομένα υψηλής ταχύτητας να μεταδοθούν ταυτόχρονα πάνω από την ίδια γραμμή. Οι τεχνολογίες αυτές (συνολικά χαρακτηριζόμενες και ως xDSL) στηρίχθηκαν στην βασική ιδέα του ISDN, δηλαδή παράλληλη χρήση απλών γραμμών μεταφοράς με modem τα οποία κανονίζουν τον διαμερισμό και την επανασύνθεση των δεδομένων, μόνο που στις xDSL γραμμές γίνεται ακόμη μεγαλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος που προσφέρει ένα χάλκινο ζεύγος καλωδίων από τις ISDN γραμμές, οι οποίες και θεωρούνται ο προγονός των xDSL και στην διεθνή βιβλιογραφία συχνά αναφέρονται σαν IDSL ([1], [4]). Το x μπορεί να αντικατασταθεί από διάφορα γράμματα τα οποία καθορίζονται από το αν η γραμμή είναι συμμετρική ή ασύμμετρη και την ταχύτητα μεταφοράς της γραμμής. Ως συμμετρικές αναφέρονται εκείνες οι παραλλαγές xDSL που προσφέρουν ίση ταχύτητα λήψης και αποστολής δεδομένων σε αντίθεση με τις ασύμμετρες, στις οποίες η ταχύτητα με την οποία ο χρήστης μπορεί να λάβει δεδομένα είναι μεγαλύτερη από αυτή με την οποία μπορεί να αποστείλει δεδομένα. Πρώτη εφαρμογή των xDSL ήταν σε συμμετρικές γραμμές με την αντίστοιχη παραλλαγή που ονομάστηκε HDSL, η οποία άρχισε να αναπτύσσεται και να εφαρμόζεται το 1992 και επέτρεπε την μεταφορά από 1,5-2,3 Mb/s καθώς και την παραλλαγή που ονομάστηκε SDSL, η οποία έχει ταχύτητα μεταφοράς περίπου 768 kb/s και αποτελεί εφαρμογή της HDSL πάνω όμως σε ένα μόνο ζεύγος καλωδίων χαλκού ([4], [5], [11]).

Οι HDSL γραμμές υποστήριζαν την συμμετρική μετάδοση δεδομένων, δηλαδή η μισή χωρητικότητα της γραμμής χρησιμοποιείται για μεταγωγή δεδομένων προς τον χρήστη (downstream) και η άλλη μισή για μεταγωγή δεδομένων από τον χρήστη προς το δίκτυο (upstream). Αυτό ήταν ασύμφορο για οικιακή χρήση, γιατί οι περισσότεροι χρήστες θέλουν να «κατεβάζουν» περισσότερο από το να «στέλνουν» δεδομένα. Γι' αυτό στις xDSL γραμμές εφαρμόστηκαν διάφορες ιδέες που στηρίχθηκαν πάνω στην ιδέα της ασύμμετρης μετάδοσης δεδομένων όπως οι ADSL γραμμές το 1997 οι οποίες επιτυγχάνουν ταχύτητες upstream περίπου μέχρι 640 kbps και downstream τα από 1544 έως 8448 kbps και οι VDSL γραμμές το 1999 οι οποίες έχουν downstream ταχύτητα 13-52Mbps και upstream ταχύτητα μέχρι 2.3 Mbps. Αναλυτικότερη αναφορά με περιγραφή των διαφορετικών παραλλαγών της τεχνολογίας DSL θα ακολουθήσει στις ενότητες 3 και 4.3, ενώ στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστούν τα γενικότερα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας ευρυζωνικής πρόσβασης με έμφαση στην αρχιτεκτονική ενός δικτύου DSL.

2 ΔΙΚΤΥΑΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ DSL

2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε υπάρχουν πολλές παραλλαγές της τεχνολογίας DSL. Τα βασικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά ως προς τη δικτυακή διασύνδεση όμως είναι κοινά στις περισσότερες περιπτώσεις. Όπου γίνονται αναφορές σε συγκεκριμένη εφαρμογή της τεχνολογίας στις περισσότερες θα αναφέρεται η τεχνολογία ADSL, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη ([6], [7]). Τα φυσικά μέρη ενός δικτύου DSL περιλαμβάνουν τη διάταξη πρόσβασης του συνδρομητή, τις γραμμές του δικτύου και προσαρμογείς (adapters) διασυνδεδεμένους στον εξοπλισμό του παροχέα DSL. Το τμήμα του δικτύου στην πλευρά του συνδρομητή ποικίλει από ένα απλό τερματικό modem που συνδέει έναν απλό χρήστη στο δίκτυο DSL έως ένα πολύπλοκο πολυκάναλο (multi-channel) ATM σύστημα. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 1) φαίνονται τα λειτουργικά μέρη ενός δικτύου DSL. Το διάγραμμα δείχνει ότι ο εξοπλισμός του χρήστη προσαρμόζει ή μετατρέπει αναλογικά και ψηφιακά σήματα προερχόμενα από το εσωτερικό δίκτυο του χρήστη σε υψηλής ταχύτητας DSL-σήμα μέσω μιας συσκευής προσαρμογής και (απο)διαμόρφωσης αποκαλούμενη DSL-modem. Το σήμα αυτό μεταφέρεται μέσω του χάλκινου καλωδίου στο ψηφιακό κέντρο (central office -CO) σε ένα αντίστοιχο modem όπου μετατρέπεται στην αρχική του μορφή. Το μέρος του σήματος που μεταφέρει αναλογική τηλεφωνία (αν υπάρχει), εξάγεται μέσω κατάλληλης διάταξης σε συγκεκριμένο τμήμα του CO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Τα ψηφιακά δεδομένα δρομολογούνται σε έναν μεταγωγέα συγκέντρωσης της κίνησης από τους συνδρομητές αποκαλούμενο ως DSLAM (DSL Access Multiplexer), όπου καταφθάνουν σήματα από πολλά σημεία, πολυπλέκονται και δρομολογούνται προς το κατάλληλο σημείο.

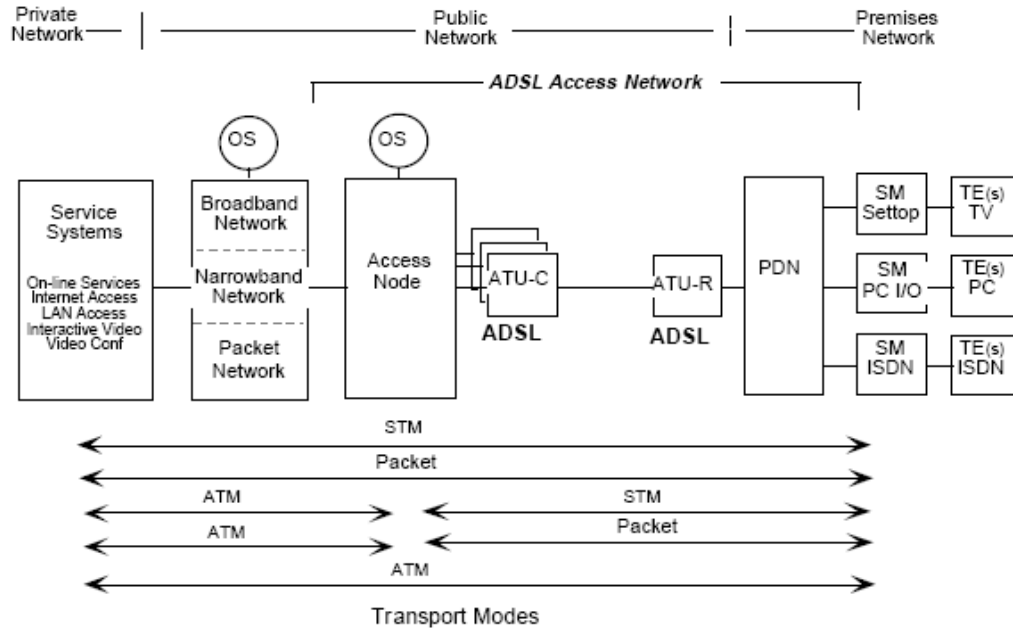


Σχήμα 1: Γενική αρχιτεκτονική δικτύου DSL

2.2 Λειτουργικές μονάδες και υποσυστήματα

Το Broadband Forum (πρώην ADSL Forum) είναι μία διεθνής κοινοπραξία για την παραγωγή τεχνικών προδιαγραφών που περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική, τις διεπαφές και τα πρωτόκολλα για τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ADSL. Το σχετικό μοντέλο αναφοράς [9] είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα διεθνή πρότυπα και περιγράφει ένα αριθμό δικτυακών στοιχείων που συμμετέχουν στην προσφορά πολυμεσικών εφαρμογών πάνω από δίκτυα ADSL με στόχο την αναβάθμιση των εγκατεστημένων τηλεπικοινωνιακών υποδομομών από δίκτυα σύγχρονου τρόπου μεταγωγής Synchronous Transfer Mode - STM) σε ασύγχρονο τρόπο μεταγωγής πακέτων (Asynchronous Transfer Mode - ATM). Το μοντέλο αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2 διακρίνει τα στοιχεία του δικτύου σε τρία βασικά μέρη που αφορούν την περιοχή του συνδρομητή (Customer Premises), το δίκτυο πρόσβασης (Access Network) και το δίκτυο κορμού για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου, φωνής κ.α. Η τεχνολογία ADSL λειτουργεί πάνω σε ένα μόνο ζεύγος καλωδίων χαλκού (κάποιες παραλλαγές xDSL όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια κάνουν χρήση δύο ζευγών) και παρέχει την σύνδεση χρησιμοποιώντας δυο modem, εκ των οποίων το ένα βρίσκεται στο μέρος του παροχέα (Central Office), δηλαδή από εκεί όπου ξεκινά η γραμμή, και ονομάζεται ATU-C (ADSL Transceiver Unit-Central Office) και ένα στο άλλο άκρο της γραμμής στο μέρος του χρήστη (user) και ονομάζεται ATU-R (ADSL Transceiver Unit-Remote). Τα modem αυτά έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται τις φυσικές ιδιότητες των γραμμών χαλκού, πέρα από τις συνήθεις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση της φωνής και να επιτυγχάνουν ταχύτητες μετάδοσης κατά πολύ υψηλότερες από τις ταχύτητες που μπορούν να επιτύχουν τα συνήθη αναλογικά modem (voiceband modem), τα οποία εκμεταλλεύονται το εύρος της φωνής. Στη συνέχεια περιγράφουμε τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά των δομικών μονάδων ενός δικτύου DSL χρησιμοποιώντας

την ορολογία του μοντέλου αναφοράς καθώς και την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ορολογία στη βιβλιογραφία.



ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	STM	Synchronous Transfer Mode
ATM	Asynchronous Transfer Mode	TE	Terminal Equipment
OS	Operations System		See System Reference Model for reference point definitions
PDN	Premises Distribution Network		
SM	Service Module		

Σχήμα 2: Μοντέλο αναφοράς δικτύου ADSL κατά το Broadband Forum (πρώην ADSLForum)

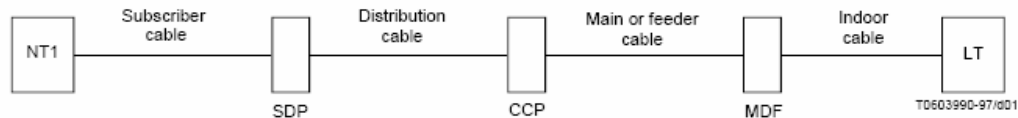
2.2.1 Γραμμή μεταφοράς (Digital Local Line - DLL)

Η γραμμή μεταφοράς ενός xDSL συστήματος είναι ένα ζεύγος συνεστραμμένων καλωδίων χαλκού τα οποία τοποθετούνται συνήθως στο ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στα τηλεφωνικά δίκτυα καλώδιο τύπου UTP (Unshielded Twisted Pair), το οποίο περιλαμβάνει πολλαπλά τέτοια ζεύγη που καλύπτονται από πλαστική μόνωση. Ο λόγος που τα είναι καλώδια συνεστραμμένα είναι για να μειώνονται τα φαινόμενα παρεμβολών που εμφανίζεται σε αυτά. Ο ψηφιακός συνδρομητικός βρόχος ολοκληρώνεται με κατάλληλες διατάξεις ψηφιακής διαποδιαμόρφωσης στις άκρες (DLL-Digital Local Line).

2.2.1.1 Φυσικά χαρακτηριστικά DLL

Μία ψηφιακή ζεύξη DLL ([3]) αποτελείται από έναν ή περισσότερους τομείς καλωδίων που διαχωρίζονται ή διασυνδέονται μεταξύ τους για την ζεύξη της συσκευής του συνδρομητή (Network Termination Unit – NTU) με το ψηφιακό κέντρο (Line Termination Unit – LTU) στο κέντρο διανομής (Local Exchange) του τηλεπικοινωνιακού

παρόχου και αποτελούν το δίκτυο διανομής. Μια γενική περιγραφή του φυσικού μοντέλου DLL φαίνεται στο Σχήμα 3, ενώ ο Πίνακας 1 παρουσιάζει μερικά τυπικά χαρακτηριστικά των καλωδίων που χρησιμοποιούνται. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3 η τελική σύνδεση παρέχεται από μία σειρά από πολλούς τομείς καλωδίων διαφορετικής διαμέτρου και μήκους. Για την ευελιξία του συστήματος διανομής είχε κυριαρχήσει η τεχνική της χρήσης σημείων διασύνδεσης με χρήση απλών διακλαδωτήρων τύπου «T» (bridge taps). Η τεχνική αυτή έδινε τη δυνατότητα γρήγορης σύνδεσης και αποσύνδεσης κυκλωμάτων πελατών στην περίπτωση νέων ή αποχωρούντων συνδρομητών μόνο στο τελευταίο τμήμα του δικτύου διατηρώντας σταθερό το κεντρικό μέρος. Επίσης ήταν ελκυστική και για την εφαρμογή πολύπλεξης περισσότερων συνδέσεων πάνω από το ίδιο ζεύγος καλωδίων για εξοικονόμηση γραμμών και μείωση του κόστους εγκατάστασης (ιδιαίτερα σε αραιοκατοικημένες περιοχές και μακρινές αποστάσεις) π.χ. με χρήση ενσύρματων φερεσύχων (τεχνικής βασισμένης στην πολυπλεξία στο πεδίο της συχνότητας, FDM). Τα χαρακτηριστικά αυτά όπως θα δούμε και στη συνέχεια δεν ευνοούν την ευρυζωνική μετάδοση καθώς επηρεάζουν το ωφέλιμο εύρος ζώνης λόγω ανακλάσεων του σήματος και εμφάνισης χαρακτηριστικών μεταφοράς βαθυπερατού φίλτρου με αποτέλεσμα για εφαρμογές DSL να είναι απαγορευτική η χρήση φερέσυχων και η τοποθέτηση άνω των δύο εν σειρά συνδετήρων. Η ύπαρξη συνδετήρων είναι περισσότερο προβληματική, όταν αυτοί βρίσκονται κοντά στο σημείο τερματισμού στη μεριά του χρήστη, καθώς ισχυρή συνιστώσα της εισερχόμενης ισχύος ανακλώμενη επιστρέφει στον πομπό ως σήμα εκτός φάσης και δημιουργεί επιλεκτική εξασθένιση, σφάλματα έως και αδυναμία συγχρονισμού με αποτέλεσμα η χρήση ορισμένων συχνοτήτων να καθίσταται απαγορευτική.



Points of interconnection are:

MDF Main Distribution Frame

CCP Cross Connection Point (or splice)

SDP Subscriber Distribution point

Σχήμα 3: Τμήματα ψηφιακού συνδρομητικού βρόχου (DLL)

	Καλώδιο διανομής	Κύριο καλώδιο	Καλώδιο κατανομής	Καλώδιο εγκατάστασης ¹
Διάμετρος (mm)	0,5; 0,6; 0,32; 0,4	0,3 – 1,4	0,3 – 1,4	0,4;0,5; 0,6;0,8; 0,9;0,63
Δομή	SQ(B) ή TP(L)	SQ(B) ή TP(L)	SQ(B) ή TP(L)	SQ ή TP ή UP
Μέγιστος αριθμός ζευγών	1200	2400 (0,4mm) 4800(0,32mm)	600 (0,4mm)	2 (εναέρια) 600 (οικία)
Εγκατάσταση		Υπόγεια σε αγωγούς	Υπόγεια ή εναέρια	Εναέρια ή σε αγωγούς
Χωρητικότητα (nF/km στα 800Hz)	55 - 120	25 -60	25 - 60	35 - 120
Μόνωση	PVC, FRPE	PE, paper pulp	Paper, PE, Cell PE	PE, PVC
TP: Twisted Pairs		PE: Polyethelene		
SQ: Star Quads		PVC: Polyvinylchloride		

UP: Untwisted Pairs	Pulp: Pulp of paper
L: Layer	Cell PE: Cellular Foam Polyethelene
B: Bundles (units)	FRPE: Fire Resistant PE
Σημείωση: Ο πίνακας περιγράφει καλώδια που χρησιμοποιούνται ήδη σε τοπικούς βρόχους. Ενδέχεται να μην είναι όλα κατάλληλα για DSL συστήματα.	

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά γραμμών DLL

2.2.1.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά DLL

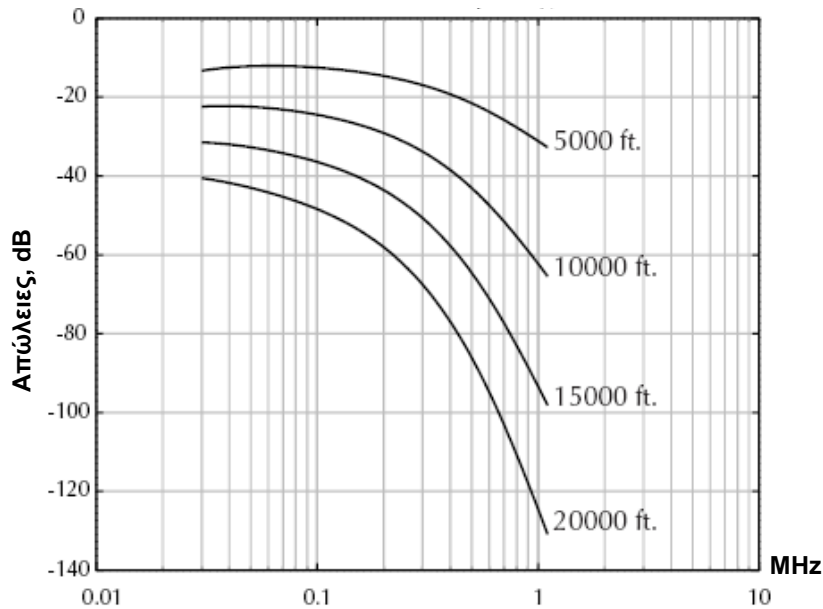
Ένα εκπεμπόμενο σήμα παραμορφώνεται σε μια γραμμή DLL λόγω επαγωγικής και χωρητικής αλληλεπίδρασης/παρενόχλησης των γραμμών μεταξύ τους (διαφωνία - crosstalk), του θορύβου και της μη γραμμικής μεταβολής των χαρακτηριστικών μιας DLL με τη συχνότητα ([8]). Η εφαρμογή αποτελεσματικών (ως προς το ωφέλιμο εύρος ζώνης με ικανοποιητικά υψηλό σηματοθορυβικό λόγο και χαμηλή πιθανότητα σφαλμάτων στη λήψη) τεχνικών ψηφιακών συστημάτων επικοινωνιών για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων μετάδοσης στο «εχθρικό» περιβάλλον του συγκεκριμένου μέσου αποτέλεσε την ουσιαστική καινοτομία των τεχνολογιών DSL. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά θα αναφέρουμε εν συντομία στην συνέχεια.

2.2.1.2.1 Μη γραμμική μεταβολή χαρακτηριστικών στο πεδίο της συχνότητας

Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που μεταβάλλονται μη γραμμικά σε σχέση με τη συχνότητα είναι:

- Η απόσβεση παρεμβολής (insertion loss)
- Η καθυστέρηση ομάδας (group delay)
- Η χαρακτηριστική αντίσταση (πραγματικό και φανταστικό μέρος)

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών η απόδοση και μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης οποιασδήποτε εφαρμογής xDSL εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και κυρίως το μήκος του συνδρομητικού βρόχου (διατομή καλωδίων, φαινόμενα διάβρωσης και απόσταση του συνδρομητή από το ψηφιακό κέντρο). Μία χαρακτηριστική περίπτωση απόκρισης καναλιού σε σχέση με την συχνότητα και την απόσταση απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



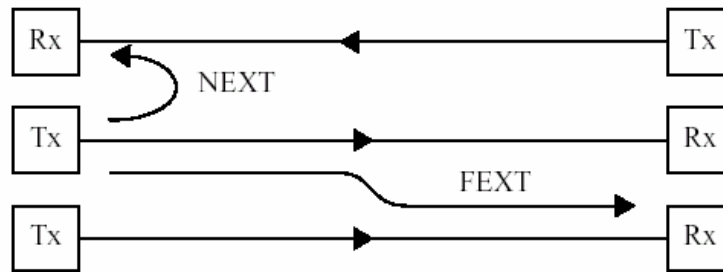
Σχήμα 4: Τυπικές καμπύλες φασματικής απόκρισης καναλιού (απόσβεση σε σχέση με τη συχνότητα μετάδοσης και το μήκος της γραμμής)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί άλλος ένας απαγορευτικός παράγοντας που εμφανίστηκε σε πολλές περιπτώσεις αναβάθμισης του υπάρχοντος τηλεφωνικού δικτύου και αφορά την περίπτωση των φορτισμένων ή «πουπινισμένων» γραμμών. Η μέθοδος Pupin ή πουπινισμός αφορά την κατάλληλη διαμόρφωση της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής μεταφοράς με χρήση πηνίων φόρτωσης (loading coils) σε κατάλληλα σημεία με συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις κατά μήκος μιας τηλεφωνικής γραμμής. Η χρήση αυτών των πηνίων εφευρέθηκε ως η ευκολότερη και φθηνότερη μέθοδος καθορισμού της χαρακτηριστικής αντίστασης (με δεδομένη την χωρητικότητα και υψηλό κόστος αύξησης της διατομής του χάλκινου καλωδίου για μείωση της αντίστασης) για χαμηλή και ομοιόμορφη σε όλο το φάσμα ενός τηλεφωνικού σήματος εξασθένιση σε ομογενείς τηλεφωνικές γραμμές μεγάλης απόστασης. Η εφαρμογή τους κρίθηκε ιδανική για εφαρμογές στενού εύρους ζώνης όπως η τηλεφωνία καθώς η φορτισμένη γραμμή παρουσιάζει χαρακτηρισικά βαθυπερατού φίλτρου. Έτσι δεν ενδείκνυται για μετάδοση σημάτων πάνω από το ένα εκατοστό της συχνότητας αποκοπής που παρουσιάζει η φορτισμένη γραμμή και ενώ αποδεικνύεται ότι είναι δυνατή η αύξηση της συχνότητας αποκοπής με χρήση περισσότερων εν σειρά πηνίων αυτή καθίσταται ιδιαίτερα δαπανηρή για να επιτύχουμε συχνότητες αποκοπής μεγαλύτερες των λίγων KHz.

2.2.1.2.2 Διαφωνία - Crosstalk (NEXT-FEXT)

Η ηλεκτρική ενέργεια που διαδίδεται μέσα στα χάλκινα καλώδια ως διαμορφωμένο σήμα διαχέεται εν μέρει και εκτός της κύριας γραμμής μεταφοράς λόγω επαγωγικής ή χωρητικής επίδρασης (παρεχνόχλησης) μίας γραμμής σε μία άλλη με αποτέλεσμα να συλλέγεται κι από γειτονικά καλώδια που ανήκουν στην ίδια ομάδα καλωδίων. Η σύζευξη αυτή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ονομάζεται διαφωνία (crosstalk). Η διαφωνία μπορεί να δημιουργηθεί είτε από το ίδιο το σύστημα (Intrasystem ή self-crosstalk) είτε από διαφορετικά συστήματα (Intersystem) που χρησιμοποιούν κάποια κοινή περιοχή του φάσματος για να μεταδίδουν πληροφορία. Διακρίνεται σε πάραδιαφωνία (near end cross talk - next) και τηλεδιαφωνία (far end cross talk - next) ανάλογα με το σημείο της παρενόχλησης (στην αρχή ή στο απομακρυσμένο άκρο

αντίστοιχα) της γραμμής που παρενοχλείται (). Φυσικό είναι οι παρεμβολές αυτές να επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του συστήματος, αφού έχουν ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των αρχικά μεταδιδόμενων σημάτων και την αύξηση της πιθανότητας λάθους κατά την αποδιαμόρφωση.



Σχήμα 5: Παραδιαφωνία (NEXT) – Τηλεδιαφωνία (FEXT)

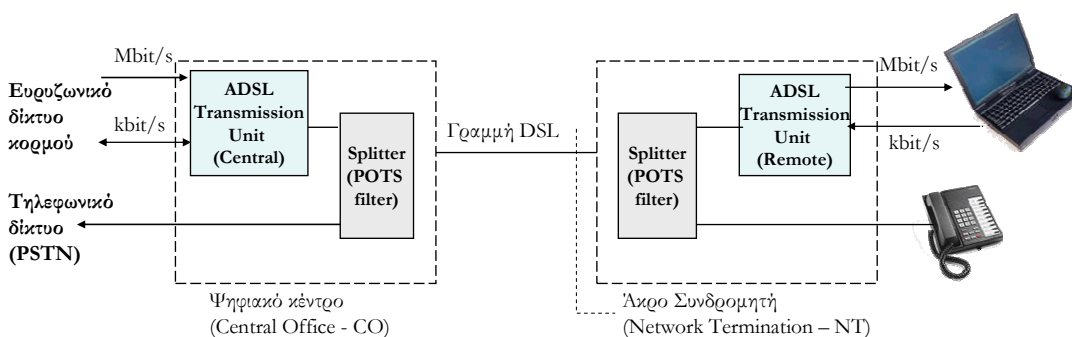
2.2.1.3 Ελάχιστες απαιτήσεις DLL για xDSL εφαρμογές

Συνοψίζοντας τους περιορισμούς που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των τηλεφωνικών καλωδίων για την λειτουργία ενός συστήματος DSL απαιτούνται οι παρακάτω τεχνικές προδιαγραφές του δικτύου διανομής:

- Δεν επιτρέπονται πηνία φόρτωσης (loading coils).
- Τα καλώδια πρέπει να είναι συνεστραμμένα.
- Δεν απαιτείται επιπρόσθετη μόνωση.
- Όταν υπάρχουν συνδέσεις (Bridged taps) τότε ο μέγιστος αριθμός τους θα πρέπει να είναι 2 και η απόσταση για το καθένα 500m.

2.2.2 Διαχωριστής (xDSL Splitter)

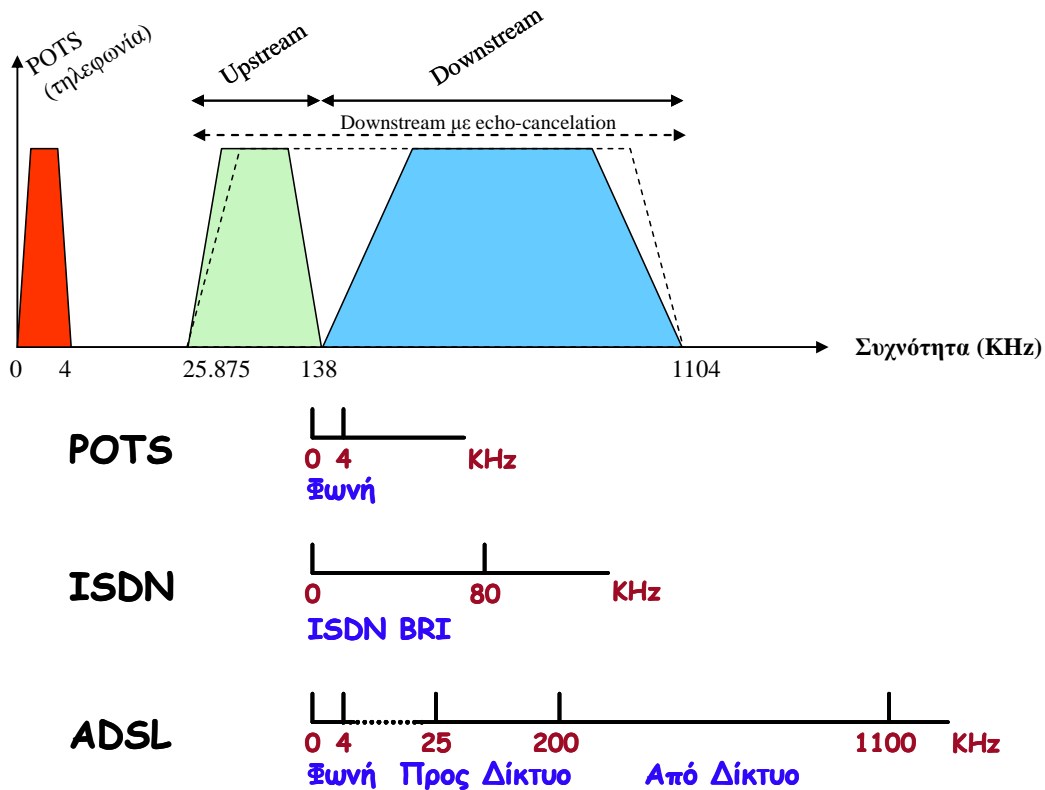
Ο διαχωριστής xDSL (splitter) είναι μια συσκευή που διαχωρίζει το xDSL σήμα σε τηλεφωνικό (φωνή) και σε σήμα ψηφιακών δεδομένων (data). Χρησιμοποιείται κυρίως στα συστήματα ADSL και VDSL για την ταυτόχρονη συνύπαρξη των παραδοσιακών τηλεφωνικών υπηρεσιών μέσω αναλογικών ή ψηφιακών τηλεφωνικών συσκευών με τις υπηρεσίες DSL.



Σχήμα 6: Τυπική εφαρμογή xDSL Splitter

Στις Ηνωμένες Πολιτείες η συχνότητα του απλού τηλεφωνικού σήματος (POTS) είναι ως 8kHz. Στην Ευρώπη το αντίστοιχο σήμα περιέχει και άλλα υψηλής συχνότητας σήματα

και η συχνότητα ανέρχεται στα 12 kHz. Όταν το xDSL splitter λειτουργεί παράλληλα με σήματα ISDN, η μπάνα συχνοτήτων πρέπει να φτάνει ως τα 80kHz (120kHz για ISDN στη Γερμανία). Στο Σχήμα 7 φαίνονται οι διαφορές ζώνες συχνοτήτων σε ένα σύστημα ADSL. Αν και οι μπάνες συχνοτήτων για την τηλεφωνία και για ψηφιακή μετάδοση δεδομένων από ένα σύστημα DSL είναι θεωρητικά απομακρυσμένες πρακτικά η εφαρμογή του διαχωριστή εξασφαλίζει την εξάλειψη παρεμβολών από το φάσμα της DSL. Τέτοιες παρεμβολές μπορεί να εμφανίζονται ως ανεπιθύμητες αρμονικές κατά την ομαλή λειτουργία ή ακόμα αν υπάρξει κάποια πτώση τάσης ή ανωμαλία του συστήματος, οπότε τα ψηφιακά μόντεμ DSL πάντουν να λειτουργούν εντός των προδιαγραφών.



Σχήμα 7: Κατανομή φάσματος στις γραμμές DSL (Παρατήρηση: η κατεύθυνση ADSL «από δίκτυο» μπορεί να χρησιμοποιήσει τη ζώνη 25-200 KHz με echo cancellation- Σύνηθες)

2.2.3 Διαποδιαμορφωτής συνδρομητή (DSL Modem-Remote/ATU-R)

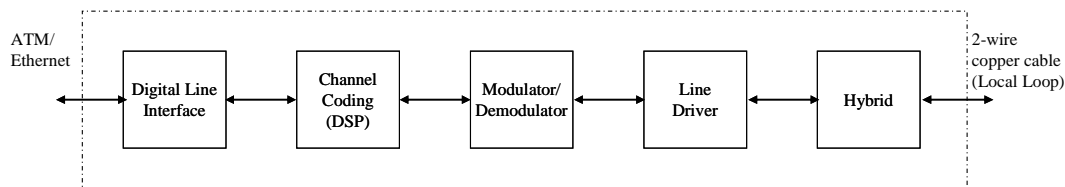
Η συσκευή διασύνδεσης των τελικών χρηστών σε ένα δίκτυο DSL αποκαλείται συνηθέστερα ως DSL-modem. Ένα DSL-modem είναι ένα εξελιγμένο modem που μπορεί να λαμβάνει και να μεταδίδει υψηλής ταχύτητας δεδομένα σε συνεστραμμένο καλώδιο χαλκού (UTP). Το modem αυτό βρίσκεται συνήθως στο σπίτι του χρήστη ή στο γραφείο μιας επιχείρησης, ακριβώς όπως το ISDN-modem. Όταν αναφερόμαστε ειδικά στην ADSL τεχνολογία το modem λέγεται ATU-R (ADSL Transceiver Unit-Remote). Ένα ATU-R μπορεί να έχει τη μορφή μιας εσωτερικής κάρτας modem (PCI bus), ενός εξωτερικού modem που συνδέεται στη θύρα USB ή τη μορφή συσκευής που λειτουργεί ως γέφυρα (gateway) μεταγωγής πακέτων από το ADSL δίκτυο σε ένα 10BaseT ή 100BaseT Ethernet δίκτυο.

Η συσκευή τερματισμού στο σημείο σύνδεσης της υπηρεσίας αναφέρεται συχνά και ως Network Termination (NT) σε συνέχεια της ορολογίας που χρησιμοποιήθηκε στα δίκτυα

ISDN και υποδεικνύει το τερματικό σημείο του δικτύου, το οποίο ανήκει συνήθως στον πάροχο των υπηρεσιών του δικτύου. Ό,τι βρίσκεται από το σημείο αυτό και μετά, επιπλέον καλώδιο και εξοπλισμός, ανήκει συνήθως στον χρήστη. Ο εξοπλισμός αυτός είναι γνωστός ως CPE (Customer Premises Equipment). Το NT μπορεί να ανήκει είτε σε παθητική, είτε σε ενεργητική συσκευή. Στην περίπτωση που είναι παθητική συσκευή απομονώνει το δίκτυο από τον τηλεφωνικό εξοπλισμό του χρήστη (δηλ. αντιστοιχεί σε DSL-splitter). Όταν είναι ενεργητική συσκευή το NT, τότε υλοποιεί την στοίβα πρωτοκόλλων του DSL σύμφωνα με το πρότυπο αναφοράς και έχει τυπικές παραμέτρους που δίνουν τη δυνατότητα σε συγκεκριμένες συσκευές να επικοινωνούν ορθά με το δίκτυο (δηλ. αντιστοιχεί σε DSL-modem).

2.2.4 Διαποδιαμορφωτής συνδρομητικού κέντρου (DSL Modem-Central Office/ATU-C)

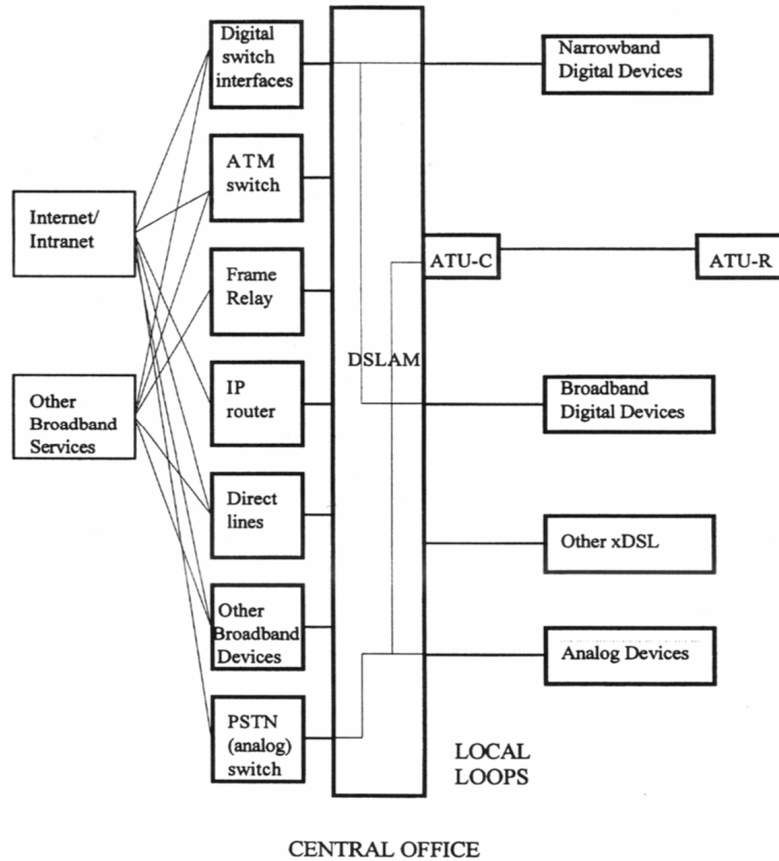
Το modem αυτό είναι ουσιαστικά το είδωλο του DSL-modem στην πλευρά του συνδρομητή (ATU-R). Βρίσκεται συνήθως μέσα στο συνδρομητικό κέντρο (Central Office – CO) ή σε μερικές περιπτώσεις σε ένα διπλανό ψηφιακό κέντρο (RDT - Remote Digital Terminal site). Η λειτουργία του είναι η μετατροπή του DSL σήματος σε κατάλληλο ψηφιακό σήμα ώστε να επιτυγχάνεται η μετάδοση του σε όλο το υπόλοιπο δίκτυο. Στην περίπτωση της ADSL το modem λέγεται ATU-C. Στο Σχήμα 8 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα ενός ATU-C.



Σχήμα 8: μπλοκ διάγραμμα ATU-C

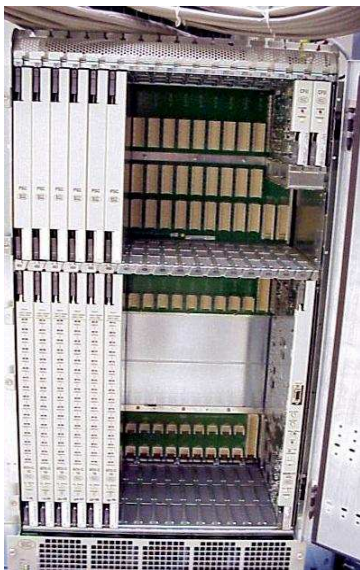
2.2.5 Πολυπλέκτης πρόσβασης (DSL Access Multiplexer - DSLAM)

Ο πολυπλέκτης πρόσβασης DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) περιλαμβάνει συνήθως μια σειρά DSL modem που επικοινωνούν με το τηλεφωνικό δίκτυο και τα modem των χρηστών μέσω του καλωδίου χαλκού. Το DSLAM συγκεντρώνει πολλαπλές ψηφιακές γραμμές σε ένα δίκτυο κορμού (backbone), ώστε να τις διανείμει σε άλλα δίκτυα δεδομένων (π.χ. Internet). Η DSLAM συσκευή παρέχει πρόσβαση στα δίκτυα δεδομένων. Παρέχει υπηρεσίες συγκέντρωσης και πολύπλεξης της κίνησης (multiplexing/concentration) από τους συνδρομητές (upstream κατεύθυνση) και υπηρεσίες απόπλεξης-δρομολόγησης (demultiplexing/routing) στην αντίθετη (downstream) κατεύθυνση.

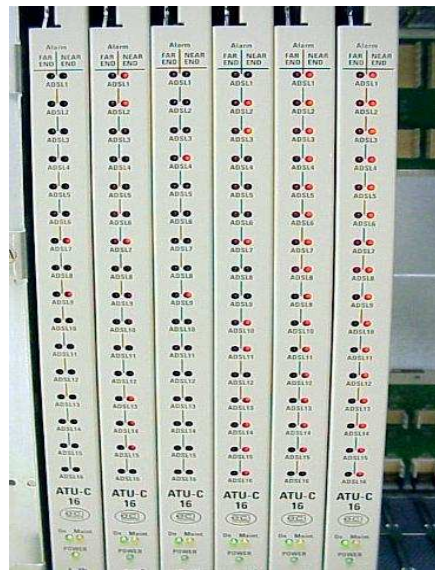


Σχήμα 9: Αρχιτεκτονική ADSL DSLAM

Στο Σχήμα 10 υπάρχει η φωτογραφία ενός ADSL DSLAM, ενώ το Σχήμα 11 είναι φωτογραφία που παρουσιάζει τα modem που απαρτίζουν το DSLAM.



Σχήμα 10: Εμπορικά διαθέσιμο σύστημα DSLAM

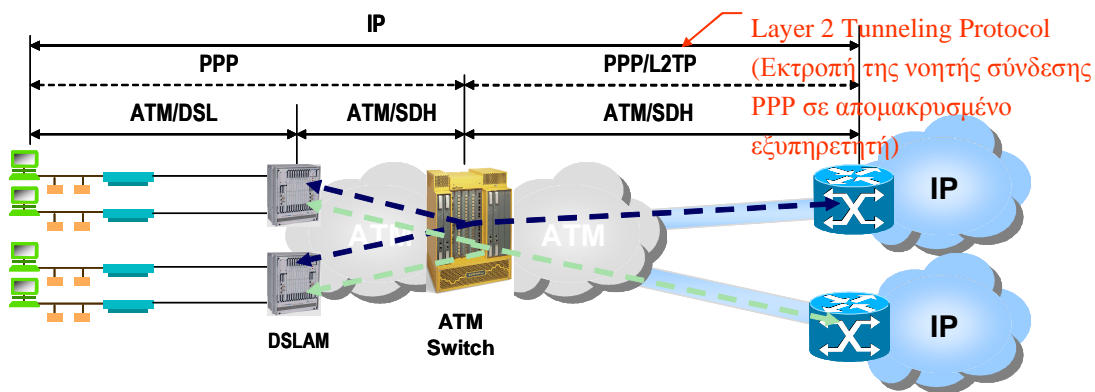


Σχήμα 11: Σημεία τερματισμού ATU-C (ADSL Transmission Unit – Central Office) στο τοπικό κέντρο DSLAM

Το DSLAM βρίσκεται συνήθως στην πλευρά του central office (CO). Επειδή ο χώρος στο CO είναι περιορισμένος, το DSLAM ενδέχεται να βρίσκεται σε γειτονικό σημείο. Αυτό δημιουργεί προβλήματα, καθώς αυξάνει το μήκος καλωδίου στη γραμμή πρόσβασης με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας.

2.2.6 Συσσκευές δρομολόγησης (Routing/Switching)

Ο εξοπλισμός του δικτύου δρομολόγησης (network routing) και των μεταγωγέων (switches) προσφέρει τη δυνατότητα στον πελάτη να χρησιμοποιεί, όποιες από τις παρεχόμενες υπηρεσίες επιθυμεί, μέσω των «τηλεπικοινωνιακών μονοπατιών» που δημιουργούνται από τους δρομολογητές και τους μεταγωγείς. Οι δρομολογητές και οι διακόπτες ATM είναι οι δύο βασικοί τύποι του εξοπλισμού μεταγωγής (switching equipment). Η συνήθης εφαρμογή δικτυακής διασύνδεσης στο δίκτυο κορμού μέσω του δικτύου πρόσβασης ADSL φαίνεται στο Σχήμα 12.

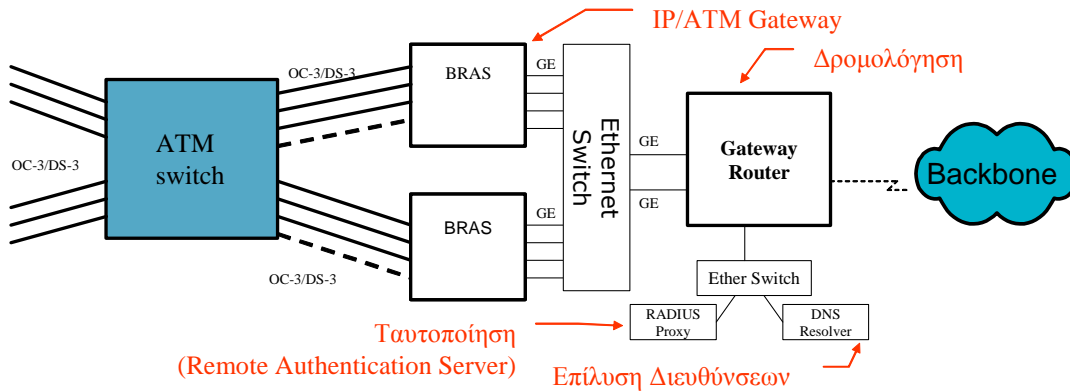


Σχήμα 12: Διασύνδεση στο δίκτυο κορμού μέσω του δικτύου πρόσβασης ADSL

2.2.6.1 Δρομολογητές

Ο δρομολογητής είναι μια συσκευή που κατευθύνει (δρομολογεί) τα δεδομένα από ένα «μονοπάτι» σε κάποιο άλλο μέσα σε ένα δίκτυο. Η λειτουργία τους βασίζεται σε πληροφοριακές παραμέτρους που φέρουν τα σήματα δεδομένων. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να περιλαμβάνουν τη διαθεσιμότητα κάποιου καναλιού επικοινωνίας, τη διεύθυνση προορισμού ενός «πακέτου», τη μέγιστη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης ενός «πακέτου» καθώς και άλλες σημαντικές πληροφορίες. Οι δρομολογητές που συνδέουν μονοπάτια δεδομένων (data paths) μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων είναι γνωστοί και ως gateways. Η συσκευή διασύνδεσης μέσω του δικτύου πρόσβασης με τις υπηρεσίες Διαδικτύου αποκαλείται συχνά ως Broadband Remote Access Server (BRAS), η οποία αποτελεί έναν εξυπηρετητή με αντίστοιχο λογισμικό και εφαρμογές για την υποστήριξη συνδρομητικών υπηρεσιών μέσω ευρυζωνικών δικτύων πρόσβασης (χαρακτηριστικά από τα οποία προκύπτει και η ονομασία της). Η βασικότερη εφαρμογή του δικτύου πρόσβασης είναι η διασύνδεση με το Διαδίκτυο, οπότε απαιτείται και η κατάλληλη διασύνδεση με τους δρομολογητές του δικτύου κορμού, ενώ μέρος της συνολικής αρχιτεκτονικής αποτελεί η διαπίστευση των χρηστών και η επαλήθευση της έγκυρης συνδρομής και εξουσιοδοτημένης χρήσης των πόρων και συγκεκριμένων υπηρεσιών του δικτύου, η οποία απαιτεί την χρήση πρόσθετων εξυπηρετητών κατά περίπτωση όπως φαίνεται σε λεπτομέρεια μιας πιθανής υλοποίησης ενός σημείου διασύνδεσης στο Διαδίκτυο στο Σχήμα 13. Σε ορισμένες περιπτώσεις θα έχει την

δυνατότητα να παρέχει και επιπρόσθετες υπηρεσίες όπως την δυνατότητα εκχώρησης δυναμικής IP διεύθυνσης όπου κάθε πακέτο θα πρέπει να εξεταστεί χρησιμοποιώντας το DHCP (Dynamic Host Control Protocol) για να σταλεί μετά στην σωστή διεύθυνση (DHCP-relay function).



Σχήμα 13: Συνήθης υλοποίηση διασύνδεσης με το διαδίκτυο μέσω δικτύου πρόσβασης ADSL

2.2.6.2 Μεταγωγείς (Switch) ATM

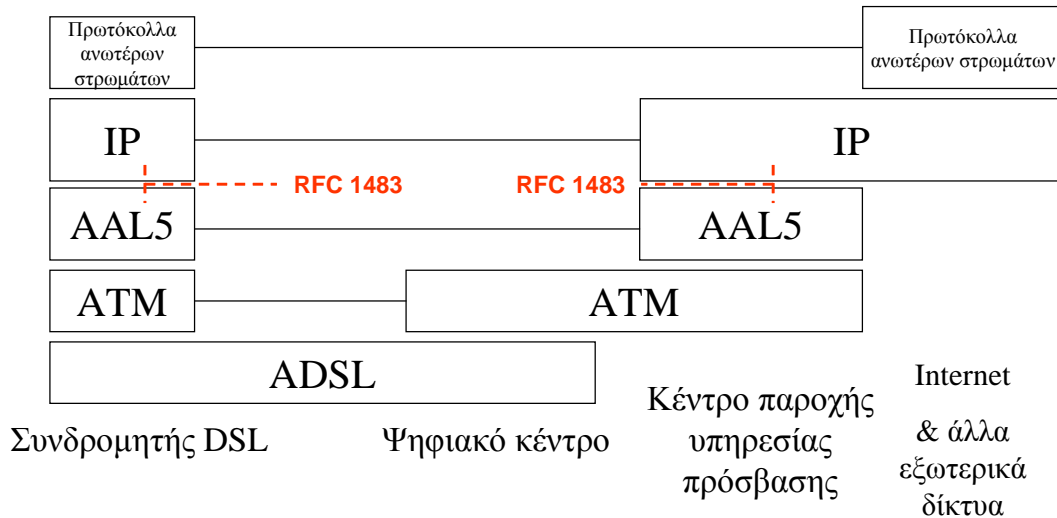
Ένας μεταγωγέας ATM διακόπτης αποτελεί μέρος ενός συστήματος μεταγωγής που μεταφέρει πληροφορία με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Ένα ATM σύστημα χρησιμοποιεί γραμμές μεταφοράς υψηλής ταχύτητας (155Mbps και άνω). Το σύστημα μεταγωγέων ATM είναι ένα σύστημα που βασίζεται στην αποκατάσταση συνδέσεων (connection-based). Η υπηρεσία ATM δημιουργήθηκε για να επιτρέψει σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα μέσης ταχύτητας να χρησιμοποιηθεί για μεταγωγή πακέτων φωνής, δεδομένων και video. Από το 1990 και έπειτα, το ATM καθιερώθηκε ως αναντικατάστατο τμήμα του σκελετού ενός δικτύου υψηλής ταχύτητας και χρησιμοποιούνται ως βασικό μέρος των προδιαγραφών δικτύου του ADSL. Οι συγκεντρωτές ATM εφαρμόζονται σε δίκτυα που συγκεντρώνουν κίνηση δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως DSL γραμμές και ISP σύνδεσμοι, ώστε να μεταδώσουν φωνή, δεδομένα και video.

Ο μεταγωγέας ATM (ATM switch) δρομολογεί με πολύ γρήγορο ρυθμό τα πακέτα στον προκαθορισμένο προορισμό τους. Κάθε μεταγωγέας διατηρεί μια βάση δεδομένων (switching matrix). Η βάση αυτή ανανεώνεται κάθε φορά που μια σύνδεση δημιουργείται ή τερματίζεται. Αυτό βοηθάει στην αποδοτικότερη και γρηγορότερη λειτουργία του ATM switch. Ο μεταγωγέας έχει επίσης τη δυνατότητα να στέλνει πακέτα κατά προτεραιότητα προς εξυπηρέτηση ή ακόμη και να ακυρώνουν την αποστολή τους, ανάλογα με την συμφόρηση και τη διαθεσιμότητα του δικτύου.

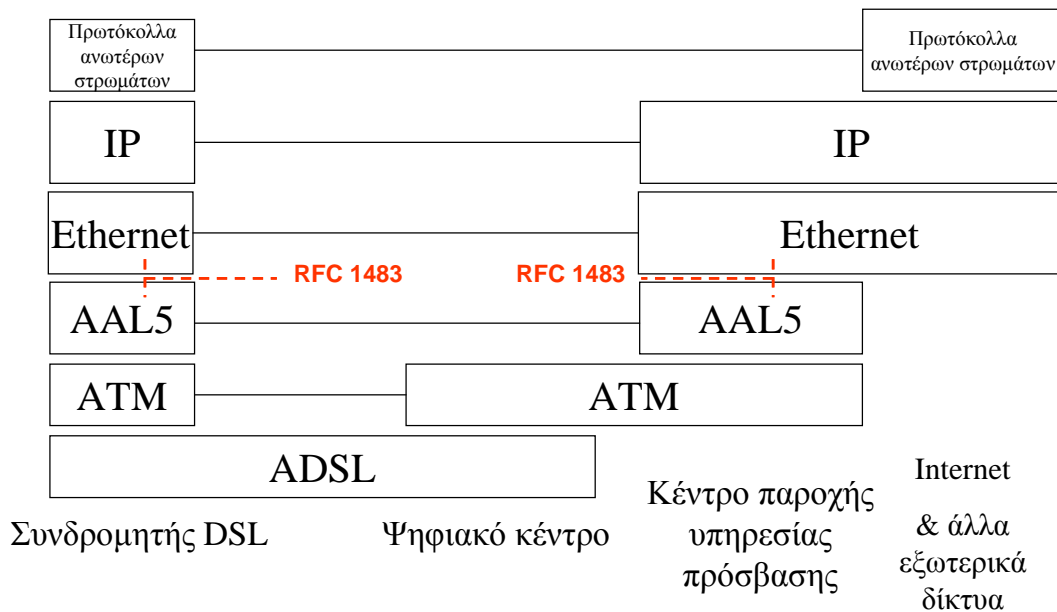
3 ΣΤΟΙΒΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ

Σύμφωνα με την αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε παραπάνω και με βάση την αποδοχή της τεχνικής μεταγωγής ATM, η οποία αξιοποιήθηκε αποκλειστικά στο πρώτο στάδιο ανάπτυξης της ADSL και των παρεμφερών τεχνολογιών η στοίβα πρωτοκόλλων βασίζεται στην τεχνική ασύγχρονης μεταγωγής ATM και τις αντίστοιχες τεχνικές πολύπλεξης και ενθυλάκωσης δεδομένων. Οι εφαρμογές ανωτέρων στρωμάτων στην πιο συνηθισμένη περίπτωση ανήκουν στο γενικότερο σύνολο των Διαδικτυακών εφαρμογών βασισμένες στο πρωτόκολλο IP. Ως εκτούτου η δυνατότητα απευθείας ενθυλάκωσης των

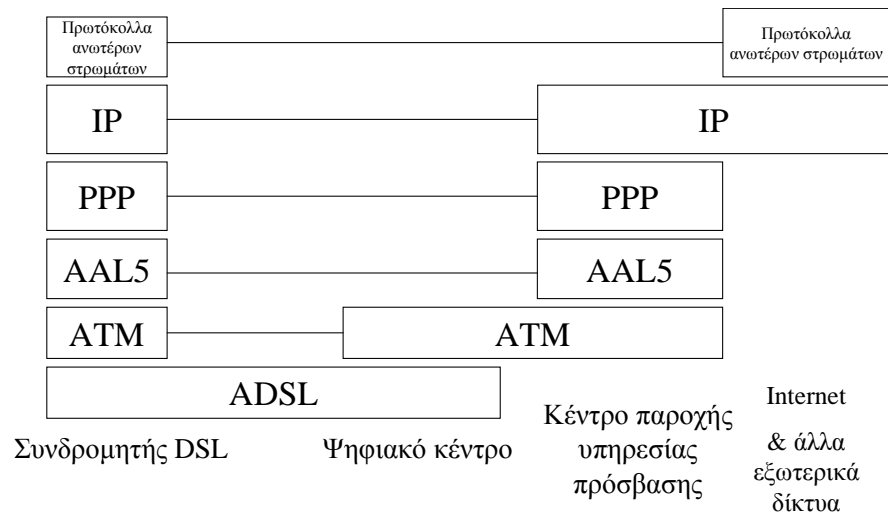
δεδομένων αυτών των εφαρμογών προβλέπεται από τα πρότυπα του ADSL σύμφωνα με την στοιβία που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Το πρότυπο RFC 1483 προδιαγράφει τον τρόπο ενθυλάκωσης πλαισίων μεταβλητού μεγέθους για μετάδοση πάνω από δίκτυα ATM με τις αντίστοιχες τεχνικές προσαρμογής που προβλέπει το πρωτόκολλο AAL5 του ATM. Αξίζει να αναφερθεί πως το αντίστοιχο πρότυπο δεν περιορίζεται στην μετάδοση αποκλειστικά πακέτων IP, αλλά προβλέπει και την γενικότερη χρήση άλλων τύπων πλαισίου όπως το Ethernet το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά ως τύπος πλαισίου. Η στοιβία πρωτοκόλλων σε αυτή την περίπτωση θα είναι όπως στο ακόλουθο σχήμα.



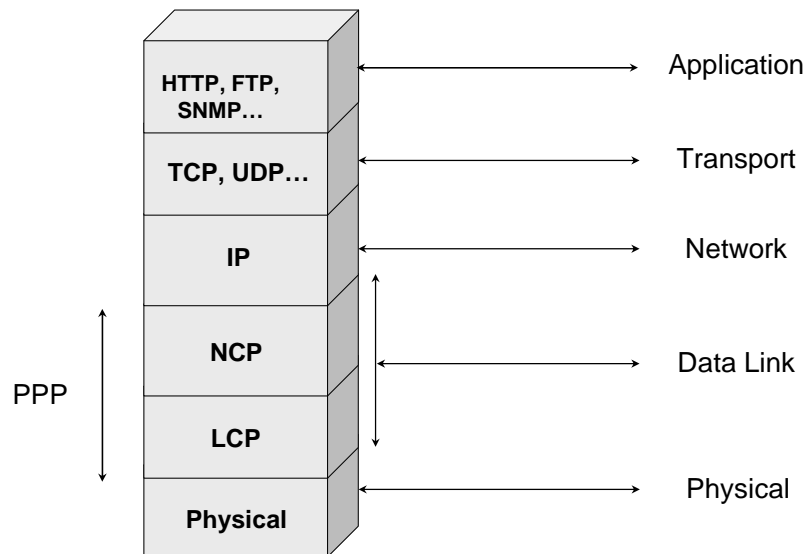
Παρά την δυνατότητα μεταφοράς πλαισίων Ethernet ή πακέτων IP που είναι πολύ διαδεδομένες τεχνολογίες απευθείας πάνω από το ATM, όπως είδαμε στις παραπάνω περιπτώσεις, στην πράξη η στοίβα που έχει επικρατήσει να υλοποιείται συνηθέστερα ακολουθεί την διαστρωμάτωση που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία διευκολύνουν την εγκατάσταση και παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών, στα οποία θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια.



Η αναλυτικότερη περιγραφή των λειτουργιών του φυσικού στρώματος στο οποίο ανήκει η ADSL θα γίνει σε επόμενη ενότητα, ενώ οι λεπτομέρειες εφαρμογής της τεχνολογίας ATM και των πρωτοκόλλων αυτών θεωρούνται γνωστές. Στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά κυρίως στην εφαρμογή ενθυλάκωσης με βάση το πρότυπο RFC 1483 καθώς και του πρωτοκόλλου PPP (Point-to-Point Protocol) ως επιλογής για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών και οι λεπτομέρειες προσαρμογής των στρωμάτων κάτω από το στρώμα δικτύου, όπου λειτουργούν τα ευρύτατα διαδεδομένα πρωτόκολλα του Διαδικτύου (Internet Protocol, IP, στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP κλπ.).

Ένα παράδοξο της διαστρωμάτωσης με χρήση του PPP (όπως και του Ethernet) και χρήσης των πρωτοκόλλων σύμφωνα με την παραπάνω ιεραρχία είναι η διαδοχική εφαρμογή πρωτοκόλλων που θεωρητικά αναπτύχθηκαν για να καλύψουν τις απαιτήσεις των χαμηλότερων στρωμάτων που προέβλεπε η αρχιτεκτονική OSI. Έτσι με την OSI κατάταξη των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων σε στρώματα η ADSL τεχνολογία υλοποιεί συναρτήσεις κατεξοχήν του φυσικού στρώματος (1^ο στρώματος της στοίβας κατά OSI), αλλά καλύπτει και λειτουργίες του 2^ο στρώματος (ζεύξης δεδομένων, Data Link) καθώς υποστηρίζει τη χρήση πλαισίων, συγχρονισμό, έλεγχο και διόρθωση σφάλματος κ.α. Το ATM αντίστοιχα αναπτύχθηκε κατεξοχήν για την εξυπηρέτηση των αναγκών του 2^ο στρώματος καθώς αφορά την μεταγωγή πλαισίων δεδομένων (κελιών) με αξιόπιστο τρόπο και την προσαρμογή των πρωτοκόλλων ανωτέρων στρωμάτων, ενώ ταυτόχρονα μελετήθηκαν και λειτουργίες προσαρμογής στο φυσικό στρώμα (1^ο στρώμα της στοίβας OSI) κατά παράβαση της θεωρητικής ανεξαρτησίας των στρωμάτων που επέβαλε το πρότυπο OSI. Τέλος στην εφαρμογή της ADSL για παροχή ευρυζωνικών υποδομών βλέπουμε την εισαγωγή του πρωτοκόλλου PPP για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων αναγκών το οποίο θεωρητικά επίσης κατατάσσεται και αυτό ως

πρωτόκολλο 2^ο στρώματος. Η γενική εφαρμογή του PPP αφορά την υλοποίηση συνδέσεων πάνω από γραμμές σημείου-προς-σημείο, όπως δηλώνει και το όνομά του και κατεξοχήν τέτοια εφαρμογή αποτελούν και οι συνδέσεις ADSL. Η χρήση του PPP εξάλλου αποτελεί εξέλιξη της αντίστοιχης εφαρμογής του και σε παλαιότερες τεχνικές πρόσβασης πάνω από απλές τηλεφωνικές γραμμές (dial-up). Η λογική εφαρμογής του PPP σε ένα δίκτυο και η αντιστοίχισή του με τα στρώματα του πρωτύπου OSI απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Η πραγματικότητα που οδήγησε στην επιλογή του συνδυασμού PPP και ATM και υλοποίησης της στοιβάς PPP/ATM (ή όπως συχνά αποκαλείται PPPoATM) είναι ότι το PPP υποστηρίζει ένα εύρος λειτουργιών, που μπορεί απλά και αξιόπιστα να χρησιμοποιηθεί για το πλείστο των ευρυζωνικών υπηρεσιών που επιθυμούσαν να παρέχουν οι τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί, αλλά δεν εξυπηρετούσε τις τεχνικές μετάδοσης ADSL στο σημείο διασύνδεσης με την διεπαφή ADSL, ούτε την διασύνδεση με ευρυζωνικά δίκτυα κορμού. Τα σημεία αυτά αντίθετα είναι στο επίκεντρο της σχεδίασης του πρωτοκόλλου ATM, για τα οποία αποτελεί βέλτιστη επιλογή. Αντιστρόφως το ATM δεν είχε αναπτύξει αντίστοιχα πρωτόκολλα για την διαχείριση συνδέσεων και παροχή υπηρεσιών σε ανώτερα στρώματα (όπως πιστοποίηση συνδρομητών για την ενεργοποίηση της υπηρεσίας και εγκατάσταση αμφίδρομης επικοινωνίας για μεταφορά πακέτων), γεγονός το οποίο οδήγησε εκ των πραγμάτων στην αναζήτηση πρωτοκόλλων που θα υποστήριζαν αυτή τη λειτουργικότητα όπως το PPP.

3.1 Ενθυλάκωση κατά το πρότυπο RFC 1483

3.1.1 Ενθυλάκωση LLC

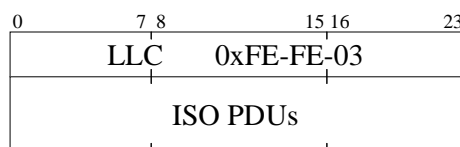
Σε αυτή την περίπτωση PDUs πρωτοκόλλων που υποστηρίζουν γεφύρωση ή δρομολόγηση (routed/bridged PDUs) ενθυλακώνονται σε πλαίσια (επικεφαλίδα) κατά IEEE 802.2 LLC.



Το πρωτόκολλο LLC βασίζεται στο πρωτόκολλο HDLC και ορίζει μια επικεφαλίδα, η οποία περιέχει 3 οκτάδες πληροφορίας. Οι πρώτες δύο (Destination Service Access Point – DSAP, Source Service Access Point - SSAP) υποδεικνύουν τις οντότητες ανωτέρων στρωμάτων και τα σχετικά πρωτόκολλα, που κάνουν χρήση της υπηρεσίας πάνω από την φυσική ζεύξη. Το τρίτο πεδίο ελέγχου (control) υποδεικνύει τον τύπο του πλαισίου που ενθυλακώνεται (η τιμή 0x03 χρησιμοποιείται στην περίπτωση του RFC 1483 η οποία αντιστοιχεί στον τύπο Unnumbered Information Command-UI PDU).

3.1.1.1 Δομή περιεχομένου πλαισίου LLC για ISO PDUs

Η τιμή 0xFE-FE-03 στην επικεφαλίδα LLC χρησιμοποιείται σε αυτή την περίπτωση (routed ISO PDU). Το αντίστοιχο πρωτόκολλο που μεταφέρεται υποδεικνύεται από το πεδίο NLPID που αποτελεί μέρος των δεδομένων.



3.1.1.2 Δομή περιεχομένου πλαισίου LLC ενθυλακωμένου με επικεφαλίδα SNAP

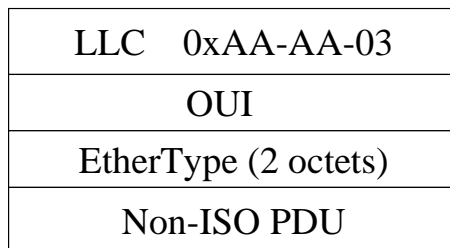
Στην περίπτωση πακέτων IP και πλαισίων Ethernet έχει προσδιοριστεί η αντίστοιχη χρήση του πρωτοκόλλου SNAP που θα υποδεικνύει αντίστοιχα το πεδίο NLPID. Η τιμή 0xAA-AA-03 στην επικεφαλίδα LLC υποδεικνύει την ύπαρξη SNAP header. Η δομή της επικεφαλίδας SNAP φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



- **OUI** - Organizationally Unique Identifier (3 octets)
 - ✓ Υποδεικνύει τον οργανισμό που διαχειρίζεται το πρωτόκολλο που ενθυλακώνεται
- **PID** - Protocol Identifier (2 octets)
 - ✓ Υποδεικνύει το πρωτόκολλο που ενθυλακώνεται

3.1.1.2.1 Δομή Περιεχομένου LLC/SNAP για Non-ISO Routed PDUs

Καθώς το IP κατατάσσεται στα πρωτόκολλα του στρώματος δικτύου που υποστηρίζουν δρομολόγηση η ενθυλάκωσή του σε LLC/SNAP πλαίσια γίνεται με χρήση των αντίστοιχων επικεφαλίδων που υποδεικνύει η μηδενική τιμή του πεδίου OUI, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Η τιμή OUI 0x00-00-00 αντιστοιχεί σε PID που ακολουθεί του αποκαλούμενου τύπου EtherType, όπου τιμή EtherType 0x08-00 υποδεικνύει ότι ακολουθεί (PDU) πακέτο IP.

3.1.1.2.2 Δομή Περιεχομένου LLC/SNAP για Bridged- PDUs

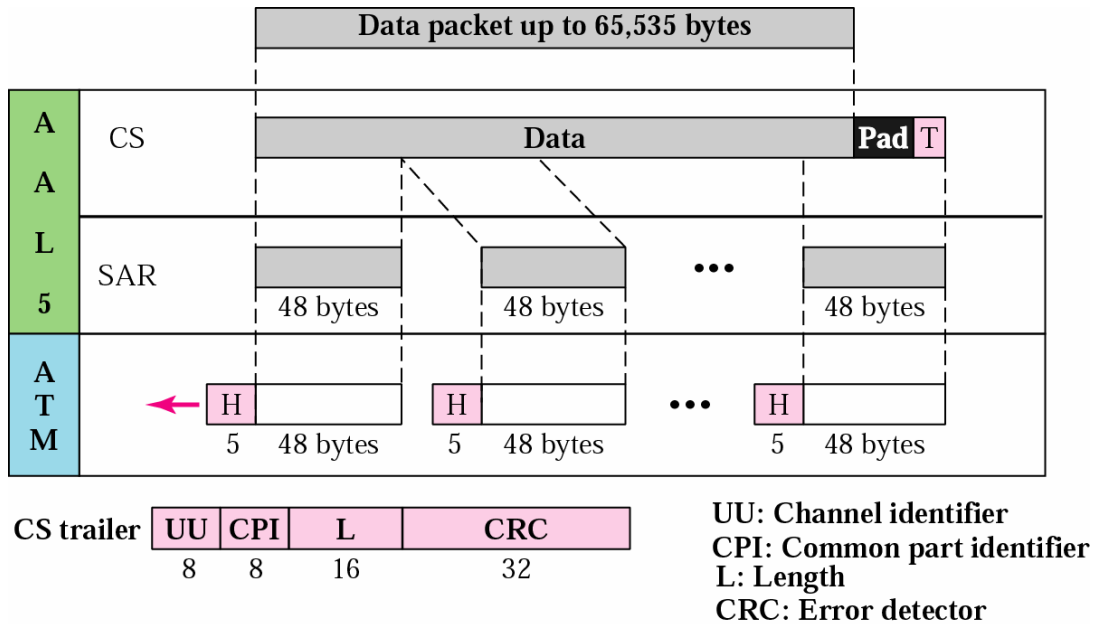
Για την μετάδοση πλαισίων Ethernet (κατά τη σειρά προτύπων IEEE 802) η αντίστοιχη τιμή του πεδίου OUI είναι η 0x00-80-C2. Σε αυτή την περίπτωση ακολουθούν δύο πεδία μήκους δύο οκτάδων το καθένα το PID και PAD, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

LLC 0xAA-AA-03
OUI 0x00-80-C2
PID
PAD
MAC destination address
Remainder of MAC frame
LAN FCS

Το πεδίο PID (2 οκτάδες) αναφέρεται στον τύπο γεφύρωσης (bridged media) και το PAD (Padding) χρησιμοποιείται για ευθυγράσιμη του πλαισίου σε όρια των 32-bit (32-bit alignment, λέξεις των 4 οκτάδων). Για πλαίσια Ethernet κατά το πρότυπο 802.3 συγκεκριμένα οι τιμές PID και PAD που προδιαγράφονται είναι PID=0x00-01 ή PID=0x00-07 και PAD=0x00-00 αντίστοιχα.

3.1.2 Πολύπλεξη VC

Η πολύπλεξη με βάση τα κανάλια VC (VC Multiplexing) αποτελεί εναλλακτική της ενθυλάκωσης LLC. Ενδείκνυται (λόγω του μηδενικού κόστους ενθυλάκωσης – overhead), εάν είναι δυνατή η δυναμική διαχείριση πολλαπλών VCs (SVCs) Δεν υπάρχει κόστος ενθυλάκωσης (επικεφαλίδα με ένδειξη πρωτοκόλλου κλπ.), γιατί κάθε VC που εγκάθισαται συνδέεται μονοσήμαντα με ένα τύπο πρωτοκόλλου, ο οποίος εφαρμόζεται πάνω από την συγκεκριμένη σύνδεση (πολλαπλά πρωτόκολλα θα χρησιμοποιούν ισάριθμες πολλαπλές συνδέσεις). Στην περίπτωση της VC πολύπλεξης το PPP πακέτο ενθυλακώνεται στο πεδίο Data του CS πεδίου του πλαισίου AAL5, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



3.2 Το πρωτόκολλο PPP

Το PPP λειτουργεί στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων και αποτελεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο ενθυλάκωσης και μεταφοράς της πληροφορίας του χρήστη πάνω από μία σημείο-προς-σημείο διασύνδεση. Δεν έχει κάποιους περιορισμούς όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, γιατί αυτός καθορίζεται αποκλειστικά από τον τύπο της διασύνδεσης. Η μόνη απαίτηση είναι η ύπαρξη ενός δικατευθυντικού κυκλώματος μεταξύ των δύο συστημάτων επικοινωνίας. Χρησιμοποιείται κατά κόρον για τη διασύνδεση του χρήστη με τον παροχέα υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP), μέσω modem και του κοινού τηλεφωνικού δικτύου. Προδιαγράφεται στην RFC 1661 προδιαγραφή

Το πρωτόκολλο PPP υποστηρίζει μία στοιχειώδη μέθοδο πολυπλεξίας ακολουθώντας την παρακάτω δομή πλαισίων:

Protocol (8/16 bits)	Information	Padding
-------------------------	-------------	---------

Το πεδίο Protocol προσδιορίζει τον τύπο δεδομένων που ενθυλακώνονται (πεδίο information).

Το πεδίο Information περιέχει ένα πακέτο δεδομένων από μηδέν έως ένα μέγιστο – αποκαλούμενο Maximum Receive Unit (MRU) – αριθμό οκτάδων. Το σύνηθες (default) MRU είναι 1500 οκτάδες, ενώ μπορεί να τροποποιηθεί κατόπιν διαπραγμάτευσης.

Το PPP δεν υποστηρίζει:

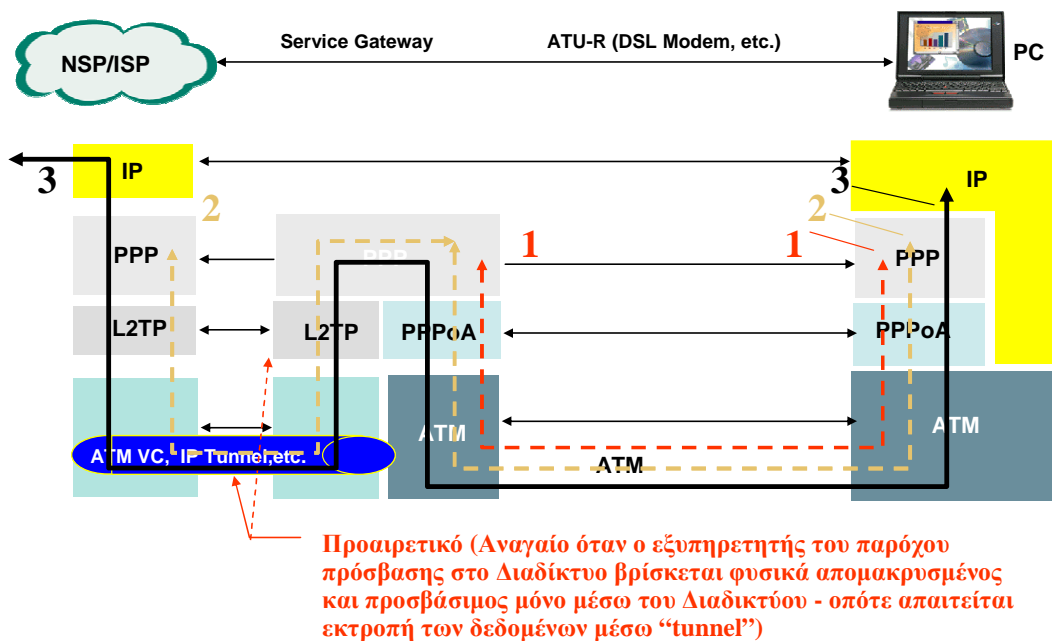
- α. Έλεγχο ροής
- β. Αξίопιστη μεταφορά δεδομένων
- γ. Διόρθωση λαθών
- δ. Συνδέσεις σημείου-προς-πολλά σημεία

Αντίθετα πέραν της βασικής διαδικασία ενθυλάκωσης παρέχει μία σειρά συνοδευτικών πρωτοκόλλων για την συντήρηση, παρακολούθηση και διαμόρφωση της σημείο-προς-

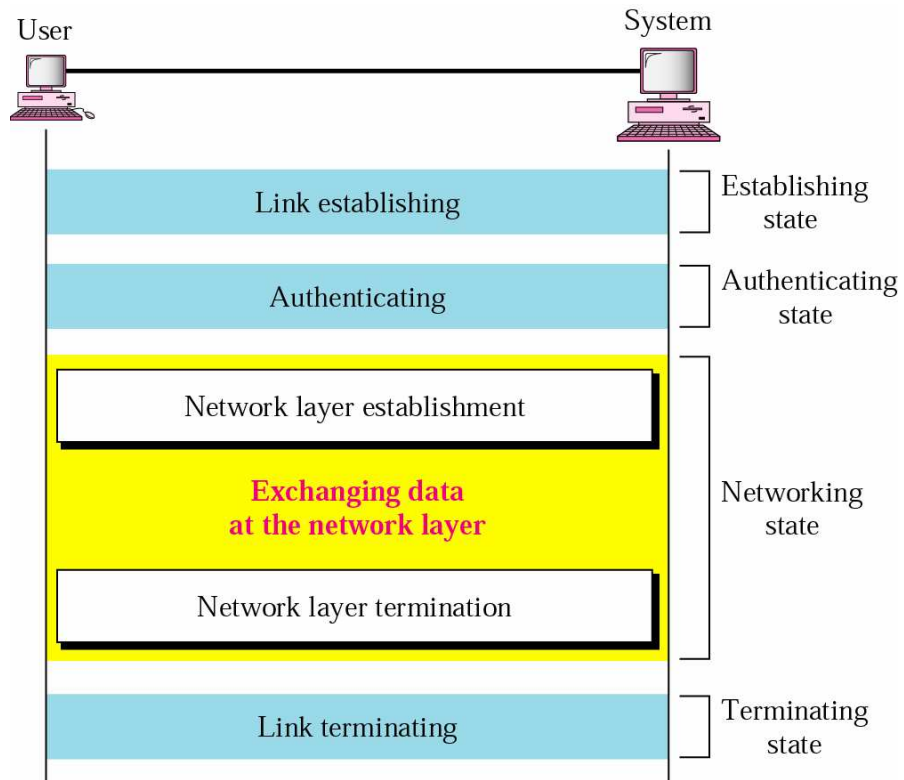
σημείο γραμμής για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνία κατόπιν πιστοποίησης του χρήστη για την έναρξη της υπηρεσίας σύνδεσης. Τα πρωτόκολλα αυτά περιγράφονται στην συνέχεια.

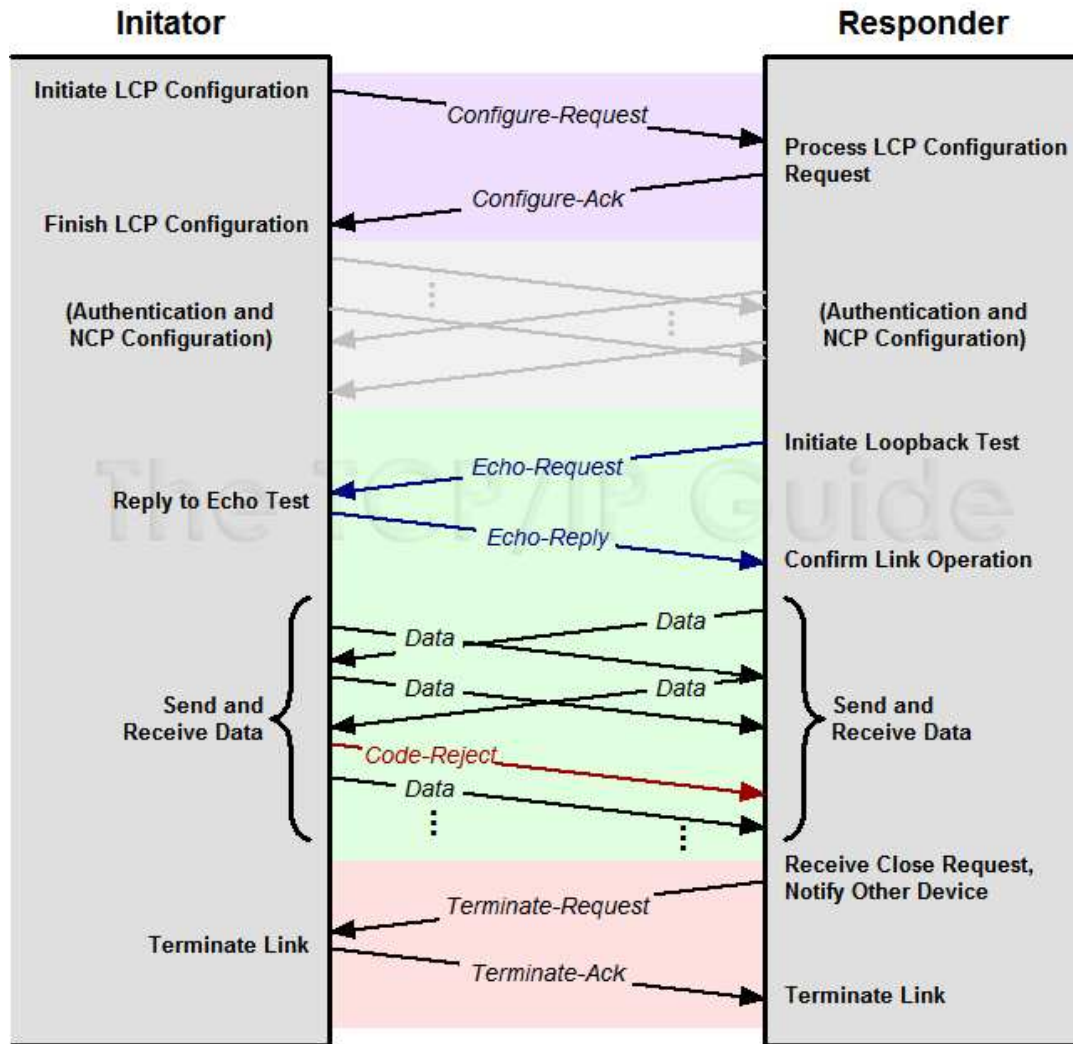
- LCP (Link Control Protocol). Είναι το πιο σημαντικό τμήμα του PPP και χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση, διαμόρφωση, έλεγχο και αποδέσμευση της PPP σύνδεσης
- NCPs (Network Control Protocols). Οικογένεια πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση και την διαμόρφωση διαφορετικών πρωτοκόλλων επιπέδων δικτύου πάνω από το PPP (π.χ. IP)
- Πρωτόκολλα πιστοποίησης της αυθεντικότητας του χρήστη (π.χ. PAP/CHAP)

Το πρώτο βήμα για την δημιουργία μίας PPP σύνδεσης είναι η ανταλλαγή LCP πακέτων για την εγκατάσταση, διαμόρφωση και έλεγχο της PPP σύνδεσης. Προαιρετικά, ακολουθεί η φάση πιστοποίησης του χρήστη μέσω του πρωτοκόλλου πιστοποίησης που καθορίστηκε κατά τη διαμόρφωση της PPP σύνδεσης. Στην επόμενη φάση NCP πακέτα ανταλλάσσονται για την επιλογή και διαμόρφωση του επιθυμητού πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου. Μετά την διαμόρφωση του πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου επιτρέπεται η ανταλλαγή πακέτων πληροφορίας πάνω από την PPP σύνδεση. Ο τερματισμός της PPP σύνδεσης πραγματοποιείται με την ανταλλαγή καταλλήλων LCP ή NCP πακέτων ή αν προκύψει κάποιο μη κανονικό γεγονός.

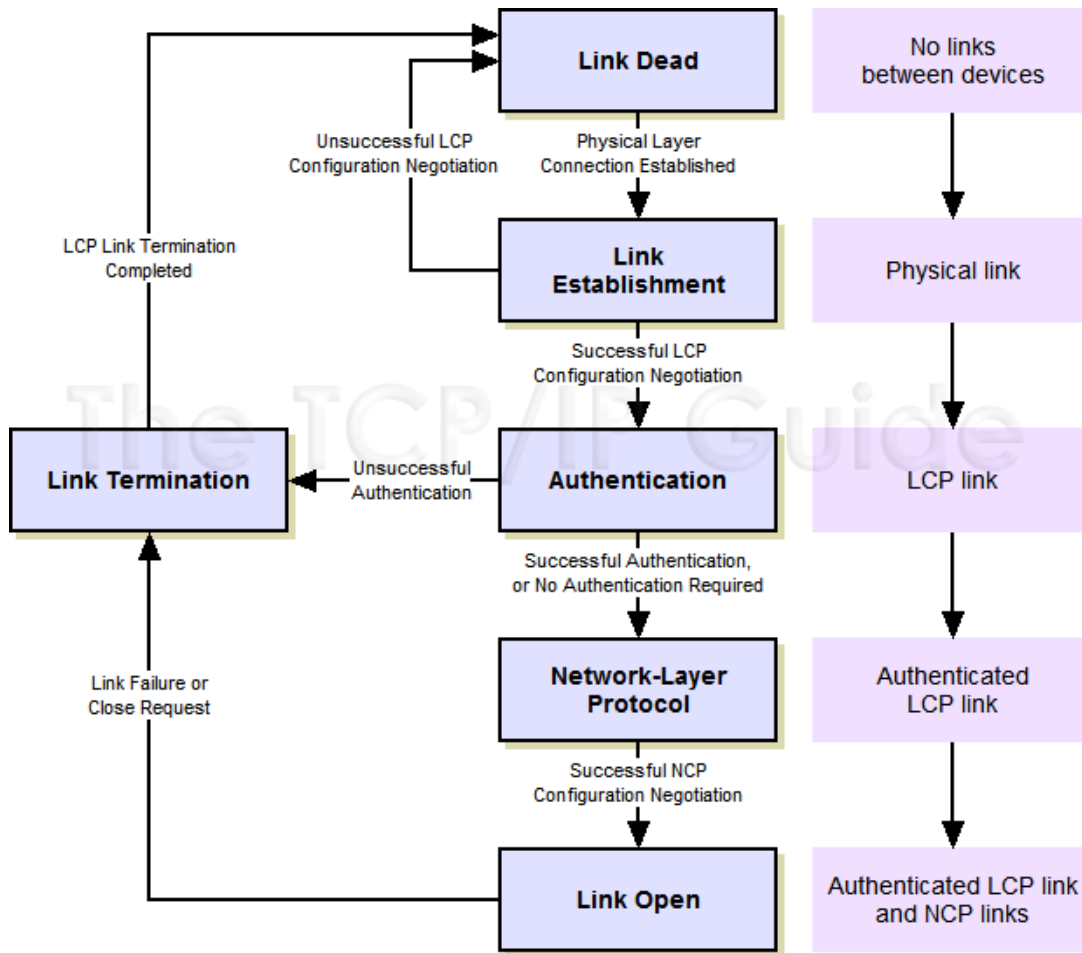


3.2.1 Φάσεις εξέλιξης σύνδεσης PPP





3.2.2 Μηχανή καταστάσεων (state machine) PPP

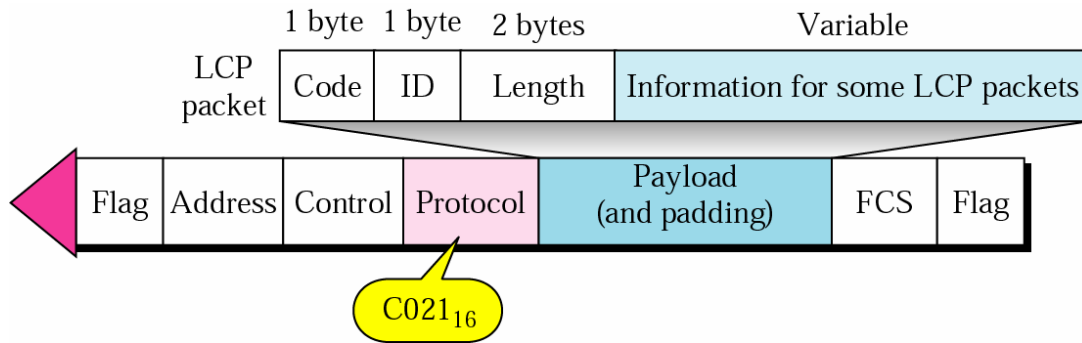


3.2.3 Link Control Protocol (LCP)

Όπως αναφέρθηκε το πρώτο βήμα για την δημιουργία μίας PPP σύνδεσης είναι η ολοκλήρωση των φάσεων του LCP πρωτοκόλλου με την ανταλλαγή μηνυμάτων για την εγκατάσταση, διαμόρφωση και έλεγχο της PPP σύνδεσης. Το LCP διακρίνει και αυτό με τη σειρά του τρεις φάσεις, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

1. **Link Configuration.** Εγκατάσταση και διαμόρφωση της PPP σύνδεσης μέσω των Configure_Req, Configure_Ack, Configure_Nak και Configure_Reject μηνυμάτων
2. **Link Maintenance.** Έλεγχος και διαχείριση της PPP σύνδεσης μέσω των Code_Rej, Protocol_Rej, Echo_Req, Echo_Reply και Discard_Req μηνυμάτων
3. **Link Termination.** Τερματισμός της PPP σύνδεσης μέσω των Terminate_Req και Terminate_Ack μηνυμάτων

Η αντίστοιχη δομή των πακέτων PPP που μεταφέρουν τα μηνύματα του LCP φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και χαρακτηρίζονται από την τιμή πρωτοκόλλου 0xc021.



Τα πεδία των μηνυμάτων μεταφέρουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- **Code.** Δηλώνει τον τύπο του LCP πακέτου
- **ID.** Χρησιμοποιείται για τον συσχετισμό των απαντήσεων με τις αιτήσεις
- **Length.** Δηλώνει το συνολικό μήκος του LCP πακέτου σε bytes
- **Data.** Μεταφέρει την πληροφορία του LCP πακέτου

Τα είδη των μηνυμάτων που υποδεικνύονται από την τιμή του πεδίου CODE και οι αντίστοιχες λειτουργίες που παρέχουν περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Code	Όνομα Μηνύματος	Περιγραφή
0116	Configure-req	Configure_Req. Χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση της PPP σύνδεσης. Το Data πεδίο περιέχει τις παραμέτρους διαμόρφωσης της PPP σύνδεσης και τις αντίστοιχες τιμές τους που επιθυμεί ο αποστολέας του μηνύματος
0216	Configure-ack	Configure_Ack. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος αποδέχεται τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Ack και η PPP σύνδεση εγκαθίσταται επιτυχώς
0316	Configure-nak	Configure-Nak. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος δεν αποδέχεται κάποιες από τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Nak
0416	Configure-reject	Configure_Rej. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος δεν αναγνωρίζει κάποιες από τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Rej
0516	Terminate-request	Terminate_Req. Χρησιμοποιείται για τον τερματισμό της PPP σύνδεσης
0616	Terminate-ack	Terminate_Ack. Αποστέλλεται από τον δέκτη του Terminate_Req ως επιβεβαίωση του τερματισμού της PPP σύνδεσης
0716	Code-reject	Code_Rej. Αποστέλλεται από τον δέκτη ενός LCP μηνύματος

		όταν η τιμή του πεδίου Code είναι μη αποδεκτή
0816	Protocol-reject	Protocol_Rej. Αποστέλλεται από τον δέκτη ενός PPP μηνύματος όταν δεν υποστηρίζει το πρωτόκολλο που δηλώνεται στο πεδίο Protocol
0916	Echo-request	Echo_Req. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της κατάστασης της PPP σύνδεσης
0A16	Echo-reply	Echo_Reply. Αποστέλλεται από τον δέκτη του Echo_Req μηνύματος ως απάντηση σε αυτό
0B16	Discard-request	Discard_Req. Αίτηση απόρριψης πακέτου

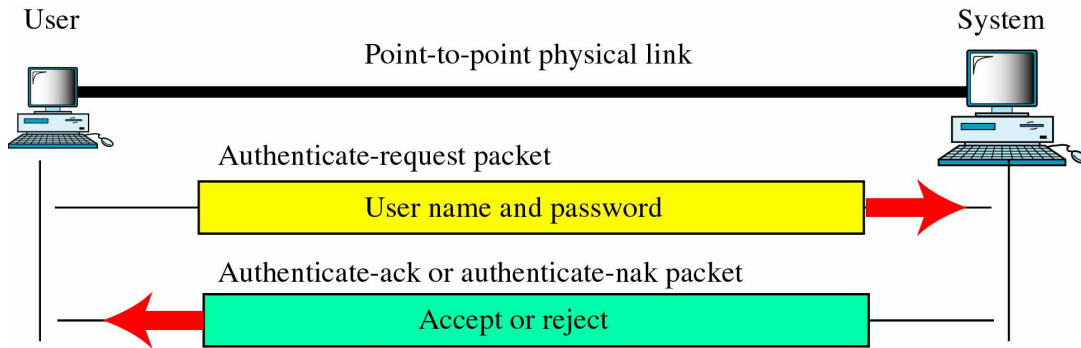
Οι παράμετροι διαμόρφωσης μιας σύνδεσης PPP που μπορούν να τεθούν κατά την ανταλλαγή των μηνυμάτων Configure-req, Configure-ack και Configure-nak περιέχονται στον ακόλουθο πίνακα.

Παράμετρος (Option)	Τυπική τιμή (Default)
Maximum receive unit	1500
Authentication protocol	None
Protocol field compression	Off
Address and control field compression	Off

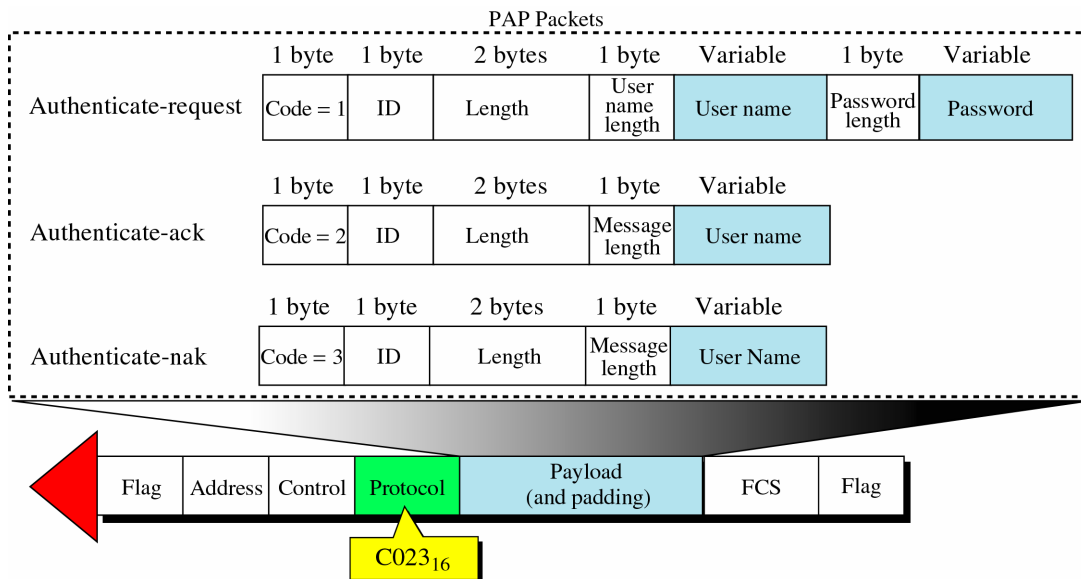
3.2.4 Password Authentication Protocol (PAP)

Το πιο απλό πρωτόκολλο πιστοποίησης ταυτότητας χρήστη. Περιγράφεται στην RFC 1334 προδιαγραφή. Η πιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας χειραγίας δύο μερών (2-way handshake) μεταξύ του χρήστη και του εξυπηρετητή πρόσβασης, που εξελίσσεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Ο χρήστης στέλνει προς τον εξυπηρετητή πρόσβασης ένα ζεύγος παραμέτρων που περιέχουν το όνομα του και το συνθηματικό
- Ο εξυπηρετητής ελέγχει αν το ζεύγος αυτό είναι καταχωρημένο στη βάση δεδομένων που διαθέτει και εάν είναι επιτρέπεται η πρόσβαση του χρήστη στο δίκτυο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η πρόσβαση απαγορεύεται
- Η διαδικασία αυτή εκτελείται μόνο μία φορά
- Το όνομα και το συνθηματικό του χρήστη δεν στέλνονται κρυπτογραφημένα, αλλά σε μορφή απλού κειμένου



Η αντίστοιχη δομή των πακέτων PPP που μεταφέρουν τα μηνύματα του PAP φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και χαρακτηρίζονται από την τιμή πρωτοκόλλου 0xc023.



Τα πεδία των μηνυμάτων μεταφέρουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- **Code: 1 byte** - καθορίζει τον τύπο του PAP πακέτου:

α. *Authenticate-Request.* Αποστέλλεται από τον χρήστη για την εκκίνηση της διαδικασίας πιστοποίησης. Περιέχει το ζεύγος ονόματος χρήστη και συνθηματικού σε μορφή μη κρυπτογραφημένου κειμένου

β. *Authenticate-Ack.* Αποστέλλεται από τον εξυπηρετητή εάν το ζεύγος των παραμέτρων είναι έγκυρο

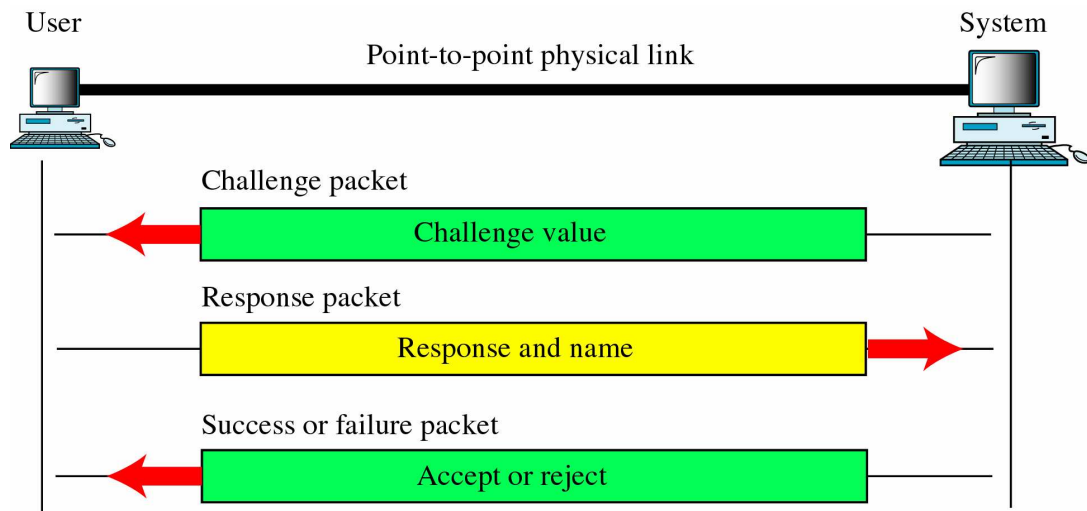
γ. *Authenticate-Nak.* Αποστέλλεται από τον εξυπηρετητή εάν το ζεύγος των παραμέτρων δεν είναι έγκυρο

- **Identifier: 1 byte** - χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση των αιτήσεων με τις απαντήσεις
- **Length: 2 bytes** - δηλώνει το συνολικό μήκος του πακέτου
- **Data:** Μεταβλητό μήκος και το περιεχόμενο του καθορίζεται ανάλογα με τον τύπο του PAP πακέτου

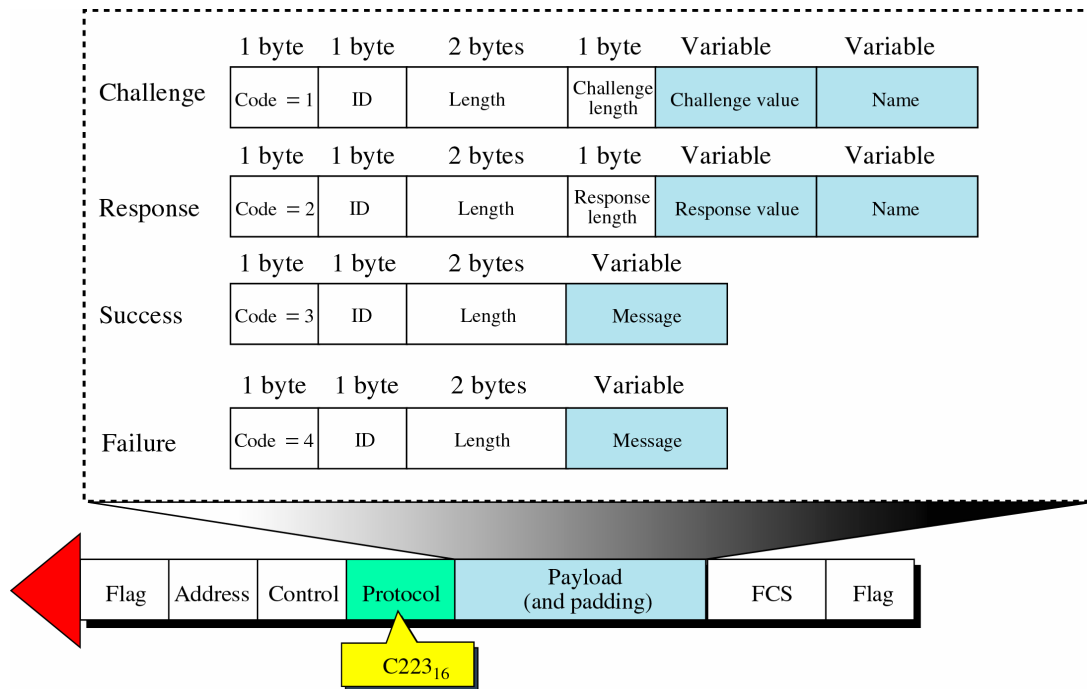
3.2.5 Challenge Authentication Protocol (CHAP)

Το πρωτόκολλο πιστοποίησης CHAP είναι πιο ασφαλές από το PAP πρωτόκολλο. Περιγράφεται στην RFC 1994 προδιαγραφή. Απαιτείται η χρήση ενός ζεύγους ονόματος χρήστη και συνθηματικού, το οποίο είναι γνωστό μόνο μεταξύ του εξυπηρετητή και του χρήστη. Το συνθηματικό αποστέλλεται με κρυπτογραφημένο τρόπο από τον χρήστη προς τον εξυπηρετητή. Η πιστοποίηση επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας χειραψίας τριών μερών (3-way handshake) μεταξύ του χρήστη και του εξυπηρετητή πρόσβασης, που εξελίσσεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Ο εξυπηρετητής ενεργοποιεί τη διαδικασία πιστοποίησης δημιουργώντας μία τυχαία τιμή, την οποία και στέλνει προς τον χρήστη μέσω κατάλληλου μηνύματος
- Ο χρήστης εφαρμόζει τον αλγόριθμο κατακερματισμού MD5 πάνω σε αυτήν την τιμή και στο συνθηματικό του και στέλνει το αποτέλεσμα στον εξυπηρετητή
- Ο εξυπηρετητής εφαρμόζει τον ίδιο αλγόριθμο πάνω στην τυχαία τιμή και στο συνθηματικό του χρήστη και συγκρίνει το αποτέλεσμα του με το αποτέλεσμα του χρήστη
- Ο εξυπηρετητής επιτρέπει την πρόσβαση του χρήστη στο δίκτυο μόνο εάν τα αποτελέσματα είναι τα ίδια
- Η διαδικασία πιστοποίησης επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα για λόγους ασφαλείας



Η αντίστοιχη δομή των πακέτων PPP που μεταφέρουν τα μηνύματα του CHAP φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και χαρακτηρίζονται από την τιμή πρωτοκόλλου 0xc223.

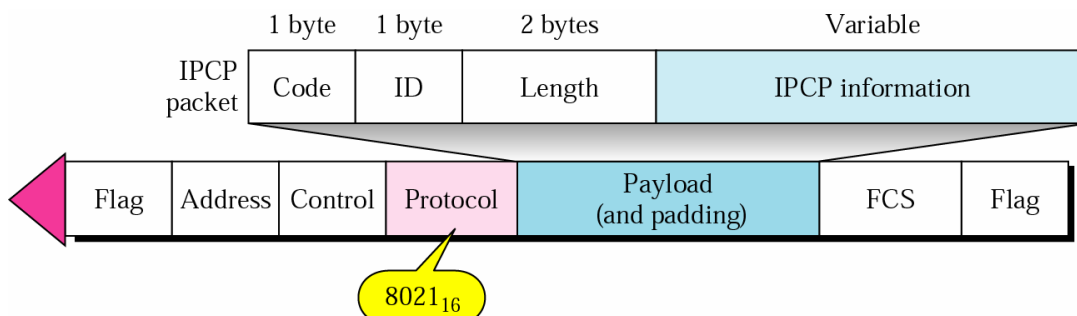


Τα πεδία των μηνυμάτων μεταφέρουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- **Code:** Έχει μήκος 1 byte και καθορίζει τον τύπο του CHAP πακέτου:
 - Challenge.* Αποστέλλεται από τον εξυπηρετητή για την εκκίνηση της διαδικασίας πιστοποίησης. Περιέχει την τυχαία τιμή (Challenge Value), η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την πιστοποίηση του χρήστη. Το μήνυμα Challenge μπορεί να αποσταλεί οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της PPP σύνδεσης
 - Response.* Αποστέλλεται από τον χρήστη και περιέχει το αποτέλεσμα του αλγορίθμου κατακερματισμού πάνω στην τυχαία τιμή του Challenge μηνύματος, στο συνθηματικό του χρήστη και στην τιμή του Identifier
 - Success.* Αποστέλλεται από τον εξυπηρετητή σε περίπτωση που η τιμή του Response μηνύματος είναι η αναμενόμενη
 - Failure.* Αποστέλλεται από τον εξυπηρετητή σε περίπτωση που η τιμή του Response μηνύματος δεν είναι η αναμενόμενη
- **Identifier:** Έχει μήκος 1 byte και χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση των αιτήσεων με τις απαντήσεις
- **Length:** Έχει μήκος 2 bytes και δηλώνει το συνολικό μήκος του πακέτου
- **Data:** Έχει μεταβλητό μήκος και το περιεχόμενο του καθορίζεται ανάλογα με τον τύπο του CHAP πακέτου
- **Name:** Έχει μεταβλητό μήκος και περιέχει το όνομα του χρήστη (username) που στέλνει το CHAP μήνυμα

3.2.6 Internet Protocol Control Protocol (IPCP)

Μετά τη φάση εγκατάστασης της PPP σύνδεσης και της προαιρετικής φάσης πιστοποίησης του χρήστη ακολουθεί η φάση επιλογής και διαμόρφωσης του επιθυμητού πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου από το σύνολο των υποστηριζόμενων NCPs, (Network Control Protocols). Το σύνολο των πρωτοκόλλων NCPs αποτελεί την οικογένεια πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση και την διαμόρφωση διαφορετικών πρωτοκόλλων επιπέδων δικτύου πάνω από το PPP (π.χ. IP). Το NCP πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την επιλογή και διαμόρφωση του IP πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου ονομάζεται IPCP. Είναι υπεύθυνο για την διαμόρφωση και την ενεργοποίηση του IP πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου και των δύο άκρων της PPP σύνδεσης και χρησιμοποιεί τον ίδιο μηχανισμό ανταλλαγής πακέτων και τύπους πακέτων με το LCP. Η ανταλλαγή των IPCP πακέτων επιτρέπεται μόνο μετά την εγκατάσταση της PPP σύνδεσης. Τα IPCP πακέτα ενθυλακώνονται μέσα σε PPP πακέτα και η τιμή του πεδίου Protocol είναι 0x8021.



Τα πεδία των μηνυμάτων μεταφέρουν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- **Code.** Δηλώνει τον τύπο του IPCP πακέτου
- **ID.** Χρησιμοποιείται για τον συσχετισμό των απαντήσεων με τις αιτήσεις
- **Length.** Δηλώνει το συνολικό μήκος του IPCP πακέτου σε bytes
- **Data.** Μεταφέρει την πληροφορία του IPCP πακέτου

Τα είδη των μηνυμάτων που υποδεικνύονται από την τιμή του πεδίου CODE και οι αντίστοιχες λειτουργίες που παρέχουν περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

Code	Όνομα Μηνύματος	Περιγραφή
0x1	Configure-req	Configure_Req. Χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση της PPP σύνδεσης. Το Data πεδίο περιέχει τις παραμέτρους διαμόρφωσης της PPP σύνδεσης και τις αντίστοιχες τιμές τους που επιθυμεί ο αποστολέας του μηνύματος
0x2	Configure-ack	Configure_Ack. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος αποδέχεται τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Ack και η PPP σύνδεση εγκαθίσταται επιτυχώς

0x3	Configure-nak	Configure-Nak. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος δεν αποδέχεται κάποιες από τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Nak
0x4	Configure-reject	Configure_Rej. Εάν ο δέκτης του Configure_Req μηνύματος δεν αναγνωρίζει κάποιες από τις παραμέτρους διαμόρφωσης που περιέχονται σε αυτό αποκρίνεται με Configure_Rej
0x5	Terminate-request	Terminate_Req. Χρησιμοποιείται για τον τερματισμό της PPP σύνδεσης
0x6	Terminate-ack	Terminate_Ack. Αποστέλλεται από τον δέκτη του Terminate_Req ως επιβεβαίωση του τερματισμού της PPP σύνδεσης
0x7	Code-reject	Code_Rej. Αποστέλλεται αι από τον δέκτη ενός LCP μηνύματος όταν η τιμή του πεδίου Code είναι μη αποδεκτή

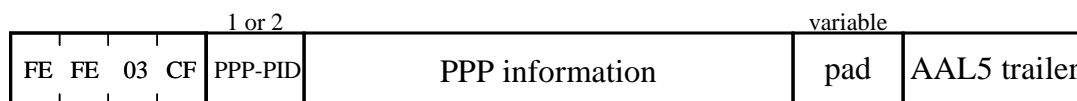
3.2.7 Ενθυλάκωση πακέτων PPP σε πλαίσια κατωτέρων στρωμάτων

3.2.7.1 PPP πάνω από ATM (PPP over ATM - PPPoATM)

Το AAL5/ATM χρησιμοποιείται για την μεταφορά των PPP πακέτων σύμφωνα με τις γενικές αρχές ενθυλάκωσης πακέτων ανωτέρων στρωμάτων που χρησιμοποιούνται στις γραμμές ADSL. Προδιαγράφεται στην RFC 2364 προδιαγραφή. Η PPP σύνδεση αντιστοιχεί σε ένα AAL5 ιδεατό κύκλωμα. Το AAL5 ιδεατό κύκλωμα είναι μία είτε σταθερά εγκατεστημένη (PVC) είτε δυναμικά εγκατεστημένη (SVC), διπλής κατεύθυνσης, σημείο-προς-σημείο σύνδεση. Για την ενθυλάκωση PPP ακολουθούνται οι δύο επιλογές που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.1 (LLC encapsulation για ενθυλάκωση PPP PDUs ή Πολύπλεξη VC

3.2.7.1.1 Ενθυλάκωση LLC

Στην περίπτωση της LLC ενθυλάκωσης χρησιμοποιείται η δομή των ISO-PDUs με ένδειξη NLPID 0xCF. Η συγκεκριμένη δομή του ενθυλακωμένου πλαισίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

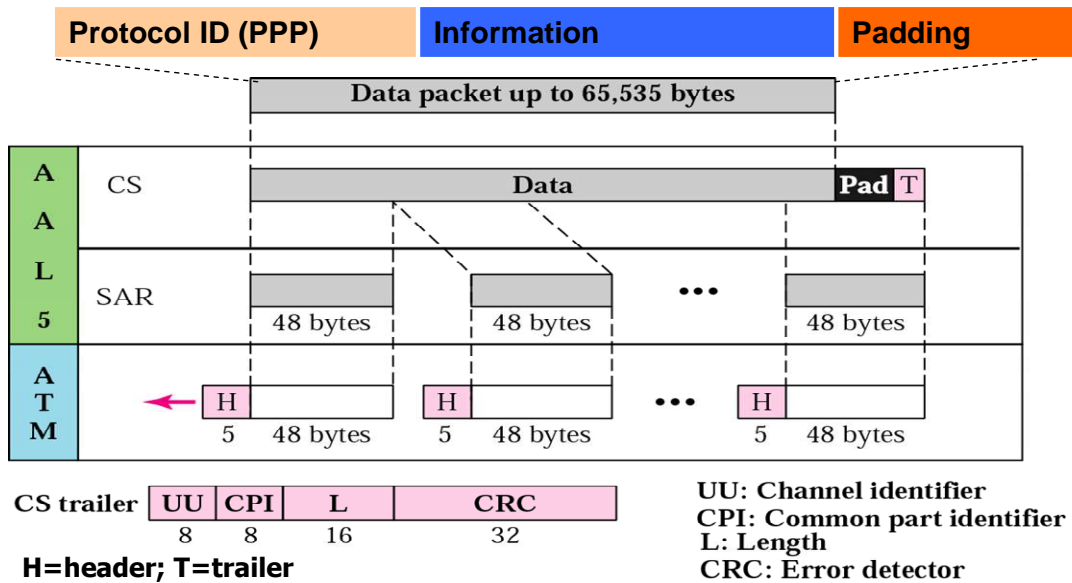


Αναλυτικά οι τιμές των πεδίων κάθε επικεφαλίδας θα πρέπει να είναι οι ακόλουθες:

- LLC header (δομή routed OSI PDU):
 - source SAP: 0xFE)
 - destination SAP: 0xFE
 - Control (Un-numbered Information frame type –UD): 0x03
- Τιμή Network Layer Protocol Identifier (NLPID): 0xCF (PPP)
- PPP PDU (πακέτο PPP: Protocol Identifier +information+padding)

3.2.7.1.2 Πολύπλεξη VC

Η Πολύπλεξη με βάση τα VC (VC Multiplexing) αποτελεί εναλλακτική της ενθυλάκωσης LLC/SNAP. Ενδείκνυται (λόγω του μηδενικού κόστους ενθυλάκωσης – overhead) εάν είναι δυνατή η δυναμική διαχείριση πολλαπλών VCs (SVCs). Δεν υπάρχει κόστος ενθυλάκωσης (επικεφαλίδα με ένδειξη πρωτοκόλλου κλπ.) γιατί κάθε VC που εγκάθισται συνδέεται μονοσήμαντα με ένα τύπο πρωτοκόλλου ο οποίος εφαρμόζεται πάνω από την συγκεκριμένη σύνδεση (πολλαπλά πρωτόκολλα => πολλαπλές συνδέσεις). Στην περίπτωση της VC πολύπλεξης το PPP πακέτο ενθυλακώνεται στο πεδίο Data του CS πεδίου του πλαισίου AAL5, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

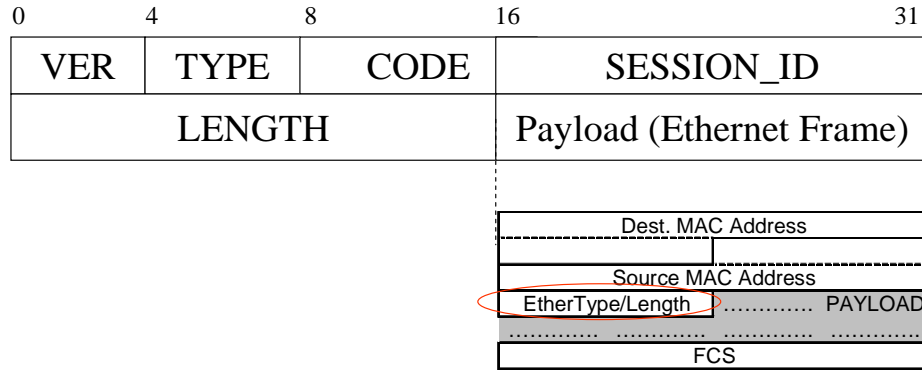


3.2.7.2 PPP πάνω από Ethernet (PPP over Ethernet - PPPoE)

Όπως είδαμε στην περίπτωση της ενθυλάκωσης PPPoATM ή διέλευση των δεδομένων πάνω από την ADSL γραμμή γίνεται μέσω ενός λογικού κυκλώματος SVC ή PVC. Στην περίπτωση που περισσότερες εφαρμογές ή τερματικά παράγουν δεδομένα και θέλουν να κάνουν χρήση της γραμμής, θα πρέπει να κάνουν χρήση διαφορετικών καναλιών. Η εγκατάσταση αυτών όμως απαιτεί λειτουργίες του στρώματος ATM, οι οποίες συνήθως δεν παρέχονται από το modem και τα τερματικά τα οποία συνηθέστερα υποστηρίζουν πρωτόκολλα τοπικών δικτύων όπως το Ethernet. Το PPPoE επιτρέπει εγκατάσταση πολλαπλών PPP «συνόδων» (PPP sessions) πάνω από τοπικά δίκτυα Ethernet και την πολύπλεξη τους πάνω από μία ADSL γραμμή. Προδιαγράφεται στην RFC 2364 προδιαγραφή. Υποστηρίζει 2 φάσεις:

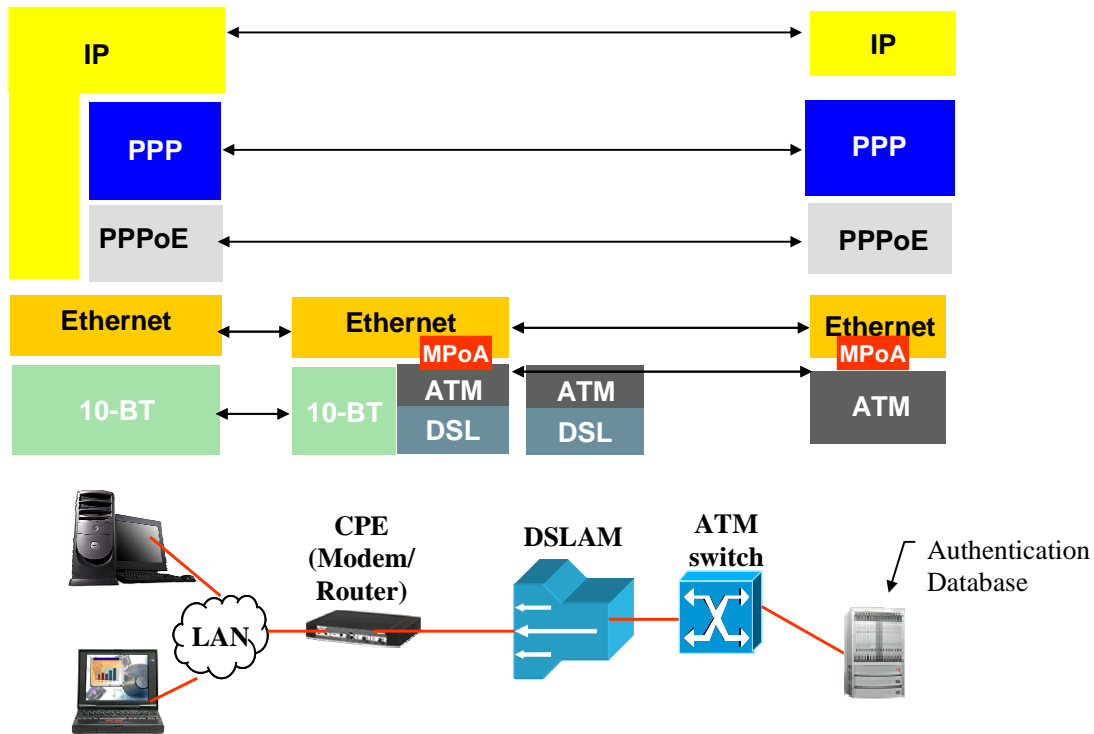
1. Discovery stage
 - Ανακαλύπτει τη διεύθυνση (Ethernet MAC address) του άκρου με το οποίο θα εγκατασταθεί ένα PPP session
2. Session stage.
 - Αποδίδει PPPoE session ID για το συγκεκριμένο PPP session και ενθυλακώνει κατά PPP.

Η ενθυλάκωση γίνεται με χρήση μίας επικεφαλίδας 6 οκτάδων η οποία έχει την δομή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



- **VER:** δηλώνει τον τύπο πρωτοκόλλου (PPPOE = 0x1)
- **TYPE:** για PPPOE = 0x1.
- **CODE:** Μηνύματα ένδειξης εξέλιξης φάσης και κατάστασης
 - ✓ Discovery stage
 - PPPoE Active Discovery Initiation (PADI): CODE=0x09
 - PPPoE Active Discovery Offer (PADO): CODE=0x07
 - PPPoE Active Discovery Request (PADR): CODE=0x19
 - PPPoE Active Discovery Session-confirmation (PADS): CODE=0x65
 - PPPoE Active Discovery Terminate (PADT): 0xa7
 - ✓ PPP Session stage: CODE=0x00
- **SESSION_ID:** Σταθερό αναγνωριστικό νούμερο για κάθε PPP session 1-1 αντιστοιχία με Ethernet SOURCE_ADDR & DESTINATION_ADDR.
 - ✓ 0xffff reserved (δεσμευμένο για μελλοντική χρήση - ΔΕΝ χρησιμοποιείται)
- **LENGTH:** Μήκος (οκτάδες) PPPoE payload (εκτός Ethernet & PPPoE headers).
- Τέλος το πεδίο **EtherType** της Ethernet επικεφαλίδας έχει τις δεσμευμένες τιμές:
 - ✓ 0x8863: discovery stage
 - ✓ 0x8864: PPP session stage

Η ευελιξία που παρέχει το PPPoE έγκειται στο ότι η στοίβα πρωτοκόλλων μπορεί να τρέχει στα τερματικά ανεξάρτητα από το ADSL modem. Έτσι δίνεται η δυνατότητα επιλογής υπηρεσίας πρόσβασης από τον ίδιο τον χρήστη/εφαρμογή. Ως εκ τούτου μία σύνδεση ADSL θα μπορούσε δυνητικά να εξυπηρετήσει πολλαπλούς συνδρομητές υποστηρίζοντας πρόσβαση ακόμα και σε διαφορετικούς παρόχους με ανεξάρτητες παραμέτρους (π.χ username/password, παραμέτρους ποιότητας και τιμολογίου κλπ.). Η στοίβα πρωτοκόλλων σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Η βασική διαδικασία που επιτρέπει τις παρακάτω λειτουργίες είναι αυτή της εγκατάστασης συνόδων και κατεπιλογήν σύνδεση με πάροχο υπηρεσίας κατά την φάση discovery stage . Η διαδικασία αυτή ομοιάζει με την διαδικασία επίλυσης ονομάτων στα τοπικά δίκτυα με χρήση του πρωτοκόλλου ARP (Address resolution) υποστηρίζοντας μια διαδικασία ανίχνευσης (request-response), Ο host που επιθυμεί να εγκαταστήσει PPP session εκπέμπει (broadcasts) ένα «session Initiation» πακέτο. Κάθε Initiation packet προκαλεί την απόκριση απο (πολλαπλούς ενδεχομένως) Access Concentrators. Ακολουθεί η εκπομπή ενός «unicast session request» προς τον επιλεγμένο Access concentrator. Ο Access concentrator επιβεβαιώνει (confirmation) και το session ID για το συγκεκριμένο session ανατίθεται. Η αναγνώριση των τερματικών και του κόμβου πρόσβασης γίνεται με την χρήση των διευθύνσεων Ethernet (MAC address).

4 ΠΑΡΑΛΛΑΓΕΣ DSL

4.1 ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DSL

Στα τέλη της δεκαετίας του `80 και στις αρχές της δεκαετίας του `90 υπήρξε ανάγκη για ανάπτυξη μιας τεχνολογίας συμμετρικής μετάδοσης, ώστε να απευθύνεται και να ικανοποιεί μικρομεσαίες επιχειρήσεις και πάνω από όλα να είναι οικονομική και αξιόπιστη. Η τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων που κάλυψε της ανάγκες αυτές ήταν HDSL, η οποία αποτέλεσε την 1^η γενιάς συμμετρική DSL τεχνολογία και μπορούσε να παρέχει ταχύτητες μέχρι και 2,3 Mbps, σε τρία όμως ζεύγη καλωδίων, πράγμα που έκανε την εφαρμογή του 3-pair HDSL αρκετά δαπανηρή και την εξάπλωση του συστήματος αυτού αρκετά προβληματική και οικονομικά ασύμφορη. Έτσι άρχισαν να εφαρμόζονται τα 1-pair HDSL και τα 2-pair HDSL συστήματα. Στην HDSL τεχνολογία η κωδικοποίηση που χρησιμοποιούνταν ήταν ίδια με αυτή των ISDN δηλαδή 2B1Q.

Τα HDSL συστήματα όμως αντιμετώπισαν προβλήματα όσον αφορά την απόσβεση και άρα την εμβέλεια τους. Το 1-pair HDSL με κωδικοποίηση 2B1Q είχε τόσο προβληματική απόδοση που οι Αμερικανικές εταιρείες τηλεπικοινωνίας δεν το απεδέχθησαν ως πρότυπο και ανάγκασαν την ANSI να προχωρήσει στην ανάπτυξη και προτυποποίηση μια καινούργιας γενιάς συμμετρικών DSL του HDSL2. Το HDSL2 είχε πιο ικανοποιητική απόδοση και κυρίως εμβέλεια από τις προγενέστερες συμμετρικές DSL τεχνολογίες, αλλά είχε ένα σημαντικό μειονέκτημα σε σχέση με τις προηγούμενες συμμετρικές τεχνολογίες, δεν υποστήριζε μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης. Έτσι δημιουργήθηκε η SDSL τεχνολογία η οποία μπορεί να υποστηρίξει μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, αλλά δεν καθιερώθηκε σαν πρότυπο αφού δεν οριζόταν ο τρόπος με τον οποίο θα καθόριζε το modem στο CO (Central Office) τους διάφορους ρυθμούς μετάδοσης με το modem που θα βρισκόταν εγκαταστημένο στην πλευρά του χρήστη.

Σε αυτήν την κατηγορία DSL εντάσσονται γενικότερα οι τεχνολογίες που προσφέρουν τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης και στα δύο ρεύματα. Έτσι αυτές οι τεχνολογίες είναι πιο αποδοτικές όταν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τοπικών δικτύων LANs (Local Area Network), video-conferencing και φιλοξενίας τοπικών web sites, τηλε-εκπαίδευσης, τηλεϊατρικής και τέλος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τηλε-εργασία που απαιτούν συμμετρική μετάδοση δεδομένων δηλαδή η ταχύτητα με την οποία κατεβάζει κάποιος (downstream) να είναι ίδια με την ταχύτητα που αποστέλλει (upstream). Για να είναι η ταχύτητα upstream και downstream ίδια απαιτείται να έχουν ίδιο εύρος ζώνης και για αυτό καλούνται συμμετρικά DSL. Στη συνέχεια περιγράφονται οι σπουδαιότερες συμμετρικές DSL τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

4.1.1 SDSL (Symmetric DSL)

Πρόκειται για μια εκδοχή του συμμετρικής DSL τεχνολογίας που βασίζεται ιδιωτικές τεχνολογίες των κατασκευαστών (οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν σε διάφορες παραλλάγες υπό τον γενικότερο όρο SDSL) και μπορεί να παρέχει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων από και προς τον χρήστη που κυμαίνονται από 128 kbps μέχρι 2.32 Mbps Στην SDSL τεχνολογία χρησιμοποιείται η διαμόρφωση 2B1Q του HDSL με διεπαφή τύπου Ethernet στο κομμάτι του χρήστη. Μειονέκτημα ως προς το SHDSL είναι ότι έχει μικρότερη εμβέλεια και αντοχή σε παρεμβολές. Γρηγορότερη παραλλαγή αυτών των τεχνικών οδήγησε στην καθιερωμένη ως πρότυπο τεχνολογία G.shdsl η οποία αναπτύχθηκε από την ITU με την υποστήριξη των T1E1.4 (USA) και ETSI (European Telecommunications Standards Institute), η οποία αναφέρεται στο τέλος της παρούσας ενότητας.

4.1.2 HDSL (High Data-Rate DSL)

Πρόκειται για ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 από την ETSI (ETR 152) και την ITU (ITU G.991.1). Η τεχνολογία HDSL αναπτύχθηκε για να ξεπεράσει τους περιορισμούς που έθεταν τα πρώτα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης (T1 και E1). Οι περιορισμοί αυτοί προϋπέθεταν μεταξύ άλλων μια μέγιστη απόσταση μεταξύ των επαναληπτών (repeaters) της τάξης των 6.000 feet και την κατάλληλη διαμόρφωση της γραμμής (line conditioning). Στα συστήματα αυτά το καλώδιο χαλκού χρειάζεται ειδική επεξεργασία, ώστε να καθίσταται δυνατή η ψηφιακή μετάδοση, διαδικασία η οποία χρειάζεται ειδικό εξοπλισμό και εξειδικευμένο προσωπικό με άμεσο επακόλουθο

την αύξηση του συνολικού κόστους. Έτσι η τεχνολογία HDSL ήρθε να αντικαταστήσει τα συστήματα αυτά παρέχοντας πιο συμφέρουσες –τεχνολογικά και οικονομικά– λύσεις εγκατάστασης δικτύων ταχείας μετάδοσης δεδομένων (high speed data transmission circuits).

Το σύστημα HDSL μπορεί να επιτύχει ρυθμούς μετάδοσης από 1.5 Mbps έως και 2.3Mbps αλλά δεν μπορεί να προσφέρει την τυπική τηλεφωνική υπηρεσία στην ίδια γραμμή. Στην τεχνολογία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν από 1 έως και 3 ζεύγη συνεστραμμένων χάλκινων καλωδίων. Όμως η απαίτηση που υπήρξε για εγκατάσταση 3 ζευγών καλωδίων (3-pair HDSL) αύξανε το κόστος εγκατάστασης και περιόριζε κατά πολύ την δυνατότητα εξάπλωσης της στην αγορά. Το κόστος που απαιτείτο για τοποθέτηση καινούργιων καλωδίων, εκμηδένιζε ουσιαστικά το βασικό πλεονέκτημα για το οποίο αναπτύχθηκαν τα DSL, δηλαδή το ότι δεν υπήρχε ανάγκη επανατοποθέτησης καλωδίων από τα CO στον καταναλωτή. Λόγω αυτού του αυξημένου κόστους είναι αρκετά περιορισμένος και ο αριθμός των πιθανών πελατών, άρα και το κέρδος από την ανάπτυξη αυτού του κομματιού της τεχνολογίας. Έτσι οι εταιρείες ανέπτυξαν δυο άλλα συστήματα τα 1-pair-HDSL και 2-pair-HDSL, τα οποία όντως ήταν πιο οικονομικά στην εγκατάσταση από το 3 pair-HDSL, αλλά αντιμετώπιζαν προβλήματα με την εμβέλεια, καθώς η απόσβεση που παρουσίαζαν αυτά τα συστήματα ήταν πολύ υψηλή και αρκετή για να τα κάνει αντιοικονομικά. Έτσι η ANSI οδηγήθηκε στην ανάγκη να προτυποποιήσει μια δεύτερη γενιά συμμετρικών συστημάτων DSL, τα HDSL2.

4.1.3 HDSL2 (2nd Generation HDSL)

Πρόκειται για ένα πρότυπο της ANSI παρόμοιο με το HDSL με μεγάλη όμως διάφορα ως προς το ότι για να επιτύχει τον ρυθμό μετάδοσης των 1.5Mbps το HDSL χρειάζεται 2 ζεύγη καλωδίων ενώ το HDSL2 χρειάζεται μόνο ένα ζεύγος. Το HDSL2 μας παρέχει σταθερό ρυθμό μετάδοσης 1.5Mbps και στις δύο κατευθύνσεις και χρησιμοποιεί κωδικοποίηση TC-PAM (Trellis-Coded PAM). Τέλος όπως και η HDSL έτσι και η HDSL2 δεν προσφέρει την standard τηλεφωνική υπηρεσία στην ίδια γραμμή. Το σύστημα αυτό είχε μεγαλύτερη εμβέλεια από όλα τα προηγούμενα συμμετρικά συστήματα, γεγονός που έκανε πιο εύκολη την διείσδυση και επικράτηση στην αγορά των συμμετρικών τεχνολογιών DSL. Ωστόσο δεν έλλειπαν ούτε από αυτό ορισμένα προβλήματα. Το βασικότερο πρόβλημα και αυτό που ουσιαστικά υπήρξε τροχοπέδη στην περαιτέρω εξάπλωση του HDSL2, ήταν ότι δεν μπορούσε να προσφέρει μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, ισοσκελίζοντας έτσι στον καταναλωτή τα διάφορα πλεονεκτήματα που προσέφερε ως προς την χαμηλή τιμή και την μεγάλη εμβέλειά του. Η δυσκολία που είχαν όλα τα HDSL συστήματα να ικανοποιήσουν τον καταναλωτή όσον αφορά το κόστος ή την εμβέλεια ή την απόδοση, οδήγησε τις εταιρείες να αναπτύξουν μια εντελώς νέα τεχνολογία στις συμμετρικές DSL στην οποία να περιλάβουν όλα τα πλεονεκτήματα που είχε κάθε μια από τις HDSL, όπως το χαμηλό κόστος εγκατάστασης, το μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, τη μεγάλη εμβέλεια, τη χαμηλή ισχύ εκπομπής και τέλος την αξιοπιστία στη μετάδοση δεδομένων και έτσι προτυποποίησαν ένα καινούργιο σύστημα το οποίο διέφερε αρκετό από τα προγενεστέρα, το SHDSL.

4.1.4 SHDSL (Single-pair High-bit-rate DSL)

Η παραλλαγή SHDSL αναφέρεται την σύσταση G.991.2 της ITU, γνωστή επίσης ως G.shdsl, και εγκεκριμένη από την ITU-T το Φεβρουάριο του 2001. Το σύστημα αυτό, ως

το πιο προηγμένο, έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συστήματα HDSL και SDSL τα οποία παραθέτουμε στη συνέχεια:

- Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης από τα 192Kbps μέχρι και τα 2.3Mbps όταν πρόκειται για ένα μόνο ζεύγος καλωδίων, και από 384Kbps έως και 4,64 Mbps όταν πρόκειται για 2 ζεύγη καλωδίων. Το G.shdsl προδιαγράφει λειτουργία πάνω από ένα ζεύγος καλωδίων, ή για λειτουργία σε μακρύτερους βρόγχους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ζεύγη. Για παράδειγμα, με δύο ζεύγη καλωδίου, 1.2 Mbps μπορούν να σταλούν σε απόσταση πάνω από 6,000 μέτρα μέσω ενός καλωδίου 26 AWG. Με 2 ζεύγη καλωδίων επιτυγχάνεται εμβέλεια της τάξης των 5Km. Η κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται στα SHDSL συστήματα είναι TC-PAM (Trellis Coded PAM).
- Ένα άλλο σημείο υπέρωσης του SHDSL έναντι των προγενέστερων συμμετρικών συστημάτων είναι η κατανάλωση ισχύος, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη, ακόμη και από το πρότυπο HDSL2 της ANSI. Ο λόγος ισχύος peak-RMS, ενώ στο HDSL2 είναι 4.0, στο SHDSL είναι μόλις 2.9. Ακόμη ένα παράδειγμα τις διαφορές που υπάρχει είναι ότι στα 2,048 Kbps η μέγιστη ισχύς εκπομπής για το HDSL2 είναι 16 dbm για το σύστημα SHDSL είναι 14,5 dbm για τον ίδιο ακριβώς ρυθμό μετάδοσης. Αυτό συνεπάγεται 20% καλύτερη πρόσβαση βρόγχου σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις της συμμετρικής DSL και προκαλεί πολύ λιγότερη συνακρόαση σε άλλα συστήματα εκπομπής πάνω στο ίδιο καλώδιο και μικρότερες παρεμβολές στα γειτονικά καλώδια, παραμένοντας πιο ευέλικτο και πιο «φιλικό» προς τα άλλα συστήματα.
- Τέλος η διαλειτουργικότητα μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών διευκολύνεται από τη καθιέρωση αυτής της τεχνολογίας ως πρότυπο.

Η SHDSL είναι καταλληλότερη για εφαρμογές μεταφοράς μόνο δεδομένων οι οποίες χρειάζονται υψηλό ρυθμό μεταφοράς προς το δίκτυο. Η χρήση των αναγεννητών (regenerators) για το σύστημα SHDSL είναι προαιρετική. Ενώ η SHDSL δεν μεταφέρει φωνή όπως η ADSL, νέες τεχνικές μεταφοράς φωνής πάνω από DSL μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να μεταφέρουν ψηφιοποιημένη φωνή και δεδομένα μέσω SHDSL (Voice-Over-DSL). Το σύστημα αυτό ως εκτούτου όπως και τα περισσότερα συμμετρικά DSL απευθύνεται κυρίως σε επιχειρήσεις και όχι σε απλούς χρήστες.

4.2 Μειονεκτήματα των συμμετρικών γραμμών DSL

Οι συμμετρικές γραμμές DSL μπορούν να πετύχουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σημαντικά μικρότερες από ασύμμετρες DSL γραμμές πάνω στον ίδιο βρόχο κυρίως διότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο θόρυβο διαφωνίας (crosstalk). Αν σε ένα κέντρο όλα τα modem είναι ίδιας υπηρεσίας xDSL, π.χ. μόνο ADSL modem, τότε δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα γιατί ο πομπός μιας γραμμής δεν δημιουργεί θόρυβο σε δέκτη κάποιου άλλης γραμμής ίδιας υπηρεσίας DSL δεδομένου ότι λειτουργούν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων. Κάτι τέτοιο θα ήταν μια ιδανική κατάσταση, αλλά στην πράξη πολλά modem ADSL, SDSL, HDSL βρίσκονται μαζί και επειδή δεν έχουν όλα τις ίδιες συχνότητες εκπομπής και λήψης είναι δυνατό η μία συχνότητα εκπομπής ενός DSL modem να είναι συχνότητα λήψης κάποιου άλλου DSL modem άλλης υπηρεσίας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ο θόρυβος NEXT. Ο θόρυβος NEXT είναι πολύ

μεγαλύτερος σε ισχύ και ουσιαστικά είναι αυτός που δημιουργεί τα περισσότερα προβλήματα στις DSL γραμμές.

Το πρόβλημα στις συμμετρικές γραμμές DSL είναι ότι οι παρεμβολές λόγω (πάρα)διαφωνίας (παρεμβολές NEXT) είναι πιο μεγάλος στις υψηλές συχνότητες μετάδοσης από ότι είναι στις πιο χαμηλές συχνότητες. Έτσι δεν υπάρχει η δυνατότητα που υπάρχει στις ασύμμετρες να περιορίσουμε το φάσμα λήψης του κέντρου (upstream) στις πιο ανεκτικές στις παρεμβολές NEXT χαμηλές συχνότητες. Όσο για την άλλη κατεύθυνση προς τους συνδρομητές (downstream) δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα σχετικά με παρεμβολές NEXT, γιατί δεν υπάρχει κανένα άλλο modem εκεί κοντά. Δηλαδή οι υψηλές συχνότητες που είναι πιο ευαίσθητες στις παρεμβολές NEXT χρησιμοποιούνται για το κανάλι προς τους συνδρομητές (downstream) καθώς ο δεκτής του συνδρομητή δεν αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω NEXT και οι χαμηλές στο κανάλι upstream που είναι γενικά πιο ανεκτικές στις παρεμβολές NEXT. Έτσι μπορεί μόνο να εξηγηθούν οι μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε ίδιες αποστάσεις και γραμμές εν συγκρίσει με άλλες συμμετρικές τεχνολογίες DSL. Βέβαια υπάρχουν διάφορες άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούμε στις συμμετρικές γραμμές για να περιορίσουμε τον

Μια από τις τεχνικές που χρησιμοποιούμε και βελτιώνει κάπως το όλο πρόβλημα στις συμμετρικές γραμμές DSL ονομάζεται καταστολή ηχούς (echo cancellation). Ουσιαστικά ισχύει ότι αφού ο δεκτής ξέρει την κυματομορφή του μεταδιδόμενου συστήματος μπορεί με διάφορες τεχνικές να αφαιρέσει το μεταδιδόμενο σήμα από τα υπόλοιπα σήματα που παρεμβάλλονται στην γραμμή. Έτσι καταφέρνει να καθαρίσει το επιθυμητό σήμα και να πετύχει μικρότερη πιθανότητα σφάλματος (BER) και άρα μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης αλλά παρόλα αυτά οι συμμετρικές DSL γραμμές υστερούν κατά πολύ σε ταχύτητα σε σχέση με τις ασύμμετρες DSL γραμμές.

4.3 ΑΣΥΜΜΕΤΡΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DSL

4.3.1 ADSL

Η τεχνολογία ADSL γνώρισε την ευρύτερη εξάπλωση μέχρι σήμερα και εξυπηρέτησε ένα μεγάλο πλήθος συνδρομητών με καλής ποιότητας υπηρεσίες στις περισσότερες περιπτώσεις. Η τεχνολογία ADSL μεταφράζεται ως Asymmetric Digital Subscriber Line ([6]), δηλαδή ασύμμετρη ψηφιακή συνδρομητική γραμμή και όπως όλες οι τεχνολογίες xDSL χρησιμοποιεί τις υπάρχουσες τηλεφωνικές γραμμές για μεταφορά υπηρεσιών πολυμέσων (multimedia) και δεδομένων με υψηλή ταχύτητα, παράλληλα με τη χρήση της γραμμής για απλή μετάδοση φωνής. Ο χαρακτηρισμός της ασύμμετρης μετάδοσης προκύπτει από τις διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης που επιτυγχάνονται στις δύο κατευθύνσεις της γραμμής (downstream, upstream) λόγω της ασύμμετρης κατανομής του φάσματος στις δύο αυτές κατευθύνσεις (όπως ήδη αναφέρθηκε και στο Σχήμα 7). Έχοντας σαν δεδομένο ότι η πλειοψηφία, αν όχι όλοι, των χρηστών του διαδικτύου (Internet) έχουν την τάση να αναζητούν και να «κατεβάζουν» (download) πολύ περισσότερο από το να διαθέτουν προς άλλους και να «ανεβάζουν» (upload) πληροφορίες προς αυτό, δηλαδή το κανάλι προς τους συνδρομητές (downstream) είναι μεγαλύτερο από το αντίθετης ροής (upstream), ήταν λογικό να αναζητηθεί μία υπηρεσία που θα ανταποκρινόταν σε αυτό το χαρακτηριστικό. Η ADSL λειτουργεί ταυτόχρονα με το τηλεφωνικό δίκτυο, χωρίς να προκαλεί οποιοδήποτε πρόβλημα. Τυπικές εφαρμογές των ADSL γραμμών είναι η παρεχόμενη γρήγορη πρόσβαση σε δίκτυα Internet / Intranet,

η σύνδεση απομακρυσμένων LANs και οι υπηρεσίες video on demand. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν μεγάλη ταχύτητα downstream σε σχέση με την ταχύτητα upstream.

Για να γίνει δυνατή η μετάδοση των πληροφοριών, το modem χωρίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας γραμμής με δύο τρόπους, είτε με FDM (Frequency Division Multiplexing) είτε με echo cancellation. Η FDM λειτουργεί ως εξής μια συχνότητα διατίθεται για τα δεδομένα προς τον χρήστη (downstream) και μια συχνότητα διατίθεται για δεδομένα από τον χρήστη (upstream). Το κανάλι που χρησιμοποιείται για downstream χωρίζεται επίσης σε κανάλια μικρότερου εύρους. Η echo cancellation επιβάλλει στο upstream κανάλι να επικαλύψει (overlap) το downstream κανάλι και τα ξεχωρίζει χρησιμοποιώντας local echo cancellation. Και με τις δυο αυτές μεθόδους η συχνότητα μέχρι τα 4kHz διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες, ώστε να χρησιμοποιείται για μετάδοση σήματος φωνής για απλή τηλεφωνική χρήση.

Η μετάδοση από το δίκτυο στον χρήστη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους είναι το μήκος της γραμμής, η διάμετρος του καλωδίου της γραμμής, η ύπαρξη των λεγόμενων bridged taps στην γραμμή και η παρεμβολές διαφωνίας. Η απόσβεση της γραμμής αυξάνεται ανάλογα με το μήκος της γραμμής και με τη συχνότητα μετάδοσης, ενώ μειώνεται όσο αυξάνει η διάμετρος του καλωδίου. Οι ADSL γραμμές έχουν την δυνατότητα να επιτύχουν ταχύτητες μέχρι τα 6 Mbps για downstream και μέχρι τα 640 Kbps και για τις δυο κατευθύνσεις. Όπως είδαμε στην ενότητα 2.2 εκτός από το ζεύγος καλωδίων για να παρέχουμε ADSL υπηρεσίες χρειάζονται δυο συσκευές modem και δυο διαχωριστές (splitter) τοποθετημένα στην αρχή της γραμμής και στο τέλος της γραμμής αντίστοιχα. Ο ρόλος του διαχωριστή όπως εξηγήθηκε είναι ο διαχωρισμός του καναλιού της φωνής το οποίο μπορεί να δρομολογηθεί ως υπηρεσία φωνητικής κλήσης από τα πρϋπάρχοντα τηλεφωνικά δίκτυα (POTS) και απλές τηλεφωνικές συσκευές και μέσω των κλασικών τηλεφωνικών κέντρων. Τα ADSL modem με το που εγκαθίστανται στην γραμμή αυτομάτως αναγνωρίζουν την χωρητικότητα της γραμμής και διασυνδέονται μεταξύ τους. Με το που γίνεται η διασύνδεση των δυο modem, η διαδικασία μέτρησης της χωρητικότητας της γραμμής συνεχίζεται για όλη της διάρκεια της και καθώς γίνονται συνεχείς αλλαγές. Τα modem αυτά έχουν προηγμένη τεχνολογία επεξεργασίας ψηφιακού σήματος DSP (Digital Signal Processing) και αλγόριθμους διόρθωσης σφαλμάτων που δημιουργούνται κατά την μετάδοση. Παρόλα αυτά υπάρχει μια εξισορρόπηση μεταξύ απόδοσης και απόστασης, δηλαδή όσο υψηλότερη ταχύτητα που απαιτείται τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η απόσταση μεταξύ των modem διασύνδεσης. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απαιτούμενη απόσταση των δύο modem είναι η διάμετρος του καλωδίου που χρησιμοποιείται και το μέγεθος του θορύβου που παρεμβάλλεται στην γραμμή.

4.3.1.1 Πλαίσια δεδομένων και ρυθμοί μετάδοσης

Τα ADSL modem υποστηρίζουν ταχύτητες μετάδοσης γύρω στα 1544 kbps στην Βόρεια Αμερική και 2048 kbps στην Ευρώπη σύμφωνα με τις ψηφιακές ιεραρχίες T1 και E1 που υπάρχουν αντίστοιχα σε Αμερική και Ευρώπη. Βέβαια μπορούν να υποστηριχθούν και άλλες ταχύτητες τις οποίες περιλαμβάνει ο Πίνακας 2. Η βασική τεχνική που ακολουθείται είναι ο διαχωρισμός υπο-καναλιών για τα κανάλια προς και από τους συνδρομητές (Downstream/Upstream) τα αποκαλούμενα AS0 - AS3 και LS0 - LS2 αντίστοιχα με σύνθεση των οποίων προκύπτουν οι ονομαζόμενες κλάσεις υπηρεσιών με αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης. Τα κανάλια AS αποδίδουν ρυθμούς πολλαπλάσιους των 32Kbps. (με μέγιστο ρυθμό για το AS0 = 6144 kbit/s, για το AS1=4608 kbit/s για το AS2=3072kbit/s και για το AS3 = 1536 kbit/s) ενώ τα LS αντιστοιχούν σε ρυθμούς

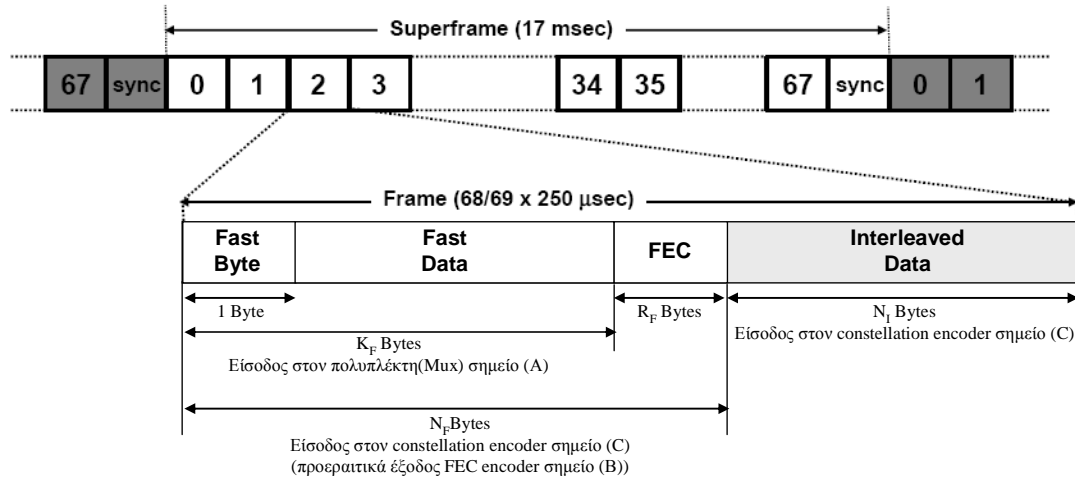
πολλαπλάσιους του 160Kbps (με μέγιστη χωρητικότητα 640Kbps το κάθε ένα). Όπως δείχνει και ο Πίνακας 2 η κλάση 1 μπορεί να παρέχει μέχρι και 4 κανάλια AS και έως 6.144Mbps Upstream συνολικά και έως 3 κανάλια LS ή έως 640Kbps Downstream συνολικά, ενώ η τελευταία κλάση μόνο ένα κανάλι ανά κατεύθυνση (AS0/LS0) με μέγιστο ρυθό 1536 Kbps/640 Kbps αντίστοιχα

Transport Class	1	2	3	4
Down-stream simplex				
Maximum Capacity	6.144 Mb/s	4.608 Mb/s	3.072 Mb/s	1.536 Mb/s
Channel options	1.536 Mb/s 3.072 Mb/s 4.608 Mb/s 6.144 Mb/s	1.536 Mb/s 3.072 Mb/s 4.608 Mb/s	1.536 Mb/s 3.072 Mb/s	1.536 Mb/s
Duplex				
Maximum Capacity	640 kb/s	4.608 Mb/s	3.072 Mb/s	1.536 Mb/s
Channel options	576 kb/s 384 kb/s 160 kb/s 64 kb/s	384 kb/s 160 kb/s 64 kb/s	160 kb/s 64 kb/s	160 kb/s 64 kb/s
The "C" channel				

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές τιμές ρυθμών μετάδοσης modem ADSL

Όπως σε κάθε ψηφιακή τεχνική μετάδοσης δεδομένων υπάρχουν οι μηχανισμοί εκείνοι οι οποίοι εξασφαλίζουν τον συγχρονισμό και την ακέραιη λήψη της ψηφιακής πληροφορίας καθορίζοντας την φόρμα των πλαισίων στα οποία αυτή καταχωρείται και τα οποία μεταδίδονται πάνω από την γραμμή DSL. Η δομή των πλαισίων στην ADSL ακολουθεί μια ιεραρχία σε συνάρτηση με τον συγχρονισμό και διαμορφώνεται σε δύο επίπεδα:

- Υπερπλαίσια (Superframes): Αποτελούν το υψηλότερο επίπεδο της δομής και επαναλαμβάνονται κάθε 17 ms. Κάθε superframe περιλαμβάνει 68 ADSL frames κάθε ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται για συγχρονισμό και εντοπισμό της αρχής και του τέλους του υπερπλαισίου, ενώ ορισμένα έχουν ειδική χρήση.
- Πλαίσια (Frames): Έχουν διάρκεια 250ms και ενώ η χρονική ακολουθία μεταξύ διαδοχικών πλαισίων παραμένει σταθερή το περιεχόμενό τους μπορεί να διαφέρει τόσο κατά μέγεθος όσο και κατά το είδος της πληροφορίας που μεταφέρει, ανάλογα με το την μέθοδο μετάδοσης (transport mode)



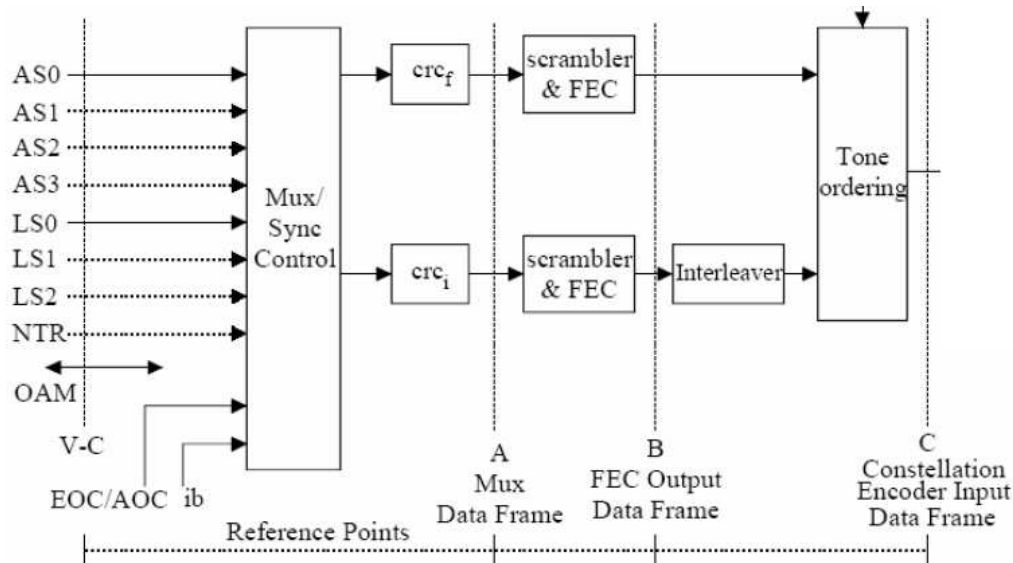
Σχήμα 14: Υπερπλαίσια και πλαίσια ADSL

Και τα δύο είδη πλαισίων μεταφέρουν ενδείκτες συγχρονισμού της πληροφορίας και υποστηρίζουν τη δομή σχηματισμού καναλιών μεταβλητών ρυθμών που αναφέρθηκε προηγουμένως. Σε επίπεδο ψηφιακής πληροφορίας της εφαρμογής/χρήστη η ρυθμός μετάδοσης συμβόλων είναι 4000 baud (1 symbol/250μs) αλλά λόγω της εισαγωγής πλεονάζουσας πληροφορίας συγχρονισμού ο τελικός ρυθμός μετάδοσης στη γραμμή αντιστοιχεί σε $69/68 \times 4000$ baud.

Η δομή ενός πλαισίου ADSL έχει κάποια σταθερά χαρακτηριστικά και αποτελείται από δύο γενικά τμήματα:

- Το τμήμα ταχείας μετάδοσης δεδομένων (fast data). Όπως δηλώνει και το όνομά του επιτρέπει την μετάδοση δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση και υποδιαιρείται σε τρία τμήματα:
 - Η αρχική οκτάδα συγχρονισμού (fast byte): Ανάλογα με την θέση του πλαισίου στο υπερπλαίσιο έχει και διαφορετική χρήση.
 - Τα δεδομένα (fast data): Περιλαμβάνουν δεδομένα εφαρμογών με απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης όπως π.χ. οι εφαρμογές πολυμέσων, τα οποία επιπλέον δεν προβλέπεται να επιτρέπουν και αναμετάδοση σε περίπτωση εσφαλμένης μετάδοσης. Για την ταχύτερη μετάδοση χωρίς εισαγωγή επιπλέον καθυστέρησης δεν γίνεται διεμπλοκή (interleaving) κατά την αποστολή.
 - Λόγω της ανάγκης ταχείας μετάδοσης για την μείωση της πιθανότητας σφαλμάτων κατά τη λήψη μπορεί (προαιρετικά) να εφαρμοσθεί κώδικας ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (forward error correction - FEC)
- Το τμήμα μετάδοσης δεδομένων με διεμπλοκή (interleaved data). Μεταφέρει δεδομένα εφαρμογών έχοντας χρησιμοποιήσει την τεχνική της διεμπλοκής (interleaving) αποστέλλοντας τμήματα από μακρύτερες ακολουθίες ψηφίων για καλύτερη αντιμετώπιση του θορύβου και μείωση της πιθανότητας σφάλματος με κόστος την μεγαλύτερη καθυστέρηση για την ανασύνθεση της αρχικής πληροφορίας στον δέκτη.

Η συσχέτιση των ροών πληροφορίας και των καναλιών στα διάφορα στάδια εκπομπής ενός συστήματος ADSL για τον σχηματισμό των πλαισίων εκπομπής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



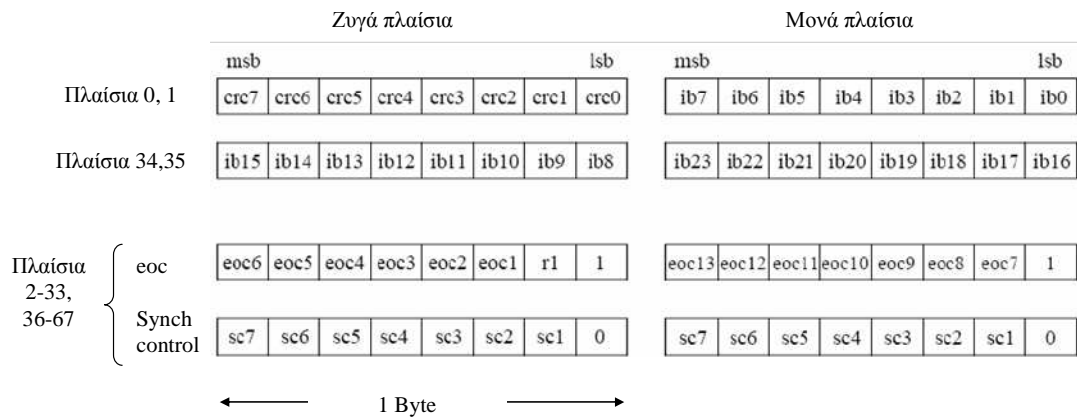
Σχήμα 15: Κανάλια και ροές πληροφορίας για την παραγωγή πλαισίων ADSL

Λόγω της εισαγωγής πλεονάζουσας πληροφορίας όταν υλοποιείται κώδικας ελέγχου σφαλμάτων (FEC) και όταν υλοποιείται διεμπλοκή (data interleaving) τα παραγόμενα πλαίσια δεδομένων (πριν το στάδιο της κωδικοποίησης των σημείων του αστερισμού – constellation encoding – του κυκλώματος διαμόρφωσης) έχουν διαφορετική μορφή στα σημεία αναφοράς που απεικονίζονται στο Σχήμα 15. Τα τρία σημεία αναφοράς προσδιορίζουν τα παρακάτω:

- A. (Mux data frame): Τα δεδομένα από πολύπλεξη των καναλιών και μετά την υλοποίηση πλεονασματικού κώδικα ελέγχου σφαλμάτων (Cyclic Redundancy Check – CRC) παραγόμενα με ονομαστικό ρυθμό 4 kbaud (κάθε 250 μ s)
- B. (FEC output data frame): Τα δεδομένα στην έξοδο του κυκλώματος υλοποίησης κώδικα διόρθωσης σφαλμάτων. Παράγονται στον ρυθμό μετάδοσης συμβόλων της γραμμής και στην περίπτωση διεμπλοκής το σχετικό πεδίο που καταχωρείται ο κώδικας FEC αφορά πλήθος συμβόλων πέραν της μίας περιόδου
- C. (constellation encoder input data frame): Τα δεδομένα στην είσοδο του κυκλώματος κωδικοποίησης των σημείων του αστερισμού – constellation encoding – του κυκλώματος διαμόρφωσης

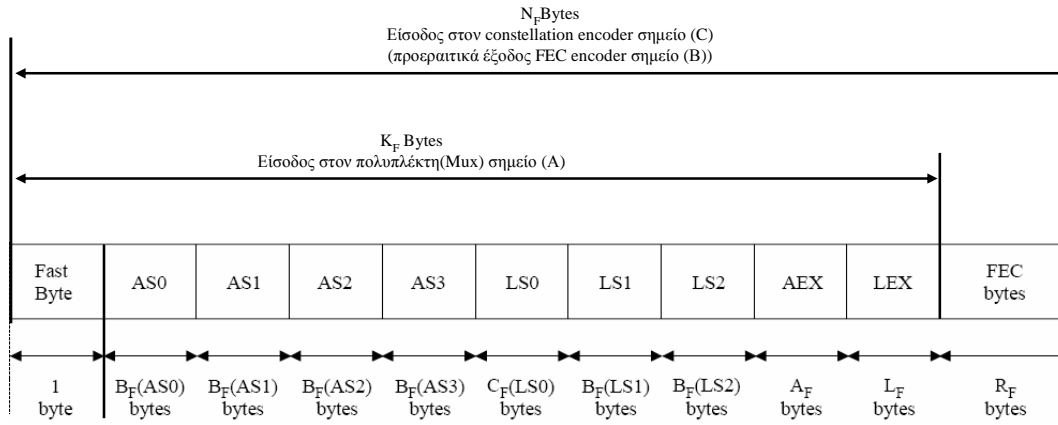
Τα 68 πλαίσια που περιέχονται στο υπερπλαίσιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως το να μεταφέρουν δεδομένα εφαρμογής, για τον συγχρονισμό των υπερπλαisiών καθώς και λειτουργίες διαχείρισης της γραμμής. Ο συγχρονισμός των υπερπλαisiών μπορεί να επιτευχθεί, όταν τα πλαίσια αντί για άλλα δεδομένα μεταφέρουν μία συμβολοσειρά συγχρονισμού. Η χρήση της πρώτης οκτάδας (fast byte) στα πλαίσια ταχείας μετάδοσης έχει τα ακόλουθα περιεχόμενα:

- Στο πλαίσιο 0 μεταφέρει το αποτέλεσμα του ελέγχου CRC για τον έλεγχο σφαλμάτων σε επίπεδο υπερπλαισίου
- Στα πλαίσια 1, 34 και 35 μεταφέρουν ενδείκτες (indicator bits, ib) σηματοδοσίας γραμμής, που περιλαμβάνουν μηνύματα όπως:
 - i. Far end block error (FEBE) που σηματοδοτεί σφάλμα λήψης το οποίο εντοπίζεται με τον έλεγχο του πεδίου CRC
 - ii. Far end correction code (FECC) που σηματοδοτεί σφάλμα/διόρθωση λήψης το οποίο εντοπίζεται με τον έλεγχο του πεδίου FEC.
 - iii. Loss of signal (LOS) που σηματοδοτεί (σε στάθμη λογικού 0) σφάλμα λήψης ή χαμηλή ενέργεια του σήματος πιλότου (σε στάθμη λογικού 1 δείχνει συγχρονισμό)
 - iv. Remote defect indication (RDI) που σηματοδοτεί λήψη με πολλαπλά σφάλματα (severely errored frames, SEF). Η ένδειξη SEF υποδηλώνει την λήψη τουλάχιστον δύο διαδοχικών υπερπλαισίων με σφάλματα
- Στα υπόλοιπα πλαίσια 2-33 και 36-67 μεταφέρονται δεδομένα χαμηλής καθυστέρησης, που εμπεριέχουν και τα δεδομένα του καναλιού ελέγχου για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου EOC (μονά πλαίσια) και συγχρονισμού (σε ζυγά πλαίσια)



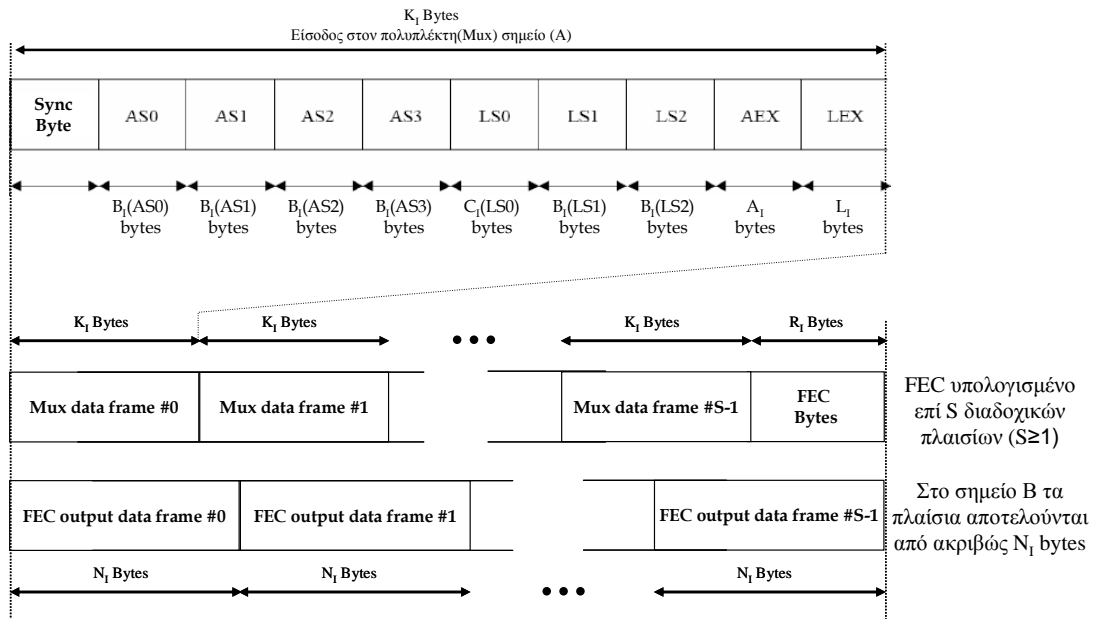
Σχήμα 16: Δομή πεδίου Fast Byte

Αναλυτικότερα η δομή του υπερπλαισίου και τα περιεχόμενα των πλαισίων που μεταφέρει απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα, όπου φαίνεται και η κατανομή των πλαισίων στα κανάλια προς και από τον χρήστη (downstream AS/upstream LS). Τα κανάλια AEX και LEX αποτελούν προεκτάσεις και χρησιμοποιούνται απο κοινού το μεν AEX από τα κανάλια AS και το δε LEX τόσο από τα AS όσο και από τα LS.



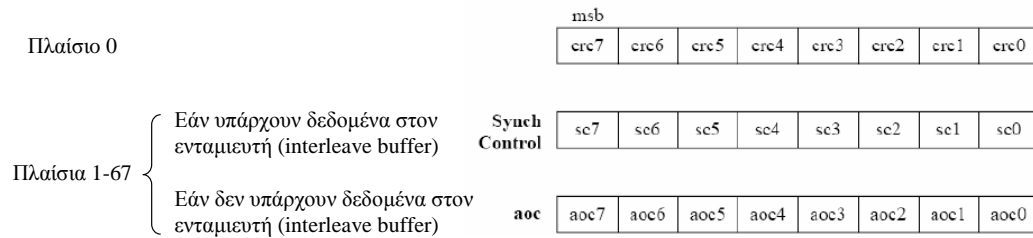
Σχήμα 17: Δομή πλαισίου Fast Data

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια η διαδικασία σχηματισμού πλαισίων με διεμπλοκή (Inteleaved Data). Στο σχήμα φαίνεται η δομή των συγκεκριμένων πλαισίων στα σημεία αναφοράς A (προ FEC) και B (μετά FEC), ενώ δεν φαίνεται το σημείο C. Προφανώς η διαδικασία αυτή είναι πιο πολύπλοκη καθώς απαιτεί την χρήση ενδιάμεσης μνήμης για την αποθήκευση των δεδομένων και τον υπολογισμό του κώδικα FEC επί S συνολικά διαδοχικών πλαισίων του υπερπλαισίου.



Σχήμα 18: Δομή πλαισίου Interleaved Data

Η αρχική οκτάδα συγχρονισμού (sync byte) είτε μεταφέρει το αποτέλεσμα του κώδικα CRC του πλαισίου 0 του προηγούμενου υπερπλαισίου, οπότε χρησιμοποιείται για συγχρονισμό των υπερπλαισίων ή μεταφέρει πληροφορία ελέγχου του πρωτοκόλλου AOC, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 19: Δομή πεδίου Sync Byte

4.3.1.2 Τεχνικές διαμόρφωσης στην τεχνολογία ADSL

Το ωφέλιμο εύρος ζώνης ενός ζεύγους καλωδίων χαλκού είναι αρκετά μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης της φωνής, άρα με τα ADSL γίνεται ουσιαστικά εκμετάλλευση του εύρους αυτού που δεν μπορούσε ή δεν ήταν ανάγκη να γίνει μέχρι σήμερα. Παρακάτω αναλύεται ακριβώς ο τρόπος αυτός μετάδοσης που χρησιμοποιεί η τεχνολογία ADSL. Για την ADSL είχαν αρχικά προταθεί δυο είδη διαμόρφωσης, η CAP (Carrierless Amplitude-Phase modulation) και η DMT (Discrete Multi-Tone), καθεμία από τις οποίες είχε τα πλεονεκτήματά της. Ωστόσο η αγορά τελικά έδωσε απάντηση στο αρχικό ερώτημα ποια από τις δύο είναι η καλύτερη. Αρχικά η CAP είχε επικρατήσει, καθώς τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ήταν έτοιμα σε ποσότητες ικανές να καλύψουν την ζήτηση και με ένα πολύ ισχυρό πλεονέκτημα ότι ήδη λειτουργούσαν. Ένας μεγάλος αριθμός από προϊόντα που χρησιμοποιούσαν αυτά τα κυκλώματα αρχικά εγκαταστάθηκαν από τους παροχείς σε διάφορα σημεία που είχαν ζητήσει την παροχή αυτών των υπηρεσιών. Τέθηκαν όμως ζητήματα προτύπων και συμβατότητας (συλλειτουργίας) μεταξύ πωλητών και υλοποιήσεων. Η DMT από την άλλη βρισκονταν στην μάχη των προτύπων για αρκετό καιρό πριν εμφανιστεί η CAP στην αγορά και συνέχισε να εξελίσσεται. Κάποια στιγμή θεωρήθηκε ως πρότυπο από ένα μεγάλο αριθμό παροχέων υπηρεσιών. Η τεχνολογία αυτή χαρακτηριζόταν αρχικά από μερικές καινοτομίες, οι οποίες δεν άνηκαν αρχικά στα χαρακτηριστικά όπως Rate Adaption (κάθε στιγμή ο ρυθμός μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν στην γραμμή), ενώ από την άλλη τα ολοκληρωμένα κυκλώματα τα οποία ακολουθούν αυτό το πρότυπο άργησαν κατά πολύ να βρουν το δρόμο τους για την αγορά. Τελικά η λύση δόθηκε από την ίδια την αγορά και για τα ADSL επικράτησε η διαμόρφωση DMT η οποία περιελήφθη στο πρότυπο της ITU-T ITU G.992.1 (επίσης γνωστό και ως G.DMT) ([13]).

4.3.1.2.1 Διαμόρφωση CAP

Η διαμόρφωση CAP είναι παραλλαγή μιας παλαιότερης και καθιερωμένης μορφής διαμόρφωσης, της QAM (Quadrature amplitude modulation), η οποία χρησιμοποιεί δυο υψίσυχνα διαμορφωμένα φέροντα ίδιας συχνότητας, αλλά με μια διάφορα φάσης κατά 90°. Τα φέροντα διαμορφώνονται κατά πλάτος ανεξάρτητα για να μεταφέρουν την πληροφορία του σήματος. Αντίθετα με την DMT δεν αναπροσαρμόζεται στο βέλτιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων για τις επικρατούσες συνθήκες της γραμμής. Πρόσφατες εξελίξεις ωστόσο έχουν οδηγήσει σε υλοποιήσεις και των δυο συστημάτων τα οποία μπορούν να δουλεύουν σε μια μεταβλητού ρυθμού λειτουργία, την RASL λειτουργία.

4.3.1.2.2 Διαμόρφωση DMT

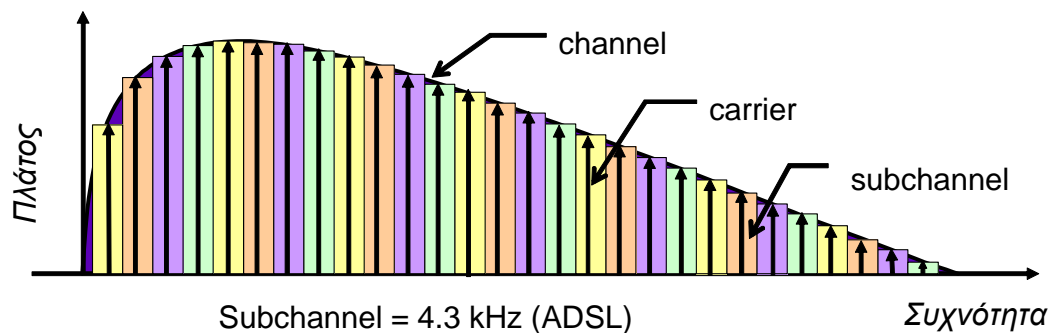
Ο τρόπος που λειτουργεί η DMT είναι ο εξής: για να μεταδοθεί η πληροφορία σε όλο το φάσμα του καλωδίου, το συνολικό εύρος ζώνης διαιρείται σε μικρότερα κανάλια

μεγέθους περίπου 4 kHz το καθένα και σε αυτά μεταδίδεται χωριστά κάθε ένα κομμάτι της πληροφορίας που είναι προς μετάδοση. Κάποια από αυτά μένουν αχρησιμοποίητα (π.χ., τα πρώτα 6 – χώρος για την αναλογική μετάδοση φωνής). Η αξιοποίηση του κάθε υπο-καναλιού εξαρτάται από την ποιότητα του βρόχου (μήκος, ύπαρξη συνδετήρων κλπ.) και τον εξωτερικό θόρυβο (interference – ραδιοσυχνότητες κλπ.). Η τεχνική αυτή αποτελεί το ισοδύναμο λειτουργίας 256 (το μέγιστο πλήθος) παράλληλων modems. Στην DMT ένα από τα κανάλια παίζει τον ρόλο του συντονιστή-ελεγκτή.

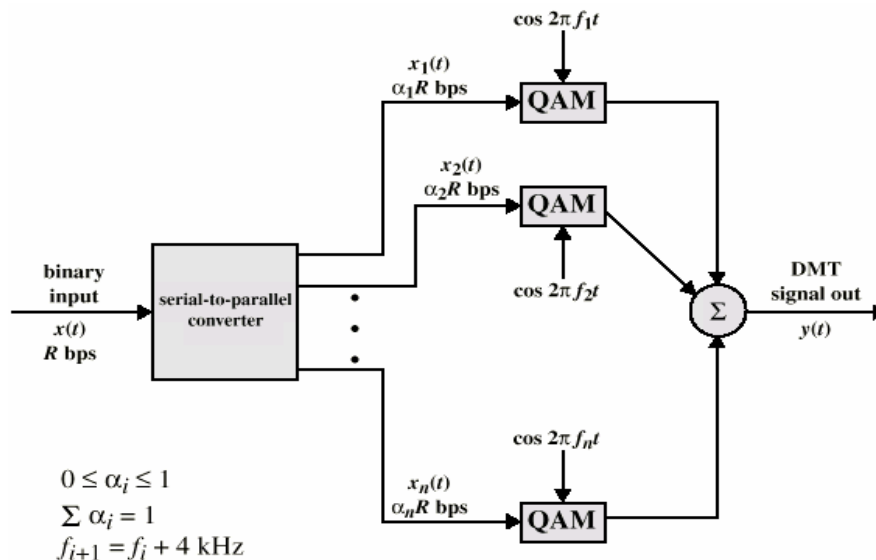
Τα κανάλια στα οποία υποδιαιρείται το συνολικό εύρος ζώνης έχουν εύρος ακριβώς 4,3125 kHz το καθένα και χρησιμοποιούνται συνολικά 256 κανάλια, δηλαδή το συνολικό εύρος ζώνης μια γραμμής ADSL είναι περίπου:

$$256 * 4,3125 = 1,104\text{MHz}$$

Κάθε κανάλι χρησιμοποιεί ένα φέρον ημίτονο στο μέσο του εύρους ζώνης του και το οποίο είναι διαμορφωμένο κατά QAM. Όλα τα κανάλια έχουν το ίδιο εύρος ζώνης και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για όλα τον ίδιο ρυθμό μετάδοσης σύμβολων ο οποίος είναι στα 4 kHz, όπως φαίνεται στο διάγραμμα Σχήμα 20.



(α) Κατανομή φάσματος



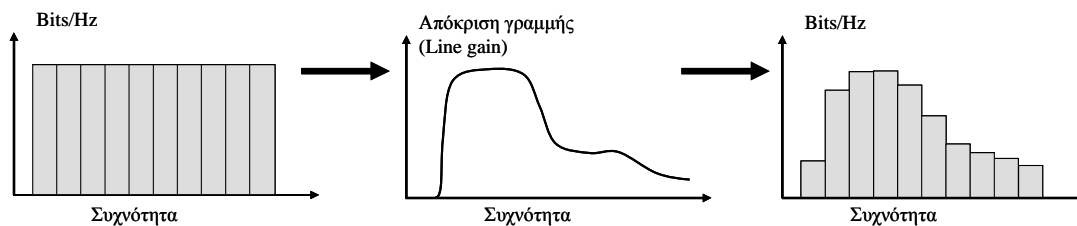
(β) Μπλοκ διάγραμμα διαμορφωτή DMT

Σχήμα 20: Τεχνική διαμόρφωσης DMT

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δεν χρησιμοποιούνται και τα 256 κανάλια για την μετάδοση πληροφορίας. Το πρώτο κανάλι, το οποίο είναι περίπου μέχρι τα 4 kHz, δεν

χρησιμοποιείται από το ADSL, αλλά είναι ελεύθερο και διαχωρίζεται από τον splitter για να χρησιμοποιηθεί για το απλό τηλεφωνικό σήμα, το οποίο πρέπει να είναι ανεξάρτητο από το υπόλοιπο ADSL σύστημα, ώστε σε περίπτωση διακοπής της μετάδοσης ADSL λόγω κάποιου προβλήματος να είναι δυνατή η τηλεφωνική σύνδεση. Εκτός από το πρώτο κανάλι στην DMT που μένει αχρησιμοποίητο δεν χρησιμοποιούνται για μετάδοση πληροφορίας και τα επόμενα 4 κανάλια τα οποία χρησιμοποιούνται ως ζώνη προστασίας (guardband). Έτσι για την μετάδοση της πληροφορίας μένει να χρησιμοποιηθούν τα υπόλοιπα κανάλια από το 6 και μετά. Έτσι για μετάδοση δεδομένων από τον χρήστη στο δίκτυο χρησιμοποιούνται τα επόμενα 32 κανάλια (upstream) και από το δίκτυο στο χρήστη χρησιμοποιούνται 218 κανάλια (downstream). Ένας αριθμός από κανάλια δεν χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφορίας αλλά για να συντονίζει την μετάδοση και για να εκτελεί διάφορες άλλες απαραίτητες εργασίες.

Τέλος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 20 αν και ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων είναι σταθερός και καθορίζεται από το εύρος ζώνης των υπο-καναλιών (4KHz αποδίδουν 4Kbaud), ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας, που επιτυγχάνεται σε κάθε κανάλι δεν είναι απαραίτητα ο ίδιος. Η διαδικασία που προβλέπεται από την τεχνική DMT είναι η κωδικοποίηση σε σύμβολα σε κάθε υπο-κανάλι να γίνεται ανεξάρτητα και ανάλογα με την φασματική απόκριση της γραμμής. Η διαδικασία αυτή παριστάνεται και στο Σχήμα 21, όπου παριστάνεται ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται ανά υπο-κανάλι έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη μετάδοση ανάλογα με την εξασθένιση της γραμμής σε κάθε περιοχή του φάσματος. Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας είναι ευθέως ανάλογος του πλήθους των ψηφίων που επιλέγεται να απαρτίζουν το σύμβολο σε κάθε υπο-κανάλι, όπως θα συζητηθεί και στη συνέχεια στην αναλυτικότερη αναφορά στην διαμόρφωση QAM.

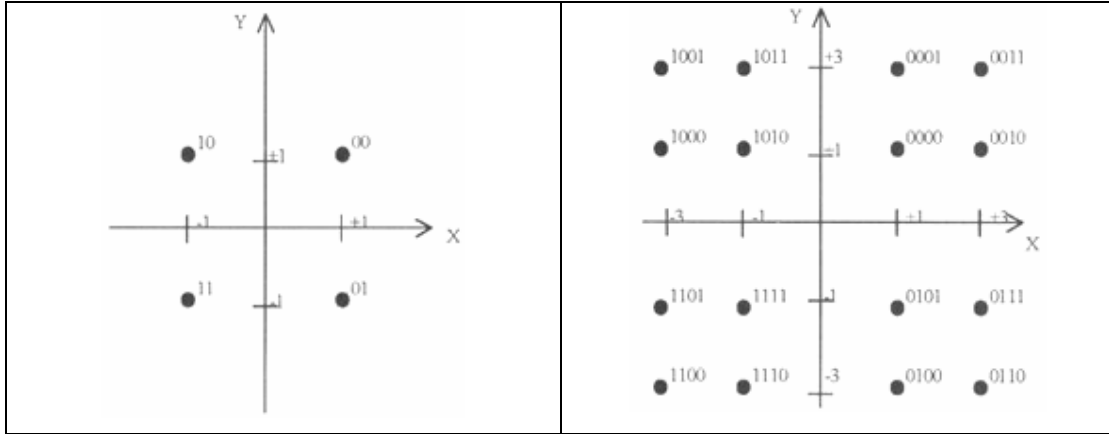


Σχήμα 21: Επιλογή ρυθμού μετάδοσης ανά κανάλι στην τεχνική διαμόρφωσης DMT

4.3.1.3 Διαμόρφωση QAM

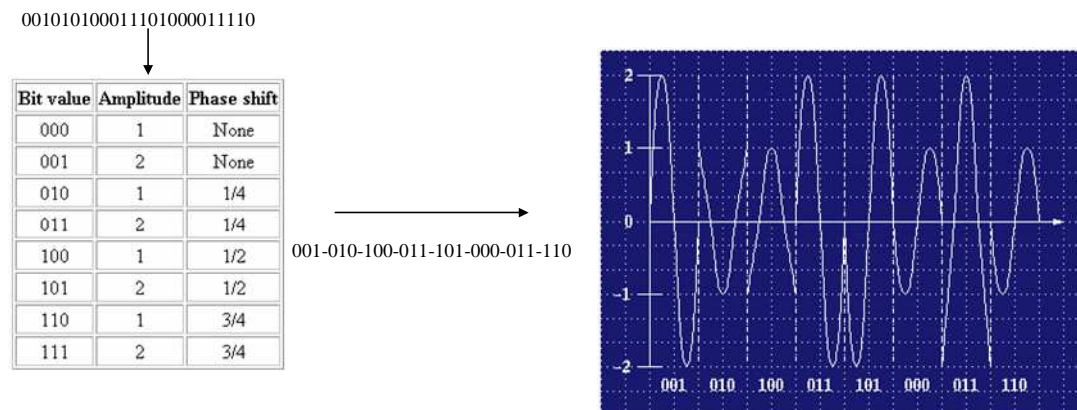
Η διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation) δεν αποτελεί από μόνη της επιλογή διαμόρφωσης για την ADSL, αλλά όπως ήδη αναφέρθηκε οι τεχνικές διαμόρφωσης CAP και DMT έχουν αναφορές στην τεχνική QAM ενώ επίσης θα την συναντήσουμε ως επιλογή διαμόρφωσης στην τεχνολογία VDSL στην συνέχεια. Λόγω των προηγούμενων περιλαμβάνουμε την περιγραφή λειτουργίας της σε αυτή την ενότητα. Η διαμόρφωση QAM χρησιμοποιεί ένα ημίτονο για να διαμορφώσει την ψηφιακή πληροφορία. Δηλαδή κωδικοποιεί την πληροφορία σε διάφορους συνδυασμούς πλάτους και φάσης ενός ημίτονου. Η QAM είναι μια διαμόρφωση που στηρίζεται στο διάγραμμα χώρου σημάτων δηλαδή ένα πίνακα που χρησιμοποιείται για να γίνει αντιστοιχία ενός συρμού από bit σε κάποιο σύμβολο. Κατά την διαδικασία διαμόρφωσης της πληροφορίας ένας συρμός από bit εισέρχεται στο διαμορφωτή και αυτός τον αντιστοιχίζει στο κατάλληλο σύμβολο δηλαδή σε ένα συνδυασμό πλάτους και φάσης ενός ημίτονου. Η μορφή του ημίτονου που θα μεταδοθεί καθορίζεται πλήρως από το πλάτος και την φάση του. Η διαδικασία αποκωδικοποίησης του σήματος είναι περίπου αντίστοιχη με την

διαδικασία διαμόρφωσης, το ημίτονο αποκωδικοποιείται στο σύμβολο που αντιστοιχεί και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τον πίνακα αντιστοιχίζετε σε ένα συρμό από bit. Στο Σχήμα 22 βλέπουμε ένα διάγραμμα χώρου σημάτων για συρμούς δυο bit και τεσσάρων bit.



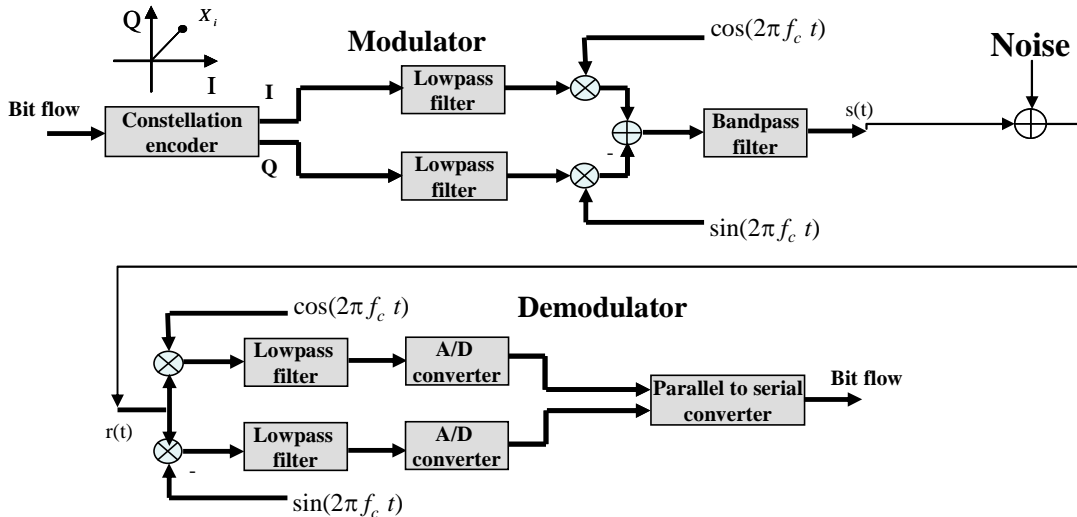
Σχήμα 22: Διάγραμμα χώρου σημάτων QAM για συρμούς δυο bit (απλή QAM) και τεσσάρων bit (QAM-16)

Ο διαμορφωτής παίρνει κάθε φορά ένα πλήθος b δυαδικών ψηφίων (στο σχήμα μας ήταν δυο και τέσσερα bits) και στη συνέχεια ψάχνει στον πίνακα να βρει σε ποιο σύμβολο αντιστοιχεί ο συρμός αυτός από bits και πραγματοποιεί την αντιστοίχιση αυτή. Το σημείο όπου αντιστοιχεί ο συρμός, όπως φαίνεται πολύ καλά από το σχήμα, αντιστοιχεί σε ένα πλάτος και μια φάση που μπορεί εύκολα να αναπαρασταθεί από ένα μιγαδικό αριθμό $Z = X + jY = A \cdot \exp(j\phi)$. Ο αριθμός των σημείων που αντιστοιχίζεται ένας συρμός από bit και άρα και ο αριθμός των συμβολών του διαγράμματος εξαρτάται από το b και ισούται με 2^b (4 σημεία για το πρώτο constellation και 16 σημεία για το δεύτερο constellation του σχήματος). Ένα παράδειγμα διαμόρφωσης QAM-8 φαίνεται στο Σχήμα 23 όπου παριστάνεται το σήμα εξόδου του διαμορφωτή στο πεδίο του χρόνου για μια ενδεικτική συμβολοσειρά εισόδου και πίνακα αντιστοίχισης συμβόλων.



Σχήμα 23: Παράδειγμα διαμόρφωσης QAM-8

Τώρα το μέγεθος του b που επιλέγουμε, δηλαδή την πυκνότητα των συμβολών στο διάγραμμα και άρα και του αριθμού των bit που κωδικοποιούνται μαζί, εξαρτάται καθαρά από την ποιότητα του δέκτη, δηλαδή από την ικανότητα του αποδιαμορφωτή να καθορίσει το πλάτος και την φάση του σήματος που έλαβε από τον πομπό με όσο το δυνατόν μικρότερη αβεβαιότητα. Η ακρίβεια αυτή που απαιτείται δεν εξαρτάται μόνο από τον δέκτη, αλλά και από το πόσο εξασθένησε το σήμα αυτό κατά την μετάδοση και από όλους εκείνους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα μια σύνδεσης. Το μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος μετάδοσης QAM φαίνεται στο Σχήμα 24 που ακολουθεί.



Σχήμα 24: Σύστημα μετάδοσης QAM (πομπός-δέκτης)

Ο ρυθμός μετάδοσης σύμβολων αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο η QAM κωδικοποιεί τα επόμενα b bits κάθε φορά ή αντιστρόφως στο χρόνο που διαρκεί στην γραμμή το διαμορφωμένο ημίτονο. Προφανώς ο αντίστοιχος ρυθμός μετάδοσης ψηφιακής πληροφορίας (bit/sec) θα είναι b φορές μεγαλύτερος του ρυθμού μετάδοσης σύμβολων. Για παράδειγμα, αν ένα αναλογικό modem φωνής κωδικοποιεί γύρω στα 9 με 10 bits μαζί, δηλαδή $b=10$ ήτοι σχηματίζει 1024 (2^{10}) σύμβολα με ρυθμό μετάδοσης σύμβολων περί τα 3429Hz, μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες κοντά στα 33,6kbps.

4.3.1.4 Υπηρεσίες που προσφέρονται από το σύστημα ADSL .

Όπως είναι γνωστό το ADSL είναι μια από τις τεχνολογίες xDSL όπου κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι είναι ασύμμετρη, δηλαδή το εύρος ζώνης που παραχωρείται για να «κατεβάσει» ο χρήστης (downstream) είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το upstream. Έτσι ως τεχνολογία ευνοεί αυτούς που «κατεβάζουν» από το δίκτυο και όχι όποιους θέλουν και να στείλουν με ίδια ταχύτητα.

Έτσι τα ADSL είναι χρήσιμα για υπηρεσίες Video On Demand (VOD), δηλαδή βίντεο κατά απαίτηση, με λίγα λόγια θα μπορεί κάποιος να παρακολουθεί μέσω δικτύου βίντεο. Αυτή η υπηρεσία μπορεί να είναι είτε “real time” είτε “non real time”, δηλαδή θα μπορεί να παρακολουθεί ακόμα και τηλεόραση μέσω δικτύου με χαμηλή ποιότητα βέβαια, αλλά αρκετά ικανοποιητική και συγκρίσιμη με το τηλεοπτικό σήμα. Το VOD όπως είναι

φανερό απαιτεί μεγάλη ταχύτητα για τα δεδομένα που κατεβαίνουν και μικρό εύρος ζώνης για δεδομένα που αποστέλλονται, όπως διάφορες εντολές προσωρινής διακοπής αποστολής, επιλογή κάποιας κατάστασης σε interactive video, επανάληψης και όποιες άλλες εντολές χρησιμοποιούμε σε μια συσκευή βίντεο.

Επίσης η ADSL τεχνολογία δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κατεβάσει μουσικά αρχεία, όπως και το να παρακολουθήσει διάφορες αθλητικές δραστηριότητες που δεν προβάλλονται στην χώρα τους, μέσω διαδικτύου. Επίσης η ADSL τεχνολογία δίνει την δυνατότητα σε όσους το επιθυμούν να συμμετάσχουν σε παιχνίδια που λαμβάνουν χώρα στο διαδίκτυο (network games) και έχουν μεγάλες απαιτήσεις γραφικών και άρα μεγάλη απαίτηση σε ταχύτητα μετάδοσης.

Γενικά η ADSL τεχνολογία δεν ευνοεί υπηρεσίες που απαιτούν μεγάλη ταχύτητα στην κατεύθυνση upstream, όπως είναι το videoconference, αλλά και άλλες εφαρμογές που αφορούν κυρίως τις επιχειρήσεις. Άρα από αυτό καταλαβαίνουμε ότι η ADSL τεχνολογία απευθύνεται κυρίως σε οικιακούς χρηστές και πολύ μικρές επιχειρήσεις που οι απαιτήσεις για downstream είναι μεγάλες και δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις για upstream. Συμπέρασμα όλων αυτών είναι ότι η ADSL τεχνολογία μπορεί να κάνει το διαδίκτυο πιο φιλικό και πιο γρήγορο για το μέσο χρήστη, παρέχοντας του υπηρεσίες και εφαρμογές που δεν ήταν δυνατό με τις υπάρχουσες τεχνολογίες και παράλληλα, του δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα καινούργιο «μπουκέτο» υπηρεσιών στο διαδίκτυο που δεν υπήρχε καν η δυνατότητα να προσφερθούν, όπως συνδρομητική τηλεόραση, και να βοηθήσει την ανάπτυξη των ήδη υπαρχόντων. Όλα αυτά μπορούν να επιτευχθούν χωρίς μεγάλο κόστος από τον παροχέα, καθώς το κόστος τοποθέτησης ADSL είναι σχετικά χαμηλό και θα επιβαρυνθεί με μέρος αυτού και ο πελάτης, ενώ παράλληλα θα αυξηθεί η χρήση του τηλεφωνικού δικτύου και άρα τα έσοδα των εταιρειών που παρέχουν «σταθερή» τηλεφωνία σε μια περίοδο όπου η GSM τεχνολογία έχει βοηθήσει την ανάπτυξη των κινητών και οι τιμές που προσφέρουν για απλή τηλεφωνία έχουν αρχίσει να γίνονται συγκρίσιμες με αυτές του σταθερού δικτύου.

4.3.1.5 Παραλλαγές και επεκτάσεις της τεχνολογίας ADSL .

G.liteADSL: Το πρότυπο αυτό έχει αρκετά πλεονεκτήματα για χρηστές, με περιορισμένες ανάγκες για ταχύτητα, αλλά η ταχύτητα της ISDN δεν τους είναι αρκετή. Είναι μια πιο ήπια μορφή της ADSL τεχνολογίας και προσφέρει ταχύτητες περίπου 30 φορές μεγαλύτερες από τα αναλογικά modem που δουλεύουν στα 56 k. Με λίγα λόγια επιτυγχάνει ταχύτητες για downstream κοντά στα 1,5 Mbps και γύρω στα 500 kbps για upstream. Το G.lite αποτελεί ένα παγκόσμιο πρότυπο της ITU (ITU G.992.2) . Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του είναι ότι η εμβέλεια του που φτάνει περίπου τα 8 km για διάμετρο καλωδίου 0.5 mm. Ένα άλλο και ίσως πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη για τοποθέτηση splitter στο χώρο του συνδρομητή και έτσι δεν είναι αναγκαία η αποστολή στο συνδρομητή κάποιου ειδικευμένου συνεργείου για την τοποθέτηση του, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος εγκατάστασης που θα ήταν αναγκασμένος να πληρώσει ο συνδρομητής. Επιπλέον το G.lite αποτελεί μια ιδανική λύση για οικιακούς χρηστές internet, καθώς οι ταχύτητες που επιτυγχάνει είναι πολύ ικανοποιητικές για μικρούς χρηστές.

RADSL(rate-adaptive DSL): Το RADSL όπως απρρέει από το όνομά του, μπορεί να μεταβάλλει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή το modem του έχει την δυνατότητα να ρυθμίσει την ταχύτητα μετάδοσης σύμφωνα με την ποιότητα της γραμμής. Δηλαδή αν η γραμμή είναι αρκετά μεγάλη σε μήκος ή η διάμετρος καλωδίου είναι αρκετά μικρή, τότε το modem αυτόματα μειώνει την ταχύτητα μετάδοσης. Είναι χρήσιμο κυρίως σε γραμμές με μήκη μεγαλύτερα των 4km και πρόκειται για μια μη

προτυποποιημένη έκδοση ADSL. Σημειώνουμε επίσης ότι το προτυποποιημένο ADSL δίνει την δυνατότητα στο modem του να μεταβάλλει την ταχύτητα σύμφωνα με τις δυνατότητες της γραμμής.

ADSL2: Τον Ιούλιο του 2002 η ITU ολοκλήρωσε τα G.992.3 και G.992.4, δύο νέα πρότυπα της τεχνολογίας ADSL που μαζί λέγονται ADSL2. Η ADSL2 (ITU G.992.3 και G.992.4) προσθέτει νέα χαρακτηριστικά και λειτουργικότητα που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης και της διαλειτουργικότητας, και προσθέτει υποστήριξη για τις νέες εφαρμογές, και υπηρεσίες. Μεταξύ των αλλαγών είναι βελτιώσεις στο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων στο μήκος της γραμμής, στην προσαρμογή του ρυθμού, στα διαγνωστικά, κλπ

RE-ADSL2: Το πρότυπο ADSL2 (G.992.3) Annex L επίσης γνωστό ως RE-ADSL2, (RE-Reach Extended) δίνει αυξημένες δυνατότητες εφαρμογής της DSL σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Έτσι προβλέπεται η ενίσχυση των χαμηλότερων συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων (στις οποίες εμφανίζεται και μεγαλύτερη συνιστώσα θορύβου) για να γίνει δυνατή η μετάδοση μέχρι και 7 Km (23000 πόδια). Αντίστοιχα το άνω όριο του εύρους ζώνης περιορίζεται στα 552 kHz για να περιορίζεται η συνολική ισχύς σήματος στα επίπεδα του προτύπου annex A. Ο περιορισμός αυτός είναι λογικός δεδομένης της απόστασης της οποίας προβλέπεται να καλύπτουν οι αντίστοιχες γραμμές, ούτως ή άλλως. Αν και έχει γίνει αποδεκτή ως διεθνές πρότυπο η παραλλαγή αυτή παραμένει ανεπιθύμητη από ορισμένους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους, οι οποίοι δεν προβαίνουν στην εγκατάσταση αντίστοιχων γραμμών εξαιτίας προβλημάτων λόγω παρεμβολών διαφωνίας που μπορεί να προκαλέσουν οι ενισχυμένες χαμηκές συχνότητες σε ήδη εγκατεστημένες γραμμές.

ADSL2+: Τον Ιανουάριο του 2003 το πρότυπο G.992.5 γνωστό σαν ADSL2plus ή ADSL2+ ήρθε να συμπληρώσει τη σειρά των προτύπων. Η ADSL2plus (ITU G.992.5) διπλασιάζει το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για την λήψη δεδομένων επιτυγχάνοντας ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 24 Mbps σε τηλεφωνικές γραμμές μικρότερες από 2 χιλιόμετρα σε μήκος. Η ADSL2+ υπερβαίνει τις δυνατότητες της απλής τεχνικής ADSL διπλασιάζοντας τον λόγο bit/symbol διπλασιάζοντας το εύρος ζώνης της τυπικής ADSL από 1.1 MHz σε 2.2 MHz. Αυτές οι τεχνικές διπλασιάζουν τον ρυθμό μετάδοσης, αλλά όπως και σε όλες τις περιπτώσεις αυτή η δυνατότητα φθίνει γρηγορότερα σε σχέση με την απόσταση από το συνδρομητικό κέντρο. Μία άλλη τεχνική της οποίας κάνει χρήση είναι η σύζευξη γραμμών (port bonding), η οποία δίνει την δυνατότητα σε όσες περιπτώσεις βρίσκονται εγκατεστημένα πέραν του ενός ζεύγη να πολλαπλασιάζεται η ταχύτητα της σύνδεσης χρησιμοποιώντας αθροιστικά το εύρος ζώνης από όλες τις πόρτες. Η δυνατότητα αυτή μπορεί π.χ. να δώσει ταχύτητες 48 Mbit/s πάνω από δύο γραμμές ταχύτητας 24 Mbit/s των οποίων γίνεται σύζευξη. Η τεχνική αυτή περιγράφεται στη σειρά προτύπων g.998.x ή g.Bond

Standard name	Common name	Downstream rate	Upstream rate
ANSI T1.413-1998 Issue 2	ADSL	8 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.1	ADSL (G.DMT)	12 Mbit/s	1.3 Mbit/s

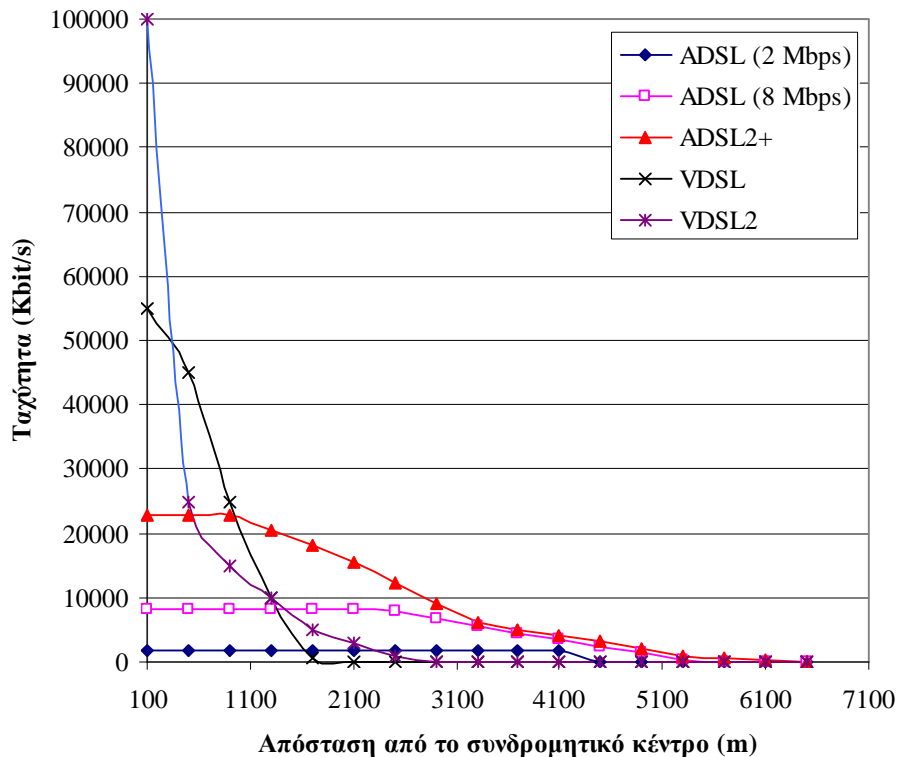
ITU G.992.1 Annex A	ADSL over POTS	12 Mbit/s	1.3 MBit/s
ITU G.992.1 Annex B	ADSL over ISDN (IDSL)	12 Mbit/s	1.8 MBit/s
ITU G.992.2	ADSL Lite (G.Lite)	1.5 Mbit/s	0.5 Mbit/s
ITU G.992.3/4	ADSL2	12 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.3 Annex J	ADSL2	12 Mbit/s	1.0 Mbit/s
ITU G.992.3 Annex L	RE-ADSL2	5 Mbit/s	0.8 Mbit/s
ITU G.992.5	ADSL2+	24 Mbit/s	1.4 Mbit/s
ITU G.992.5 Annex M	ADSL2+M	24 Mbit/s	3.5 Mbit/s

4.3.2 VDSL

Η τεχνολογία VDSL αυξάνει τις δυνατότητες μετάδοσης σε ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς, αλλά με περιορισμούς ως προς την μέγιστη απόσταση από τον καταναμητή. Αποτελεί συμπληρωματική τεχνική της αναβάθμισης και εγκατάστασης νέων δικτύων των τηλεπικοινωνιακών παρόχων με ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυση οπτικών ινών στο δίκτυο πρόσβασης. Για αυτές τις περιπτώσεις οι VDSL γραμμές θα χρησιμοποιηθούν για το τελικό στάδιο σύνδεσης των χρηστών στις συσκευές πρόσβασης για να μεταφέρουν με μεγάλη ταχύτητα δεδομένα σε σχετικά μικρές αποστάσεις, χρησιμοποιώντας τα ήδη εγκατεστημένα χάλκινα καλώδια. Οι ταχύτητες μετάδοσης εξαρτώνται κυρίως από το μήκος του βρόχου. Η μεγαλύτερη προς τον χρήστη (downstream) ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί από μια VDSL γραμμή είναι μεταξύ 51 Mbps και 55 Mbps σε βρόχο μήκους μέχρι τα 1000 ποδιά, δηλαδή περίπου 300 μέτρα. Σχετικά χαμηλές ταχύτητες downstream μέχρι περίπου τα 13 Mbps μπορούν να επιτευχθούν εύκολα σε αποστάσεις μέχρι τα 4000 ποδιά, δηλαδή μέχρι τα 1200 μέτρα. Ταχύτητες upstream στα αρχικά μοντέλα VDSL που ήταν ασύμμετρα έφταναν από 1,6 μέχρι τα 2,3 Mbps. Επίσης ένα βασικό σημείο των VDSL όπως άλλωστε και όλων των xDSL, είναι ότι στα κανάλια upstream και downstream χρησιμοποιούνται πάντα διαφορετικές συχνότητες από το βασικό κανάλι μετάδοσης φωνής και από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τα ISDN, έτσι ώστε να υπάρχει μια ανεξαρτησία μεταξύ μετάδοσης φωνής και VDSL. Το φάσμα των VDSL ξεκινά από την συχνότητα των 200 kHz και φτάνει μέχρι τα 30 MHz. Η κατανομή φάσματος συχνοτήτων γενικά της VDSL δεν είναι σταθερή, γιατί εξαρτάται από το αν είναι συμμετρική ή ασύμμετρη η μετάδοση και από την ίδια την γραμμή. Οι ταχύτητες upstream είναι ακόμη υπό μελέτη, αλλά υπάρχουν δύο γενικές κατευθύνσεις, μια για ασύμμετρη μετάδοση όπου η ταχύτητα κυμαίνεται από 1,6 έως 2,3 Mbps και μία για συμμετρική μετάδοση όπου η ταχύτητα θα είναι ισοδύναμη με την downstream.

Η VDSL είναι η τεχνολογία DSL με την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα μεταγωγής, που φτάνει τα 52 Mbps και με απλούστερες μεθόδους υλοποίησης από τις αντιστοιχές της τεχνολογίας ADSL. Αρχικά η ονομασία της ήταν VADSL (Very-High-Data-Rate Asymmetric DSL), μετονομάστηκε όμως σε VDSL από την ομάδα εργασίας T1E1.4. Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο έγινε αυτή η αλλαγή στο όνομα είναι ότι αντίθετα με ότι συμβαίνει στην ADSL, όπου η μεταγωγή είναι μόνο ασύμμετρη, στη VDSL μπορεί να είναι είτε συμμετρική είτε ασύμμετρη. Όσον αφορά τις ταχύτητες, η VDSL είναι περίπου 10 φορές ταχύτερη από την ADSL και πάνω από 30 φορές ταχύτερη από

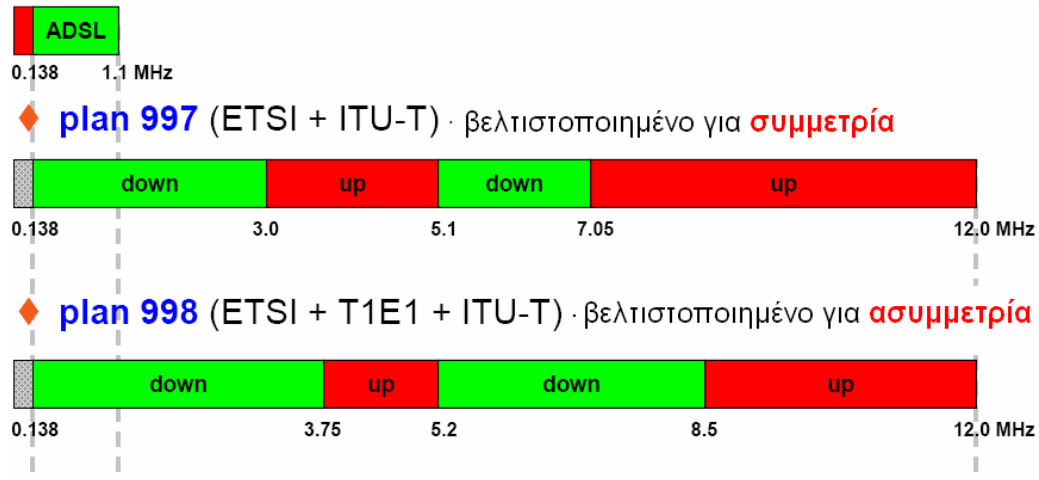
την HDSL, ωστόσο αυτή η διάφορα στις ταχύτητες έχει μειονεκτήματα, με το κυριότερο μέχρι στιγμής να είναι ότι το μήκος του βρόχου πρέπει να είναι πολύ περιορισμένο για να είναι δυνατή η εφαρμογή VDSL υπηρεσιών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια τυπική περίπτωση μεταβολής της μέγιστης ταχύτητας που μπορεί να επιτευχθεί με χρήση διαφόρων παραλλαγών xDSL σε σχέση με το μέγιστο μήκος βρόχου όπου μπορούν να εφαρμοστούν. Η VDSL, όπως είναι φανερό έχει μία σαφή υπεροχή όσον αφορά τις ταχύτητες μετάδοσης έναντι όλων των άλλων DSL. Επίσης η VDSL υποστηρίζει συμμετρικές και ασύμμετρες εφαρμογές και είναι ιδανική για δίκτυα ευρείας ζώνης Full-service (βίντεο, φωνή και δεδομένα ταυτόχρονα).



Σχήμα 25: Συγκριτική απόδοση τεχνολογιών xDSL σε σχέση με την απόσταση (τυπική περίπτωση)

4.3.2.1 Παραλλαγές και επεκτάσεις της τεχνολογίας VDSL

Η βασική διάφορα VDSL και ADSL είναι ότι οι VDSL χωρίζονται σε συμμετρικές και μη συμμετρικές. Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε τις δυο αυτές τεχνολογίες και τις διαφορές τους στην ταχύτητα μετάδοσης.



4.3.2.1.1 Ασύμμετρες VDSL.

Οι ασύμμετρες VDSL σχεδιάστηκαν για να εξυπηρετούν μια σειρά από υπηρεσίες που δεν έχουν ανάγκη από συμμετρική μεταγωγή. Μερικές από αυτές είναι η μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης video on demand, πρόσβαση στο διαδίκτυο με υψηλή ταχύτητα, τηλε-εκπαίδευση, τηλεϊατρική. Αυτές οι υπηρεσίες έχουν απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος downstream και μικρότερο εύρος upstream και για αυτό το λόγο ονομάζονται ασύμμετρες. Ένα παράδειγμα είναι η HDTV η οποία απαιτεί 18 Mbps για downstream ώστε να μεταδίδει εικόνα και για upstream έχει ανάγκη ταχύτητες της τάξης των μερικών kbps που χρειάζονται για αλλαγή καναλιών κάμερας, επανάληψη και σταμάτημα. Οι πίνακες παρακάτω μας διευκρινίζουν τις ταχύτητες που καθόρισε για την VDSL η ANSI T1/E1.

Downstream ταχύτητες για μη συμμετρικές VDSL υπηρεσίες.

(ANSI T1E1.4)

Typical Service Range	Bit Rate (Mbps)	Symbol Rate (Mbps)	Comments
short range, 1 kft	51.84	12.96	baseline
	38.88	12.96	
	29.16	9.72	optional
	25.92	12.96	
medium range, 3 kft	25.92	6.48	baseline
	22.68	5.67	
	19.44	6.48	
	19.44	4.86	optional
	16.20	4.05	
	14.58	4.86	
	12.96	6.48	

long range, 4.5 kft	12.96	3.24	baseline
	9.72	3.24	optional
	6.48	3.24	

Πίνακας 3: Downstream ταχύτητες για μη συμμετρικές VDSL υπηρεσίες.

Upstream ταχύτητες για μη συμμετρικές VDSL υπηρεσίες

(ANSI T1E1.4)

Typical Service Range	Bit Rate (Mbps)	Symbol Rate (Mbps)	Comments
short range, 1 kft	6.48	0.81	Baseline
	4.86	0.81	Optional
	3.24	0.81	
medium range, 3 kft	3.24	0.405	Baseline
	2.43	0.405	Optional
	1.62	0.405	
long range 4.5 kft	3.24	0.405	Baseline
	2.43	0.405	optional
	1.62	0.405	

Πίνακας 4: Upstream ταχύτητες για μη συμμετρικές VDSL υπηρεσίες

4.3.2.1.2 Συμμετρικές VDSL.

Η VDSL έχει σχεδιαστεί για να μεταδίδει ακόμα και συμμετρικές υπηρεσίες για επιχειρήσεις κυρίως μικρού και μεσαίου μεγέθους που έχουν ανάγκη για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας δεδομένων και εφαρμογές τηλεδιάσκεψης κ.ο.κ. Οι συμμετρικές VDSL μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως αντικαταστάτες μικρού φορτίου T1 και για nxT1 ταχύτητες και επιπλέον να υποστηρίξει και άλλες επαγγελματικές εφαρμογές. Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει τα στάνταρ που καθορίστηκαν από την ANSI T1E1.4. Για ταχύτητες μεταξύ 6.48 Mbps και 25.92 Mbps θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η VDSL παρέχει υπηρεσίες συμμετρικές μεταξύ του standard T1 (1.536 Mbps) και του standard T3 (44.376 Mbps), γεφυρώνοντας το τεράστιο κενό που υπάρχει μεταξύ αυτών των δυο καθορισμένων στάνταρ χρησιμοποιώντας λύσεις πάνω σε ζεύγη καλωδίων χαλκού. Παρόλο που η ANSI δεν έχει καθορίσει πλήρως την ταχύτητα και την απόσταση για μεγάλης απόστασης συμμετρικές υπηρεσίες είναι πιθανό να υποστηρίζονται από 6 Mbps μέχρι 1.5 Mbps διάμεσου βρόχων από 3000 πόδια μέχρι 10000 ποδιά .

Ταχύτητες για συμμετρικές VDSL υπηρεσίες

(ANSI T1E1.4)

Typical Service Range	Bit Rate (Mbps)	Downstream Rate (Mbps)	Symbol	Upstream Rate (Mbps)	Symbol
short range, 1	25.92	6.48		7.29	

kft	19.44	6.48	7.29
medium range, 3 kft	12.96	3.24	4.05
	9.72	3.24	2.43
	6.48	3.24	3.24

Πίνακας 5: Ταχύτητες για συμμετρικές VDSL υπηρεσίες

Τεχνολογία (Ακρονύμιο)	ITU	Χαρακτηριστική ονομασία	Αποδοχή προτύπου	Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης
ADSL	G.992.1	G.dmt	1999	7 Mbps down, 800 kbps up
ADSL2	G.992.3	G.dmt.bis	2002	8 Mb/s down, 1 Mbps up
ADSL2plus	G.992.5	ADSL2plus	2003	24 Mbps down, 1 Mbps up
ADSL2-RE	G.992.3	Reach Extended	2003	8 Mbps down 1 Mbps up
SHDSL	G.991.2	G.SHDSL	2001	5.6 Mbps up/down
VDSL	G.993.1	Very-high-data- rate DSL	2004	55 Mbps down, 15 Mbps up
VDSL2	G.993.2	Very-high-data- rate DSL 2	2005	100 Mbps up/down

4.3.2.1.3 VDSL2

Η ITU-T το 2006 έκανε αποδεκτό το επόμενης γενιάς πρότυπο VDSL το αποκαλούμενο VDSL2 (πρότυπο G.993.2). Το πρότυπο αυτό αποτελεί μετεξέλιξη του ADSL2+ αυξάνοντας σημαντικά το εύρος ζώνης στα 30MHz και υποστηρίζοντας διαμόρφωση DMT με 4096 τόνους και βελτιωμένη κωδικοποίηση γραμμής (Trellis). Προβλέπει 8 προφίλ (ταχύτητες μετάδοσης upstream/downstream αναλόγως του μήκους της γραμμής) και διαχείριση του φάσματος, ώστε να καλύπτει διάφορες προδιαγραφές λειτουργίας σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης διαθέτει επιπλέον λειτουργικότητα για τη διαχείριση της ποιότητας διαφορετικών υπηρεσιών και υποστηρίζει μετάδοση πακέτων εκτός από κελιά ATM. Μπορεί να λειτουργήσει σε γραμμές μήκους έως και 3Km και είναι συμβατή με τις παλαιότερες παραλλαγές ADSL.

4.3.2.1.4 Τεχνικές διαμόρφωσης στην τεχνολογία VDSL

Όπως και στην περίπτωση της ADSL που αναπτύχθηκε παραπάνω υπάρχουν δυο κωδικοποιήσεις για χρήση στις VDSL τεχνολογίες, η QAM και η DMT, οι οποίες περιελήφθησαν και οι δύο στο πρότυπο VDSL της ITU-T G.993.1. Και οι δύο έχουν

πλεονεκτήματα κατά την χρήση τους, ωστόσο ανάλογα με τις ανάγκες που υπάρχουν και τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την παροχή VDSL υπηρεσιών επιλέγεται μια από τις δύο. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο είναι ότι και οι δύο έχουν εφαρμοστεί στις DSL υπηρεσίες, η DMT στην ADSL και η QAM στις HDSL, SDSL, SHDSL, IDSL. Η discrete multi-tone DMT κωδικοποίηση ανήκει σε ένα από τα υποσύνολα της κωδικοποίησης MCM (Multi-Carrier Modulation) και είναι η κωδικοποίηση που τελικά επικράτησε στην ADSL και περιγράφεται αναλυτικά στην αντίστοιχη ενότητα (4.3.1.2.2). Από την άλλη η Quadrature Amplitude Modulation είναι μια γενίκευση της PAM και αποτελεί ένα υποσύνολο SCM (Single Carrier Modulation) η οποία πρωτοχρησιμοποιήθηκε σε αναλογικά modem. Η DMT σήμερα χρησιμοποιείται στην ADSL και σε διάφορες άλλες ασύρματες εφαρμογές, ενώ η QAM στα HDSL, SDSL, SHDSL, στο Ethernet και στα καλωδιακά modem. Η ITU-T προτυποποίησε μόνο την επιλογή της DMT για το επόμενης γενιάς πρότυπο VDSL2 (πρότυπο G.993.2).

4.3.2.1.4.1 Χρήση QAM για VDSL.

Επιχειρώντας μια μακροσκοπική ανάλυση του τρόπου λειτουργίας της QAM για τη μετάδοση VDSL υπηρεσιών θα πρέπει να πούμε ότι το όλο εύρος ζώνης χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους και ανεξάρτητα μεταξύ τους κανάλια. Μαζί με αυτά υπάρχει και το κανάλι 0, το οποίο χρησιμοποιείται για απλή μετάδοση φωνής και είναι πλήρως ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα, για να είναι δυνατή η μετάδοση φωνής σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας της VDSL. Έτσι μεταδίδονται 4 κανάλια που είναι κατάλληλα για μετάδοση VDSL υπηρεσιών και εξαρτώνται από το μήκος της γραμμής. Οι προδιαγραφές επιτρέπουν την μεταβολή των επιμέρους ευρών ζώνης μέσα στο ολικό εύρος ζώνης για την βελτιστοποίηση της μετάδοσης, κάτι που εφαρμόζεται ήδη στην τεχνολογία QAM. Πλεονέκτημα της QAM αυτή τη στιγμή είναι ότι ήδη η τρίτη ή τέταρτη γενιά QAM είναι διαθέσιμη και έχουν διατεθεί πάνω από 1 εκατομμύριο chipsets.

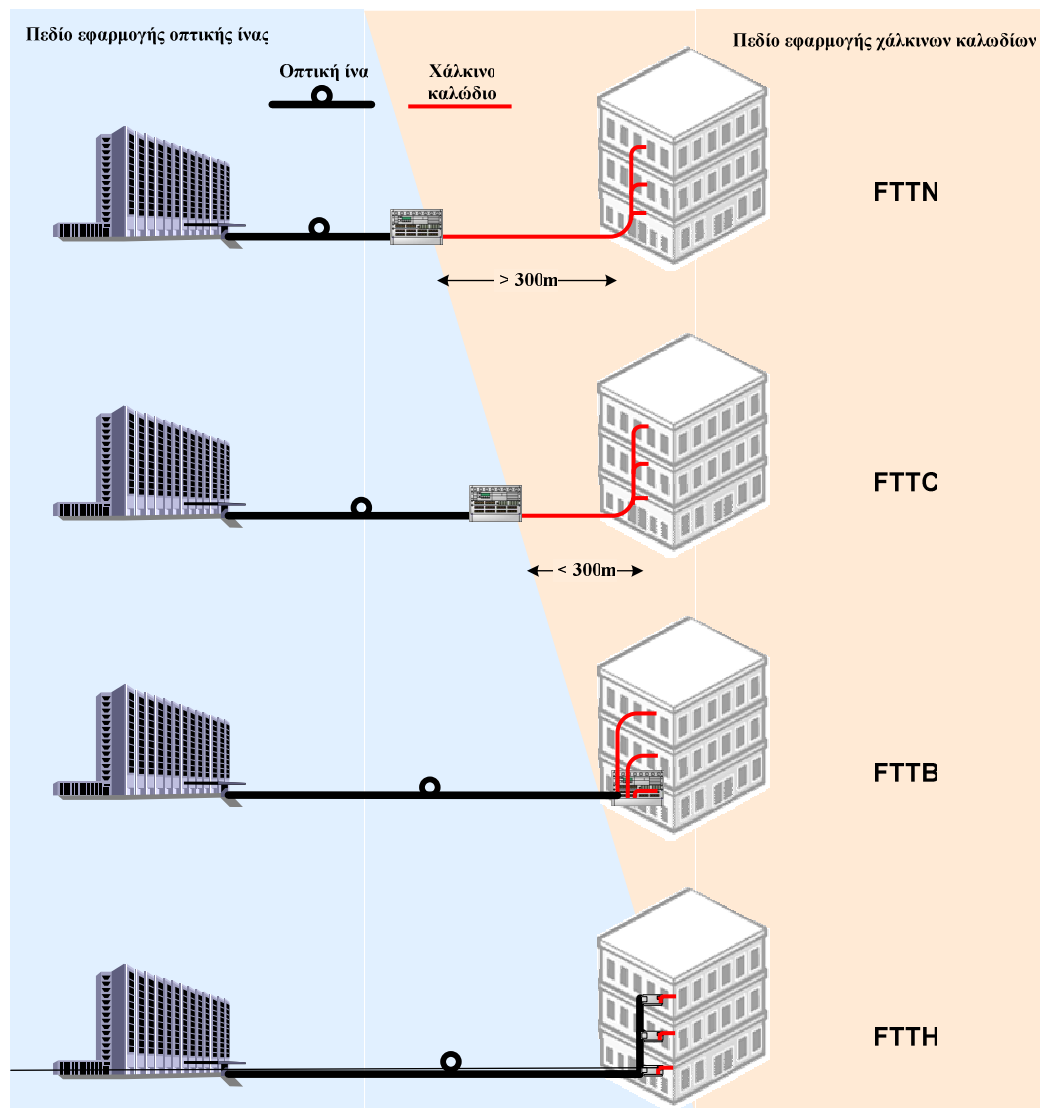
4.3.2.1.4.2 Χρήση της DMT για VDSL

Ο αλγόριθμος λειτουργίας της DMT για την μετάδοση VDSL υπηρεσιών είναι περίπου ανάλογος με αυτό που εφαρμόζεται και στην ADSL. Καταρχήν όλο το εύρος ζώνης χωρίζεται σε εκατοντάδες μικρότερα κανάλια. Το μέγεθος καθενός από αυτά τα κανάλια είναι περίπου 4 kHz, όπως ακριβώς και στην ADSL. Όπως και στην QAM για να παραμείνει ανεπηρέαστη η μετάδοση φωνής αν για κάποιο λόγο η VDSL σταματήσει να μεταδίδει, το κανάλι της φωνής είναι ανεξάρτητο και παραμένει ανεπηρέαστο από την διακοπή αυτή. Για την βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης και για την πολυπλεξία είναι δυνατόν να πραγματοποιούνται μηδενισμοί σε κάποια κανάλια.

4.3.2.2 Πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας VDSL

Η τεχνολογία VDSL αποτελεί την αιχμή των τεχνολογιών xDSL για ευρυζωνική πρόσβαση και εξαντλεί τα όρια μετάδοσης πάνω από χάλκινα ζεύγη καλωδίων. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων αξιόπιστης μετάδοσης του ψηφιακού σήματος δεν αναμένεται αυτό να είναι εφικτό πάνω από γραμμές μεγάλου μήκους όπως επισημάνθηκε και παραπάνω. Οι τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί όμως βασίζονται στην ανάπτυξη ενός δικτύου πλήρους παροχής υπηρεσιών (Full-Service Access Network, FSAN) η οποία συντελείται παράλληλα με την σταδιακή ανάπτυξη των δικτύων οπτικών ινών. Η ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική προβλέπει οπτικές ίνες μέχρι τα σπίτια και τις επιχειρήσεις, αλλά αυτό θα απαιτήσει ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και αρκετά σημαντικό ποσό πόρων για να πραγματοποιηθεί. Η τεχνολογία που κάνει χρήση οπτικής ίνας μέχρι ένα ορισμένο σημείο του δικτύου πρόσβασης γενικά καλείται FTTx (Fiber To The x). Το

σημείο “x” μπορεί να είναι ο κόμβος πρόσβασης ή καταναμητής σε επίπεδο γειτονιάς (επί του πεζοδρομίου) οπότε έχουμε αντίστοιχα τις περιπτώσεις FTTN (Fiber To The Node) και FTTC (Fiber To The Curb), ή ακόμα ο κεντρικός καταναμητής να βρίσκεται εντός ενός κτηρίου (π.χ. στέγασης γραφείων, επιχειρήσεων, οικιών κλπ.), οπότε έχουμε την περίπτωση FTTB (Fiber To The Building), ή τελικά μέσα στο σπίτι με το FTTH (Fiber To The Home) που αποτελεί και το τελικό στάδιο εξάπλωσης οπτικών ινών. Οι αντίστοιχες περιπτώσεις εγκατάστασης ευρυζωνικών υποδομών, όπου περιγράφεται ο βαθμός διείσδυσης οπτικών δικτύων για τη συγκέντρωση κίνησης από συνδρομητές συνδεδεμένους με χάλκινα ζεύγη καλωδίων φαίνονται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 26. Η VDSL είναι η μόνη κατάλληλη μορφή για FTTx, όπου οι πελάτες εξυπηρετούνται σε μια ακτίνα πολύ μικρή γύρω από τον καταναμητή. Το FTTN και το FTTC είναι κατάλληλα για VDSL μεταγωγή σαν μέρος ενός επόμενης γενιάς ψηφιακού βρόχου (next generation digital loop carrier, NGDLC). Το FTTB θα φέρει τις οπτικές ίνες κατευθείαν μέσα στα κτίρια, όπως σε μια πολυκατοικία ή μια εμπορική επιχείρηση και τελειώνει σε ένα VDSL μεταγωγέα.



Σχήμα 26: Τοπολογίες δικτύων FTTx και πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας VDSL

Κεφάλαιο 3 - Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks - PON)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Παθητικά Οπτικά Δίκτυα (Passive Optical Networks – PON) είναι οπτικά δίκτυα σημείου προς πολλαπλά σημεία, τα οποία δεν περιέχουν ενεργά στοιχεία, δηλαδή δεν έχουμε μετατροπή του σήματος από οπτικό σε ηλεκτρικό από την πηγή μέχρι τον προορισμό του ([20]). Τα μόνα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι παθητικοί ζεύκτες (couplers), διαιρέτες (splitters) και συνδυαστές (combiners).

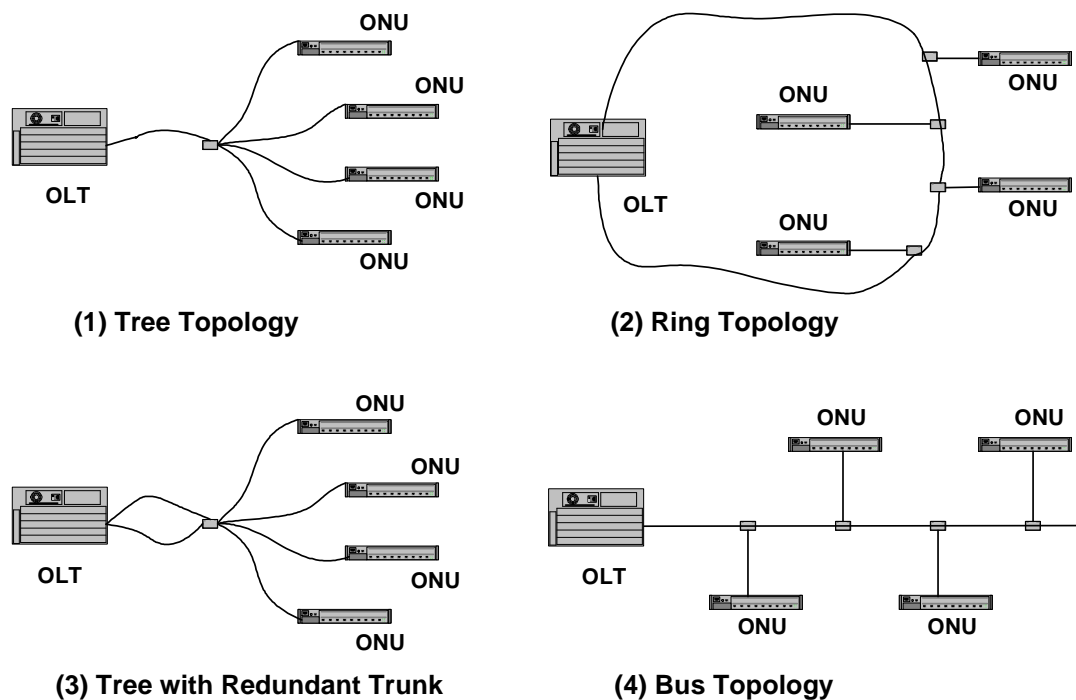
Τα PON είναι μια αξιόπιστη λύση για τα Δίκτυα Πρόσβασης (Access Networks – AN) αφού επιτρέπουν τη χρήση υπηρεσιών ευρείας ζώνης με οικονομικούς όρους, ώστε να είναι εφικτή η πρόσβαση από μεμονωμένους χρήστες ή μικρές επιχειρήσεις οι οποίοι δεν έχουν τη οικονομική δυνατότητα χρησιμοποίησης οπτικών ινών αποκλειστικής χρήσης. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρήσης PON σε Δίκτυα Πρόσβασης, είναι τα παρακάτω :

- Επιτρέπουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ του κέντρου σύνδεσης και του συνδρομητή. Μια ενσύρματη γραμμή που χρησιμοποιεί την τεχνολογία DSL επιτρέπει μέγιστη απόσταση 5,5 km μεταξύ του κέντρου και του συνδρομητή, ενώ ένας τοπικός βρόχος PON μπορεί να λειτουργήσει με αποστάσεις 20 km ή και μεγαλύτερες.
- Μειώνουν το πλήθος και συνεπώς το κόστος των οπτικών ινών στον τοπικό βρόχο.
- Παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης, εξαιτίας της εγκατάστασης οπτικών ινών μέχρι το χρήστη. Αν και οι λύσεις ίνα - μέχρι - το - σπίτι (fiber-to-the-home – FTTH), ίνα - μέχρι - το - κτήριο (fiber-to-the-building – FTTB) παρέχουν το μέγιστο εύρος ζώνης εξαιτίας της μεγάλης διεισδυτικότητας της ίνας, η λύση ίνα - μέχρι - το - πεζοδρόμιο (fiber-to-the-curve – FTTC) κρίνεται ως η πιο αποδοτική από άποψη κόστους.

- Επειδή είναι δίκτυα σημείου προς πολλαπλά σημεία είναι κατάλληλα για κοινοποίηση πληροφορίας, όπως η αναμετάδοση video (video broadcasting).
- Εξαλείφουν την ανάγκη χρήσης πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών στα σημεία διαχωρισμού, και έτσι απαλλάσσει τους διαχειριστές του δικτύου από την επίπονη και ακριβή διαδικασία συντήρησης και τροφοδότησης των στοιχείων αυτών. Αντί για ενεργά στοιχεία στα σημεία διαχωρισμού εγκαθίστανται παθητικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται τροφοδοσία, και μπορούν να θαφτούν στο έδαφος κατά την εγκατάσταση του δικτύου χωρίς να απαιτούν συντήρηση μελλοντικά.
- Επιτρέπουν την εύκολη αναβάθμιση σε υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων καθώς και τη χρήση πολλαπλών μηκών κύματος.

2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ

Τα δίκτυα πρόσβασης μπορεί να έχουν διάφορες τοπολογίες, δένδρου, δακτυλίου ή διαύλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27: Τοπολογίες παθητικών δικτύων

Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της καταλληλότερης τοπολογίας είναι η ευκολία στην αναβάθμιση του δικτύου, το κόστος, η αξιοπιστία, η συντήρηση και η ασφάλεια. Μια σύντομη περιγραφή και σύγκριση των διαφόρων τοπολογιών ακολουθεί παρακάτω, όπως αναφέρονται στο [20].

2.1 Παθητικό Δέντρο

Χαρακτηριστικό της τοπολογίας δένδρου είναι η διαίρεση του σήματος από παθητικούς διαχωριστές, οι οποίοι βρίσκονται σε διαδοχικά σημεία διακλάδωσης (Σχήμα 27). Με

αυτήν τη στρατηγική μία μόνο οπτική ίνα που εξέρχεται από το τοπικό κέντρο μπορεί να συνδεθεί με πολλά σημεία τερματισμού, δημιουργώντας έτσι συνδέσεις σημείου προς πολλαπλά σημεία μεταξύ του OLT και των ONU. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η κοινοχρησία όχι μόνο του εξοπλισμού που βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής, αλλά και της ίδιας της οπτικής ίνας, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους. Εξαιτίας της διαδοχικής διαίρεσης του οπτικού σήματος, προκαλείται μείωση της οπτικής ισχύος μετά από κάθε διακλάδωση και έτσι περιορίζεται ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα δίκτυο. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χρήση εκπομπών με μεγάλη ισχύ εξόδου ή πολύ ευαίσθητων δεκτών, ώστε να καθίσταται εφικτή η σύνδεση μεγαλύτερου αριθμού χρηστών.

Μία σημαντική ιδιότητα της τοπολογίας παθητικού δέντρου, αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η ανοδική και καθοδική εκπομπή. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα σήμα εκπέμπεται από το τοπικό κέντρο προς όλους τους συνδρομητές για τις καθοδικές μεταδόσεις, ενώ για την ανοδική εκπομπή εφαρμόζεται ένα πρωτόκολλο TDMA (πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου), ώστε να γίνεται πολυπλεξία των δεδομένων των χρηστών στο κοινό κανάλι ανόδου. Για την υλοποίηση των τεχνικών αυτών απαιτείται επιπρόσθετος ηλεκτρονικός εξοπλισμός τόσο στο τοπικό κέντρο όσο και στην πλευρά του συνδρομητή. Οι οπτικές πολυπλέξεις / αποπολυπλέξεις γίνονται από συσκευές WDM (πολυπλεξίας μήκους κύματος). Η δομή του δικτύου τύπου δέντρου είναι σχεδόν όμοια με το δίκτυο τύπου αστέρα του τηλεφωνικού δικτύου, που βασίζεται στο χαλκό, και άρα μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα.

Η τοπολογία δέντρου μπορεί να αναβαθμιστεί με έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο, αφού υπάρχει η δυνατότητα της μετάδοσης σε διαφορετικά μήκη κύματος. Έτσι είναι δυνατή η προσθήκη νέων υπηρεσιών με μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, αλλά ταυτόχρονα θα υπάρξει και επιπρόσθετο κόστος από την εγκατάσταση του απαραίτητου εξοπλισμού. Συγκεκριμένα απαιτείται η εγκατάσταση συσκευών WDM στα ONTs και στο OLT, ενώ δεν απαιτείται καμία μετατροπή στο δίκτυο διανομής.

Η συντήρηση απαιτεί απλές λειτουργίες, αλλά αντίθετα η παρακολούθηση του δικτύου και ο εντοπισμός των σφαλμάτων απαιτούν την ανάπτυξη κατάλληλων διαδικασιών ελέγχου, όπως η υλοποίηση αλγορίθμων ελέγχου και διαίτησίας του μέσου, εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων. Όσον αφορά στις απαιτήσεις ασφάλειας αυτές μπορεί να εμπεριέχουν την εφαρμογή τεχνικών κρυπτογράφησης, αφού η καθοδική TDMA είναι διαθέσιμη σε όλους τους τερματιστές του δικτύου. Όμως ακόμα και στην περίπτωση που δε χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση, ο βαθμός ασφάλειας φαίνεται να είναι κατά πολύ σύμφωνος με τα πρότυπα των υπάρχοντων δημοσίων δικτύων.

Οι δομές παθητικών δέντρων είναι κατάλληλες και για την περίπτωση κατανεμημένων υπηρεσιών, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ένα ξεχωριστό μήκος κύματος για κάθε υπηρεσία. Το παθητικό δέντρο παρέχει ένα καλό βαθμό μερισμού πόρων, μειώνοντας έτσι το κόστος ανά συνδρομητή.

2.2 Παθητικός Δακτύλιος

Στην τοπολογία του παθητικού δακτυλίου ενεργητικές από σημείο - σε - σημείο ζεύξεις δημιουργούν ένα δακτύλιο, του οποίου ένας κόμβος είναι το κέντρο μεταγωγής (Σχήμα 27). Η τοπολογία δακτυλίου παρέχει οικονομία, αφού στο κέντρο μεταγωγής υπάρχει ανάγκη για ένα μόνο OLT. Επιπλέον, η τοπολογία αυτή απαιτεί λιγότερο συνολικό μήκος ίνας από τις άλλες τοπολογίες.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι ότι όταν ένα πακέτο φθάσει στον προορισμό του, η πληροφορία αφαιρείται, και μία άδεια χρονοθυρίδα (η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά) εκπέμπεται προς τον επόμενο σταθμό. Η ιδιότητα αυτή, η οποία θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη στο τοπικό συνδρομητικό δίκτυο, είναι μικρής αξίας για τον τοπικό βρόχο, όπου δεν υπάρχει σημαντική τοπική κίνηση και όλες οι μεταγωγές γίνονται στο κέντρο μεταγωγής.

2.3 Παθητικός Δίαυλος

Η τοπολογία παθητικού διαύλου μειώνει τον αριθμό των οπτικών πομποδεκτών που απαιτούνται στο μισό, σε σχέση με την τοπολογία δέντρου. Για κάθε κατεύθυνση χρησιμοποιείται μία ξεχωριστή ίνα Σχήμα 27. Στους κόμβους σύνδεσης του συνδρομητή, ένας οπτικός διαχωριστής παγιδεύει μέρος του οπτικού σήματος για να το κατευθύνει προς το συνδρομητή. Η κύρια συσκευή σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι ο ασύμμετρος οπτικός διαχωριστής/συνδυαστής. Οι συσκευές αυτές στην καθοδική κατεύθυνση πρέπει να διαχωρίζουν από το δίαυλο τουλάχιστον το ελάχιστο ποσό οπτικής ισχύος που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του δέκτη κάθε συνδρομητή, επιτρέποντας να μείνει αρκετή ισχύς στο δίαυλο για τους άλλους συνδρομητές. Κατά την ανοδική κατεύθυνση, η ισχύς η οποία εκπέμπεται από τους συνδρομητές, οδηγεί στη δημιουργία, μέσω των συνδυαστών, της συνολικής ανοδικής κυκλοφορίας σε μία ίνα που οδηγεί προς το τοπικό κέντρο. Τα προβλήματα που υπάρχουν οφείλονται στο γεγονός ότι οι διαφορετικές μεταξύ τους παγιδεύσεις δεν είναι τέλειες και εισάγουν ανακρίβειες στην ποσότητα της οπτικής ισχύος που παγιδεύτηκε. Έτσι, ο ισολογισμός της ισχύος είναι κρίσιμος σε αυτόν τον τύπο τοπολογίας γιατί πρέπει να προνοήσουμε για τις αστάθειες που παρουσιάζονται στην απόδοση της παγίδευσης.

Η αναβάθμιση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση διαφορετικών μηκών κύματος, όπως και στην περίπτωση του παθητικού δένδρου. Τα θέματα αξιοπιστίας, συντήρησης και ασφάλειας είναι και αυτά παρόμοια με αντίστοιχα της τοπολογίας δέντρου. Όσον αφορά τη γεωγραφική μορφή, η τοπολογία αυτή προφανώς δεν είναι συμβατή με τη μορφή της υπάρχουσας υποδομής και έτσι η ανάπτυξη της θα απαιτούσε σημαντικό όγκο εργασίας.

Η τοπολογία του παθητικού διαύλου προσφέρεται και για κατανεμημένες υπηρεσίες, αν και ζητήματα οπτικού προϋπολογισμού που σχετίζονται με τον οπτικό παγιδευτή να φανούν στην περίπτωση αυτή κρίσιμα.

Η τοπολογία αυτή επιτυγχάνει καλύτερο μερισμό της ίνας σε σύγκριση με το οπτικό δέντρο. Ο αριθμός των οπτικών εξαρτημάτων είναι παρόμοιος αν και οι παθητικοί παγιδευτές μπορεί να είναι πιο ακριβοί από τους διαχωριστές λόγω πιο αυστηρών απαιτήσεων κατασκευής. Αν εξαιρέσουμε τον προβληματισμό για την αξιοπιστία των παγιδευτών τότε το κόστος λειτουργίας της τοπολογίας θα είναι παρόμοιο με την περίπτωση του παθητικού δέντρου.

2.4 Σύγκριση

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τοπολογιών που παρουσιάστηκαν παραπάνω συνοψίζει ο Πίνακας 6, έτσι ώστε να δοθεί μία συνολική εικόνα για τις τοπολογίες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Κριτήριο	Δέντρο	Δίαυλος	Δακτύλιος
Ευκολία	Άριστη	Άριστη	Άριστη

αναβάθμισης			
Αξιοπιστία	Καλή	Καλή	Καλή
Συντήρηση	Άριστη	Άριστη	Άριστη
Ασφάλεια	Καλή	Καλή	Καλή
Εξέλιξη	Καλή	Μηδενική	Μηδενική
Συμβατότητα με υπάρχοντα δίκτυα	Καλή	Μηδενική	Μηδενική
Κατανεμημένες υπηρεσίες	Ευνοϊκό	Αδύνατον	Αδύνατον
Αρχικό κόστος εγκατάστασης	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό
Λειτουργικό κόστος	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό

Πίνακας 6: Σύγκριση τοπολογιών οπτικών παθητικών δικτύων

Η κατανομή του κόστους στο χρόνο, που απορρέει από την ευκολία αναβάθμισης των δικτύων αυτών, είναι ένα σαφές πλεονέκτημα των παθητικών δομών, αφού επιτρέπει τη μείωση του κόστους ανά συνδρομητή. Η δομή παθητικού δέντρου είναι προτιμητέα για το δίκτυο πρόσβασης. Αν και έχει ένα ελαφρό οικονομικό μειονέκτημα συγκρινόμενο με τη δομή παθητικού διαύλου / δακτυλίου, αυτό υπερκαλύπτεται από άλλους παράγοντες:

- την ευκολία αναβάθμισης σε μελλοντικά συστήματα
- την καταλληλότητα για παροχή διανεμημένων υπηρεσιών
- τη συμβατότητα με υπάρχουσες δομές
- τα απλά οπτικά εξαρτήματα (ειδικά οι διαχωριστές συγκρινόμενοι με τους παγιδευτές)

3 ΦΥΣΙΚΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ

Σε ένα PON η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται μεταξύ του Οπτικού Τερματιστή Γραμμής (Optical Line Termination – OLT) και μιας Οπτικής Μονάδας Δικτύου (Optical Network Units – ONU) ή ενός Οπτικού Τερματιστή Δικτύου (Optical Network Termination – ONT). Η ανταλλαγή δεδομένων σε ένα PON είναι σημείου προς πολλαπλά σημεία για το ρεύμα καθόδου, δηλαδή μετάδοση από το OLT στο ONU, ενώ είναι πολλαπλών σημείων προς σημείο για το ρεύμα ανόδου. Το OLT αποτελεί το σημείο προσαρμογής μεταξύ του PON και του δικτύου κορμού, που μπορεί να είναι IP, ATM ή SONET και βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγής. Το ONT βρίσκεται στο κτήριο του συνδρομητή και αποτελεί τον τερματιστή του δικτύου (FTTH, FTTB), όμως πιο συνηθισμένη είναι η χρήση ONU (FTTC), η οποία μπορεί κατόπιν να παρέχει σημεία προσαρμογής για να υποστηρίξει περισσότερους από ένα χρήστη και έτσι είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά.

Ένα δίκτυο πρόσβασης που βασίζεται σε PON έχει να αντιμετωπίσει διάφορες προκλήσεις κατά το σχεδιασμό του, ανεξαρτήτως της φυσικής του τοπολογίας, δένδρου, αστέρα κ.τ.λ. Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή του πρωτοκόλλου που θα χρησιμοποιηθεί για το στρώμα δεδομένων. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές : SONET, ATM, Ethernet, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα περιλαμβάνει ο Πίνακας 7.

Πρωτόκολλο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
SONET	Ανοχή στα λάθη Διαχείριση λαθών	Ακριβό υλικό (hardware) Μεγάλο κόστος για τοπικό βρόχο

	Χρησιμοποιείται σε πολλά δίκτυα	Μη αποδοτικό για κίνηση δεδομένων
ATM	Είναι δυνατή η παροχή διαφορετικών QoS (Quality of Service) και εγγυημένου εύρους ζώνης στα δεδομένα που υπάρχουν στο OLT και στο ONU ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου.	Επειδή τα δεδομένα τόσο στο OLT όσο και στο ONU είναι σε πακέτα IP, για τη μεταφορά μέσω PON είναι απαραίτητος ο τεμαχισμός των πακέτων και η επανασυναρμολόγησή τους στο άλλο άκρο. Αυτό δημιουργεί επιπρόσθετο κόστος και πολυπλοκότητα στο δίκτυο.
Ethernet	Είναι αποδοτικό στη μεταφορά πακέτων IP. Διαδεδομένο και φθινό υλικό. Υποστηρίζει διάφορους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων (100Mbps, 1Gbps, 10 Gbps)	Απαιτεί την ανάπτυξη τεχνικών QoS για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου.

Πίνακας 7: Σύγκριση πρωτοκόλλων στρώματος δεδομένων

Ένα δεύτερο ζήτημα είναι ο διαχωρισμός των προς τα άνω καναλιών (από τα ONU στο OLT), ώστε να μην έχουμε σύγκρουση στην περίπτωση που δύο ONU μεταδώσουν σε τέτοιες χρονικές στιγμές που τα δεδομένα τους θα φτάσουν ταυτόχρονα στο OLT. Υπάρχουν τρεις δυνατοί τρόποι για την πολυπλεξία των δεδομένων: η πολυπλεξία μήκους κύματος (WDM), η πολυπλεξία χρόνου (TDM) και η πολυπλεξία κώδικα (CDM). Ο Πίνακας 8 περιλαμβάνει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς μεθόδου.

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
WDM	Παρέχει υψηλό εύρος ζώνης Είναι εύκολο στην υλοποίηση	Υψηλό κόστος, αφού κάθε ONU πρέπει να έχει ένα διαχωριστή μήκους κύματος. Δυσκολία αναβάθμισης, αφού το OLT έχει ένα πίνακα αντιστοίχισης για κάθε μήκος κύματος με κάθε ONU. Η προσθήκη ενός ONU θα ήταν δύσκολη.
TDM	Επιτρέπει σε κάθε ONU να χρησιμοποιεί ένα κλάσμα της χωρητικότητας του δικτύου. Μόνο ένας μεταδότης είναι απαραίτητος στο OLT ανεξαρτήτως του αριθμού των ONU.	Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από το WDM. Απαιτεί τον συγχρονισμό των ONU.
CDM	Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των χρηστών. Παρέχει ασφάλεια.	Οι παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών καναλιών αυξάνονται όσο αυξάνουν οι χρήστες. Το υλικό πρέπει να έχει τη δυνατότητα να χειριστεί ρυθμούς δεδομένων πολύ υψηλότερους από αυτούς των χρηστών.

Πίνακας 8: Σύγκριση τεχνικών πολυπλεξίας

3.1 Πολύπλεξη με διαίρεση χρόνου (TDMA) στα δίκτυα PON

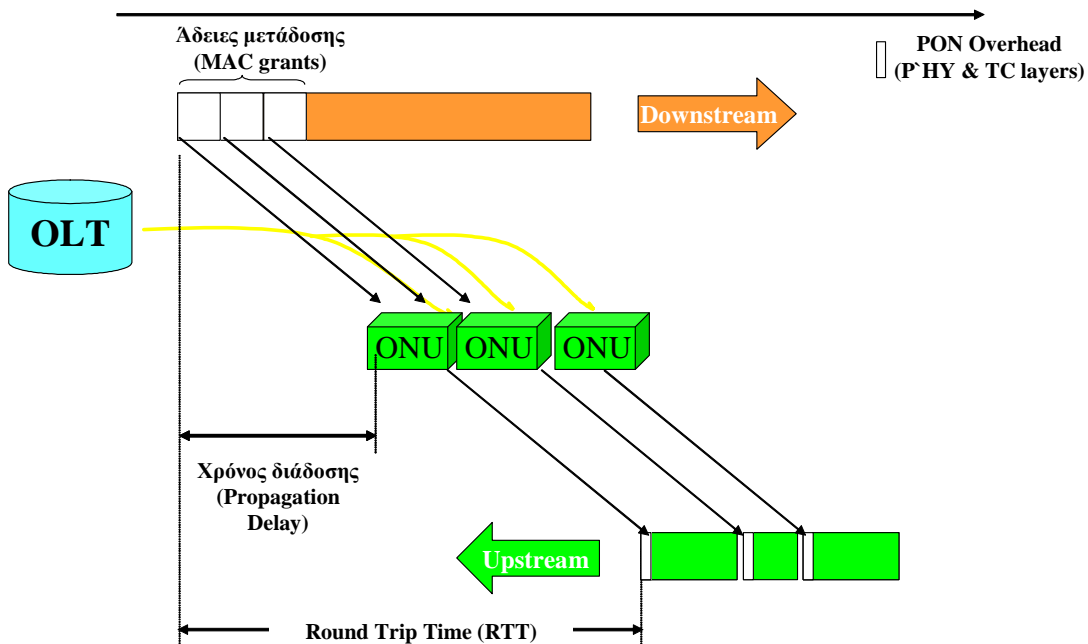
Η τοπολογία δέντρου των δικτύων PON παρουσιάζει μια διαφορετική συμπεριφορά στη μεταφορά δεδομένων στο ρεύμα ανόδου από το ρεύμα καθόδου. Στο ρεύμα καθόδου η κοινοποίηση δεδομένων σε όλους τους χρήστες με το διαμοιρασμό του σήματος (εκπομπή - broadcast) προκαλεί την δημιουργία πολλών αντιγράφων του εκπεμπόμενου

σήματος. Αντίθετα το ρεύμα ανόδου λειτουργεί ως ένα κατανεμημένο σύστημα αναμονής το οποίο χαρακτηρίζεται από το μεγάλο χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση της πληροφορίας ελέγχου από τα σημεία συσσώρευσης στον ελεγκτή του δικτύου που βρίσκεται στη «ρίζα» του δικτύου.

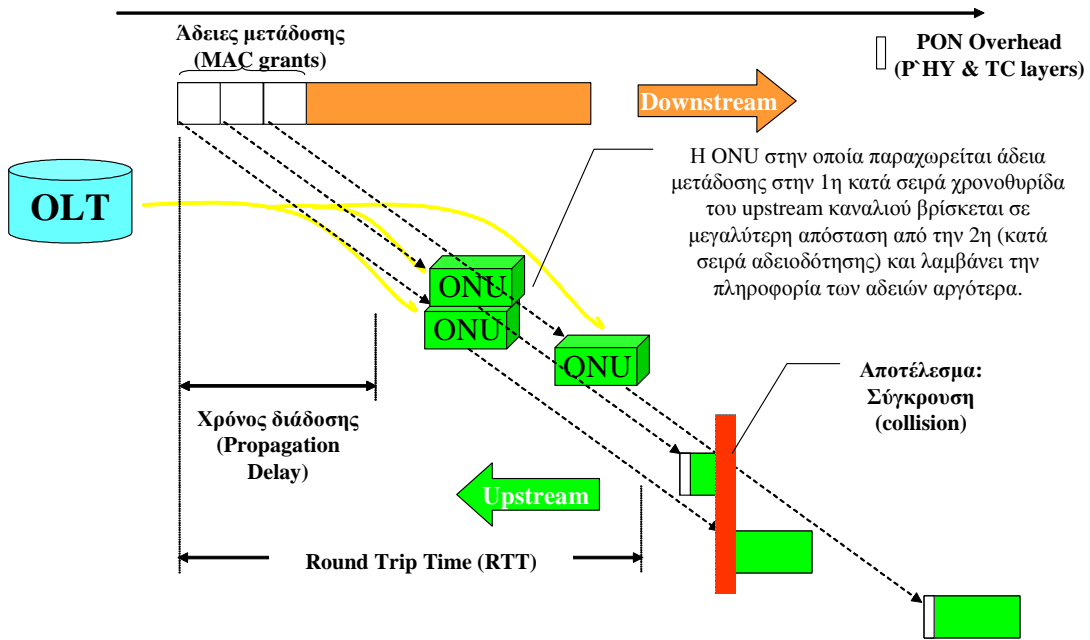
Η μετάδοση από τις ONU στο κανάλι upstream γίνεται με τεχνική TDMA και μόνο κατόπιν αδειών μετάδοσης που προγραμματίζεται και εκπέμπει downstream ο κεντρικός ελεγκτής πρόσβασης που υλοποιείται στην OLT εξασφαλίζοντας τα παρακάτω:

- Δεν υπάρχουν τυχαίες μεταδόσεις δεδομένων
- Δεν υπάρχει πιθανότητα συγκρούσεων (collisions)

Λόγω της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής ενός δικτύου PON οι ONU μπορεί να βρίσκονται σε τυχαίες αποστάσεις από την OLT. Αυτό δημιουργεί προβλήματα στην TDMA τεχνική καθώς ο χρόνος διάδοσης της πληροφορίας ελέγχου (MAC) στις αποστάσεις αυτές δεν είναι αμελητέος (όπως θα ίσχυε ενδεχομένως σε ένα LAN). Επιπλέον οι αποστάσεις και οι ταχύτητες μετάδοσης αποκλείουν τη χρήση μηχανισμών επαναμετάδοσης σε περίπτωση συγκρούσεων. Το ενδεχόμενο πρόβλημα που προκύπτει εάν δεν ληφθούν υπόψη οι μεταβλητοί για κάθε ONU χρόνοι διάδοσης για τον συγχρονισμό και την ομαλή πολύπλεξη των δεδομένων στο κανάλι upstream και στα πλαίσια των χρονοθυρίδων που έχει προσδιορίσει ο κεντρικός ελεγκτής στην OLT φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 28.



(α) Ιδεατή κατάσταση (όλες οι ONU θεωρούνται σε ίσες αποστάσεις και λαμβάνουν τις άδειες με τη σειρά χρόνου που προβλέπεται)

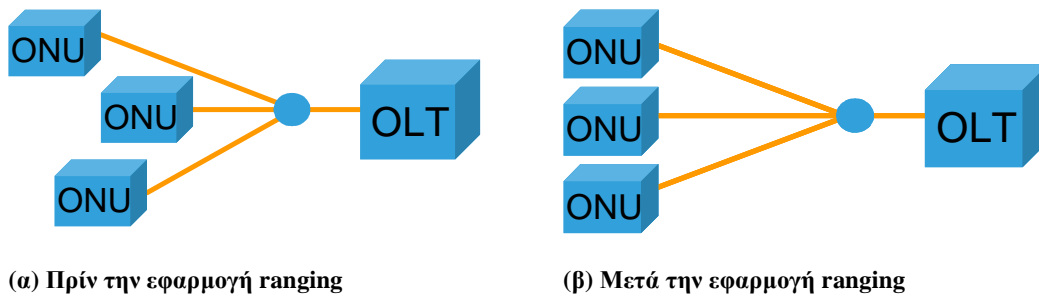


(β) Πραγματική κατάσταση (οι άνισες αποστάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε απρόβλεπτη σειρά χρόνου μετάδοσης και συγκρούσεις στα σημεία συμβολής)

Σχήμα 28: Η αναγκαιότητα της αντιστάθμισης της απόστασης (ranging)

Για να λειτουργήσει η τεχνική TDMA κατά συνέπεια απαιτείται μέθοδος εκτίμησης της κατάλληλης χρονικής απόστασης μεταξύ των μεταδόσεων των ανεξάρτητων ONU. Η μέγιστη δυνατή εξασφάλιση θα ήταν η χρήση διάκενου (guard-band) μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων ίση με τον μέγιστο χρόνο RTT. Η χρησιμοποίηση του καναλιού όμως σε αυτή την περίπτωση θα εκμηδενιζόταν καθώς στις προβλεπόμενες αποστάσεις ο χρόνος RTT είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του χρόνου μετάδοσης (transmission time) των πακέτων (upstream bursts). Συνεπώς απαιτείται ο συγχρονισμός των ONU με μια κοινή αναφορά του χρόνου έναρξης των σχισμών μετάδοσης στο upstream κανάλι

Αυτό γίνεται με την αρχική εκτίμηση της απόστασης (και αντίστοιχα της καθυστέρησης διάδοσης t_d) από κάθε ONU που συνδέεται στο δίκτυο. Τακτικά η μέτρηση επαναλαμβάνεται για τυχόν ολισθήσεις. Στη συνέχεια γίνεται ρύθμιση της μετάδοσης από κάθε ONU που βρίσκεται πλησιέστερα από την μακρυνότερη (t_{max}) ώστε να μεταδίδει με καθυστέρηση κατά την έναρξη ίση με $(t_{max} - t_d)$. Η τεχνική αυτή αντιστάθμισης της απόστασης ονομάζεται ranging και καταλήγει στην ισοδύναμη τοπολογία που φαίνεται στο Σχήμα 29.



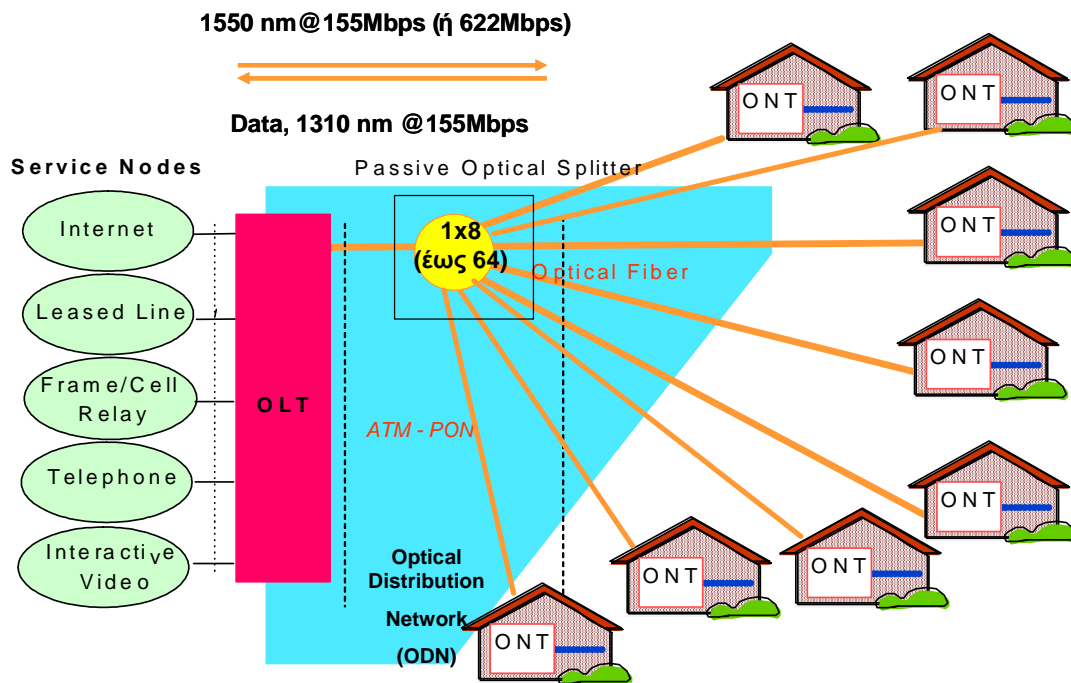
Σχήμα 29: Αντιστάθμιση απόστασης - ranging

4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

4.1 ATM PON (APON) – Broadband PON (BPON)

4.1.1 Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Ο συνδυασμός της τεχνολογίας PON με τον ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) αναπτύχθηκε το 1995 από την FSAN, διότι θεωρήθηκε τότε ως η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις σε υπηρεσίες των διαφόρων χρηστών, οπότε δημιουργήθηκαν τα APON τα οποία υποστήριζαν διάφορες αρχιτεκτονικές όπως τις FTTH, FTTB/C και FTTH/CAB ([14], [15]). Η θεώρηση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι εκείνη την εποχή οι λογικότερες και πιο συμφέρουσες επιλογές ήταν για τον τρόπο μεταφοράς δεδομένων ο ATM και για την τοπολογία των δικτύων πρόσβασης τα δίκτυα PON. Ο ATM θεωρείτο ο καταλληλότερος για να υποστηρίξει πολλαπλά πρωτόκολλα και τα PON η οικονομικότερη ευρυζωνική οπτική λύση. Η πρόταση της FSAN έγινε αποδεκτή ως πρότυπο από την ITU και περιγράφεται στο ITU-T Rec.G.983, όπου δίνονται οι προδιαγραφές για την αρχιτεκτονική, τον εξοπλισμό και τη διαστρωμάτωση του APON, και συγκεκριμένα η περιγραφή του υποστρώματος σύγκλισης μετάδοσης δεδομένων και του φυσικού υποστρώματος.

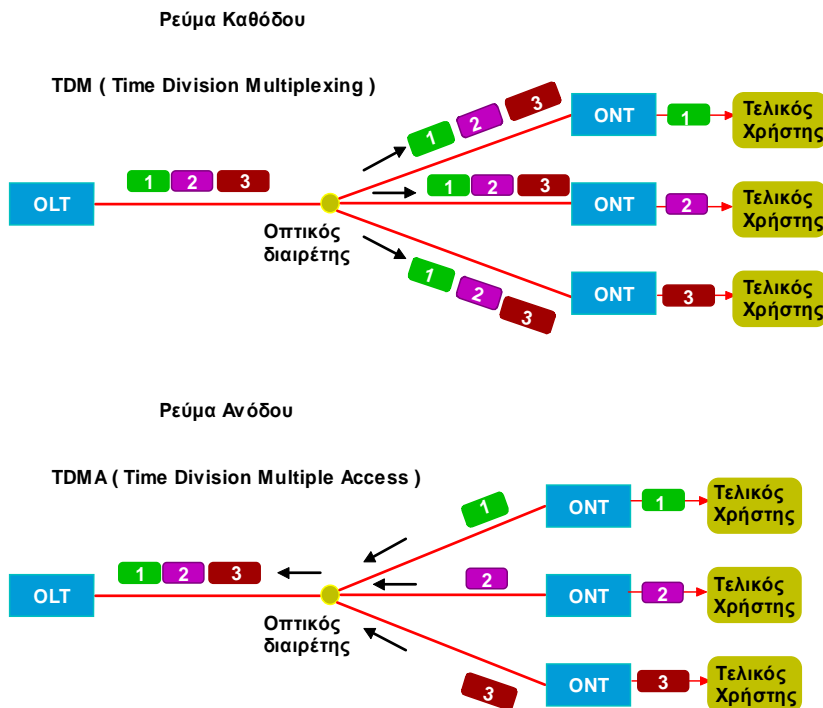


Σχήμα 30: Δίκτυο APON (Καθώς προβλεπόταν κυρίως η αρχιτεκτονική FTTH χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη ονομασία ONT αντί ONU κατά τα πρότυπα του ISDN)

Στο APON με κριτήρια την απλότητα και το κόστος επιλέχθηκαν η τεχνική TDM για την προς τα κάτω (downstream) ζεύξη και για την πολλαπλή προσπέλαση στο μέσο για την προς τα άνω (upstream) ζεύξη η TDMA τεχνική. Στο Σχήμα 30 φαίνονται τα βασικά στοιχεία του δικτύου: OLT, ONU/ONT και παθητικός οπτικός διαιρέτης. Στο APON μία οπτική ίνα διαιρείται παθητικά μέχρι και 64 φορές με αποτέλεσμα 64 ONU/ONT να μοιράζονται τη χωρητικότητα της. Η παθητική διαίρεση επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται το εύρος ζώνης και κατ' επέκταση το κόστος. Το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο με την ελάττωση του αριθμού των οπτο-ηλεκτρονικών στοιχείων που

απαιτούνται για το OLT δεδομένου ότι μία διεπαφή μοιράζονται περισσότερα του ενός ONU/ONT.

Το APON χρησιμοποιεί τοπολογία διπλού αστέρα. Ο πρώτος αστέρας βρίσκεται στο OLT όπου η διεπαφή του δικτύου ευρείας ζώνης για τις υπηρεσίες διαιρείται λογικά και οδηγείται στη διεπαφή ATM-PON. Ο δεύτερος αστέρας υλοποιείται στον διαιρέτη όπου η πληροφορία διαιρείται παθητικά και οδηγείται σε κάθε ONT. Το OLT, που τοποθετείται στο κέντρο μεταγωγής, είναι το σημείο διασύνδεσης μεταξύ του Δικτύου Πρόσβασης και των σημείων υπηρεσιών στο δίκτυο κορμού (backbone). Όταν δεδομένα από το δίκτυο φθάνουν στο OLT οδηγούνται στον παθητικό διαιρέτη χρησιμοποιώντας την τεχνική TDM (Σχήμα 31). Το OLT λειτουργεί ως ATM τελικός μεταγωγέας με ATM-σύγχρονη οπτική (SONET) διεπαφή από την πλευρά του δικτύου κορμού και ATM-PON διεπαφή από την πλευρά του συνδρομητή.



Σχήμα 31: Ρεύμα ανόδου – καθόδου δικτύου APON

Το κάθε ONT φιλτράρει τα κελιά που φθάνουν και ανακτά μόνο αυτά που προορίζονται για αυτό. Κάθε κελί έχει ένα 28-bit πεδίο που καθορίζει τις τιμές που αφορούν στη νοητή διαδρομή και στο νοητό διάυλο, που αναφέρονται ως VPI/VCI. Κάθε OLT αρχικά στέλνει ένα μήνυμα στο ONT για να το προετοιμάσει να δεχτεί κελιά με συγκεκριμένες τιμές VPI/VCI. Τα πεδία VPI/VCI, της επικεφαλίδας του πακέτου ATM, χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της πολυπλεξίας πακέτων σε μια κοινή ζεύξη.

Στο APON χρησιμοποιείται μία οπτική ίνα τόσο για το upstream όσο και για το downstream κανάλι οπότε χρησιμοποιούνται δύο μήκη κύματος-1550 nm για το downstream κανάλι και 1310nm για το upstream κανάλι. Συμπληρωματικά αναφέρουμε ότι θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα μήκος κύματος η επιλογή όμως για δύο παρέχει καλύτερη οπτική απομόνωση για τους πομπούς και τους δέκτες laser και εξαλείφει την ανάγκη των ακριβών διαιρετών δέσμης φωτός.

Τα κελιά ATM μετατρέπονται απευθείας σε οπτικό κύμα και στέλνονται στο δίκτυο PON. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο ηλεκτροοπτικό εξοπλισμό, ειδικό για τη

μετάδοση κίνησης σε ταχύτητες Mbit/sec. Επιπλέον δεδομένου ότι υπάρχουν καθοδικά κανάλια κοινοποίησης (broadcast channels) στα PON χρησιμοποιούνται τεχνικές κρυπτογράφησης για να επιτευχθεί ασφάλεια.

Το APON δεν εξαρτάται από τις διάφορες υπηρεσίες με αποτέλεσμα να μπορούν να υλοποιηθούν τόσο οι κλασικές όσο και μελλοντικές υπηρεσίες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι μπορεί να μεταφέρει πακέτα Ethernet και να υποστηρίζει T1.

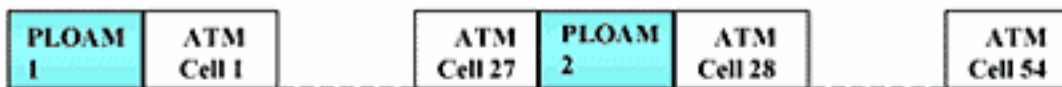
Τέλος, θα πρέπει να αναφερθούμε στον όρο Broadband PON (BPON) που με την πάροδο του χρόνου εισήχθη και χρησιμοποιείται, είναι ταυτόσημος με τον όρο APON με τη μοναδική διαφοροποίηση ότι περιγράφονται δίκτυα που έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν επιπλέον ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως υπηρεσίες video.

4.1.2 Δομή πλαισίων και έλεγχος πρόσβασης (MAC)

Τα δίκτυα APON εφαρμόζουν τις συνήθεις μεθόδους πολύπλεξης στα δίκτυα PON που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.1. Η πολύπλεξη των δεδομένων υποστηρίζει μόνο την τεχνολογία ATM και ορίζονται αντίστοιχα μεγέθη σχισμών μετάδοσης και τεχνικές ανάθεσης διευθύνσεων (MAC) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Η τεχνική TDMA εφαρμόζεται σε χρονοθυρίδες διάρκειας 53Bytes (data payload).
- Οι διευθύνσεις στο επίπεδο MAC αναφέρονται στο αναγνωριστικό της ONT: Transmit Enable Address/Terminal Endpoint Address (TEA)
 - Μήκος TEA 6bit, μέχρι 64 ONT
- Υποστηρίζονται επιπλέον 4 κλάσεις υπηρεσιών (ονομάζονται T-CONT Traffic Containers) συμβατά με τα πρότυπα του ATM
- Περαιτέρω πολύπλεξη ροών σε κάθε ONT βασίζεται στο αναγνωριστικό σύνδεσης VPI/VCI που εγκαθίσταται σε επίπεδο ATM. Αντίστοιχη μεταγωγή δεδομένων (ATM) προς το δίκτυο κορμού

Η μετάδοση στη ροή καθόδου γίνεται με ενθυλάκωση ATM cells σε μια μορφή πλαισίου η οποία επαναλαμβάνεται περιοδικά και έχει τη δομή που φαίνεται στο Σχήμα 35. Καθώς το πλαίσιο περιλαμβάνει 56 ATM cells (53 Bytes χρήσιμη πληροφορία) με ρυθμό μετάδοσης 155Mbps ο ρυθμός επανάληψής του είναι 152,67μsec (ανάλογα στην περίπτωση ρυθμού 622Mbps).



Σχήμα 32: Δομή πλαισίου στο ρεύμα καθόδου δικτύου APON

Τα PLOAM cells είναι ειδικής χρήσης και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο πολλαπλής πρόσβασης των ONT. Περιλαμβάνουν:

- 53 Άδειες μετάδοσης (προσδιορίζοντας και το μελλοντικό πλαίσιο στο ρεύμα ανόδου)
- 12 ειδικά μηνύματα
- CRC
- πληροφορία συγχρονισμού

Συνεπώς η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα της ροής καθόδου για μετάδοση δεδομένων μειώνεται στα: $155 \cdot 54 / 56 = 149,97$ Mbps. Ο προγραμματισμός αδειών αφήνεται στη βούληση της κάθε υλοποίησης να χρησιμοποιήσει κατάλληλο αλγόριθμο με χρήση των μηχανισμών που προβλέπει το πρότυπο.



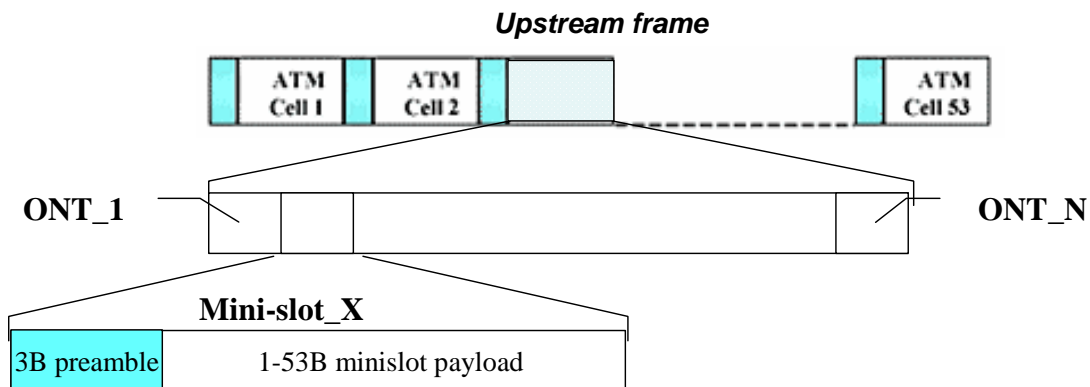
Σχήμα 33: Δομή πλαισίου στο ρεύμα ανόδου δικτύου APON

Upstream frame: 53 ATM cells (*56 Bytes) @155Mbps = 152,67μsec

Αντίστοιχα η μετάδοση στη ροή ανόδου γίνεται με TDMA πολύπλεξη σε χρονοθυρίδες μήκους 56 Bytes (3 Bytes preamble και payload 1 ATM cell) από κάθε ONT που έχει προηγουμένως λάβει άδεια στο προηγούμενο πλαίσιο στη ροή καθόδου (Σχήμα 36). Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα καναλιού καθόδου μειώνεται στα: $155 \cdot 53 / 56 = 149,19$ Mbps.

Εάν ο προγραμματισμός αδειών ήταν προκαθορισμένος στατικά στο χρόνο, αυτό θα αντιστοιχούσε σε μια υπηρεσία σταθερού ρυθμού (μισθωμένη γραμμή – leased line). Το πρότυπο προβλέπει την ειδική χρήση (κατά βούληση) σχισμών του καναλιού upstream για την μετάδοση αιτήσεων από συγκεκριμένες κάθε φορά ONU.

Δυναμικά επίσης ο ελεγκτής πρόσβασης (MAC controller) στην OLT μπορεί να δεσμεύει χρονοθυρίδες στο πλαίσιο ανόδου για την συλλογή αιτήσεων για δυναμική δέσμευση επιπλέον εύρους ζώνης με τη μέθοδο των μικροσχισμών. Για εξοικονόμηση εύρους ζώνης χρησιμοποιείται η μέθοδος των μικροσχισμών όπου πολλαπλά ONT μπορούν να μεταδώσουν αιτήσεις στη διάρκεια μιας κανονικής σχισμής «διάρκειας» 56Byte. Η δομή του πλαισίου όταν περιλαμβάνονται και χρονοθυρίδες διαιρεμένες σε μικροσχισμές προς μετάδοση αιτήσεων φαίνεται στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34: Δομή πλαισίου στο ρεύμα ανόδου δικτύου APON

4.1.3 Οφέλη των APON

Η συντήρηση της οπτικής ίνας είναι οικονομικότερη από αυτή των συστημάτων που βασίζονται στο χαλκό με αποτέλεσμα οι παροχείς να μειώνουν το κόστος και να αυξάνεται το κέρδος τους ή να έχουν τη δυνατότητα να χαμηλώνουν τις τιμές με αποτέλεσμα να γίνονται πιο ανταγωνιστικοί.

Στα ATM-PON οι οπτικές διεπαφές βρίσκονται στα OLT οπότε μία μόνο ίνα χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει μέχρι 64 τελικές τοποθεσίες χρηστών. Συνεπώς

έχουμε μείωση των οπτικών διεπαφών από 64 σε 1 σε σχέση με τα σημείο – προς – σημείο (point-to-point) οπτικά συστήματα.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι στα APON πραγματοποιείται συσσώρευση κελιών ATM στα OLT. Η συσσώρευση αυτή επιτρέπει στους παροχείς να εξυπηρετούν πολύ περισσότερους χρήστες από ότι στην περίπτωση που θα χρησιμοποιούνταν μόνο τεχνικές βασισμένες στο TDM. Έχει υπολογιστεί ότι η τεχνολογία APON μπορεί να είναι από 20 έως 40 τα εκατό οικονομικότερη από συστήματα πρόσβασης με κυκλώματα. Η οικονομία οφείλεται στην προαναφερθείσα συγκέντρωση του ATM και τη στατιστική πολυπλεξία σε συνδυασμό με την από κοινού χρήση των ενεργητικών οπτοηλεκτρονικών εξαρτημάτων μεταξύ των διαιρετών.

Επιπλέον επειδή τα ONT μοιράζονται την ίδια ίνα και οπτικό διαιρέτη, μοιράζονται κατ' επέκταση και το εύρος ζώνης οπότε με κατάλληλα δυναμικής ανάθεσης του εύρους ζώνης πρωτόκολλα είναι δυνατό να εξυπηρετεί ο παροχέας ακόμα περισσότερους χρήστες.

Το APON έχει ως πυρήνα την τεχνολογία ATM συνεπώς ένα απλό σύστημα διαχείρισης μπορεί να προβλέψει το απαιτούμενο εύρος από άκρο σε άκρο. Ακόμα κρίνεται εύκολη η αύξηση του εύρους ζώνης μιας δεδομένης ζεύξης αν αυτό απαιτηθεί μελλοντικά. Επιπλέον μπορεί να εξυπηρετήσει σχεδόν κάθε επιθυμητή υπηρεσία.

Τέλος τα ενεργητικά εξαρτήματα του APON τοποθετούνται στο κτήριο του πελάτη ή στο κέντρο μεταγωγής και όχι σε εξωτερικά εγκατεστημένα τερματικά. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφονται οι δαπάνες για συστήματα εφεδρικών μπαταριών και τα ενεργητικά στοιχεία που πρέπει να είναι ανθεκτικά στις μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας.

4.2 EPON

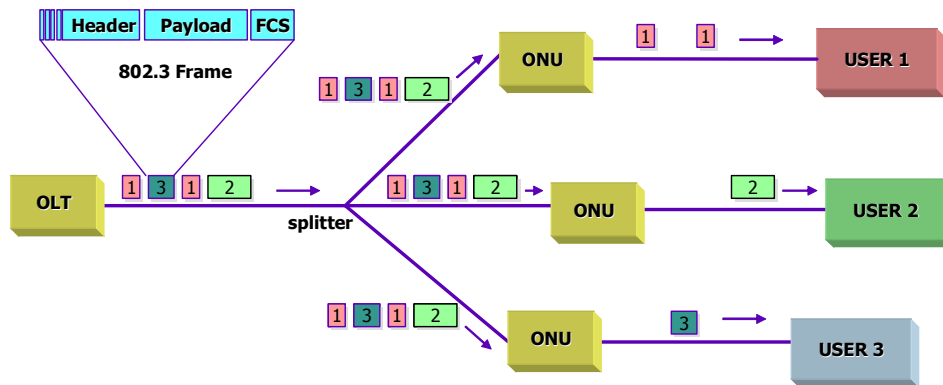
4.2.1 Χαρακτηριστικά

Με το πέρασμα του χρόνου το APON θεωρήθηκε ως ακατάλληλη λύση για τον τοπικό βρόχο εξαιτίας της αδυναμίας του να υποστηρίξει υπηρεσίες video, το ανεπαρκές του εύρος, την πολυπλοκότητά του και το κόστος του. Η ευρεία χρήση του Ethernet έδινε την εντύπωση ότι η χρήση των Ethernet-PON (EPON) θα εξάλειφε την ανάγκη για μετατροπή από ATM σε IP πρωτόκολλο στην σύνδεση WAN/LAN. Οι κατασκευαστές EPON εστίαζαν αρχικά στην ανάπτυξη FTTB και FTTC λύσεων με μακροπρόθεσμο στόχο την ανάπτυξη μίας FTTH λύσης για τη διανομή δεδομένων, video και φωνής πάνω από την ίδια πλατφόρμα. Το EPON παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ελάττωση κόστους και ευρύτερες υπηρεσίες από το APON ενώ η αρχιτεκτονική του είναι παρόμοια και κληρονομεί πολλά χαρακτηριστικά του G.983 που αφορά στα APON ([19]).

Η κύρια διαφορά μεταξύ APON και EPON είναι ότι τα δεδομένα στο EPON μεταφέρονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 1518 bytes σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3 για το Ethernet. Ενώ στο APON σε κελιά ATM των 53 bytes όπως επιβάλλεται από το πρωτόκολλο ATM, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δύσκολη και όχι αποδοτική η μεταφορά σε ένα δίκτυο APON κίνησης που βασίζεται στο IP όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα μεταβλητού μήκους ως και 65535 bytes. Για να μεταφερθεί η IP κίνηση στο APON τα πακέτα θα πρέπει να κατατμηθούν σε κομμάτια των 48-bytes και στο κάθε ένα από αυτά να προσαρτηθεί επικεφαλίδα ATM των 5-bytes. Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, πολύπλοκη και προσθέτει επιπλέον κόστος στα ONT και OLT. Επιπλέον για κάθε τμήμα δεδομένων των 48-bytes έχουμε σπατάλη

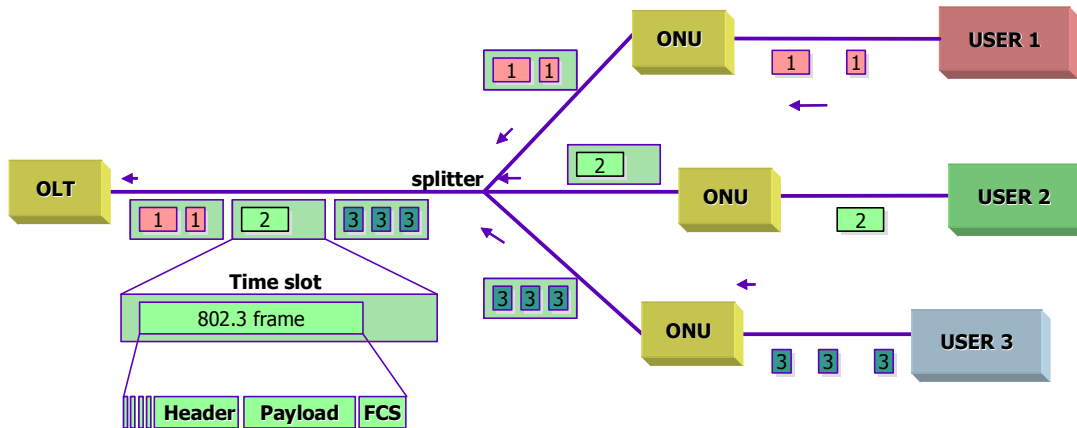
εύρους 5-bytes. Αντίθετα το Ethernet είναι φτιαγμένο για να καλύψει κίνηση IP και μειώνει δραστικά τις επικεφαλίδες σε σχέση με το ATM.

Στο EPON η διαδικασία εκπομπής δεδομένων προς τα κάτω από το OLT στα ONU είναι διαφορετική από την αντίστοιχη προς τα άνω. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 35 τα δεδομένα εκπέμπονται από το OLT προς τα ONU σε πακέτα μεταβλητού μήκους με μέγιστο μήκος 1518 bytes, σύμφωνα με το πρωτόκολλο της IEEE 802.3. Κάθε πακέτο φέρει μία επικεφαλίδα που καθορίζει το ONU στο οποίο προορίζεται το πακέτο. Επιπλέον κάποια πακέτα είναι δυνατό να προορίζονται για όλα τα ONU (broadcast packets) ενώ άλλα για μία δεδομένη ομάδα ONU (multicast packets).



Σχήμα 35: Ρεύμα καθόδου δικτύου EPON

Όσον αφορά την προς τα άνω ζεύξη η λειτουργία της οποίας συνοψίζεται Σχήμα 36, χρησιμοποιείται τεχνική TDM, κατά την οποία χρονικές σχισμές εκπομπής ανατίθενται σε κάθε ONU. Οι χρονικές σχισμές είναι συγχρονισμένες έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις όταν τα πακέτα από διαφορετικά ONU συνδυάζονται στην κοινή ίνα.

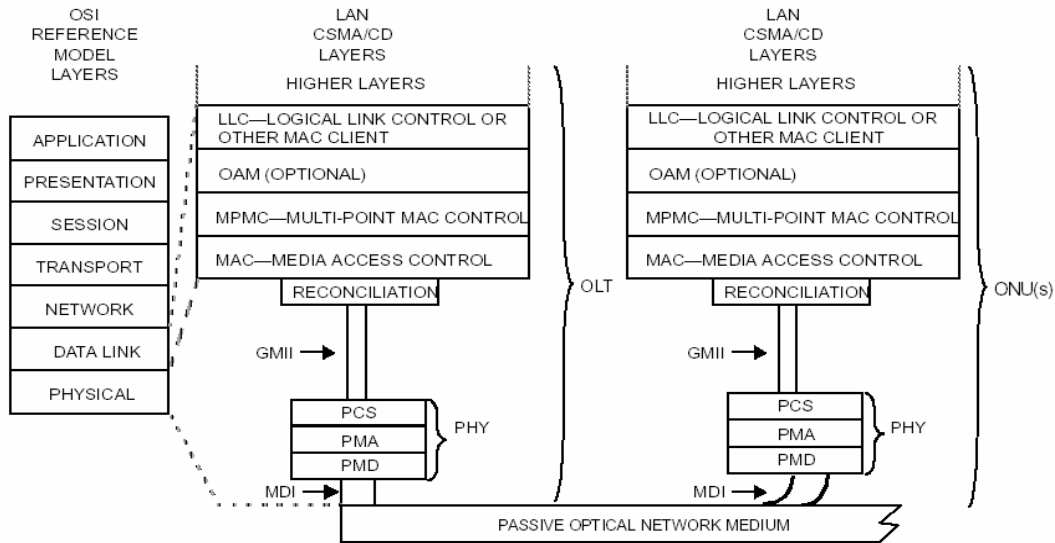


Σχήμα 36: Ρεύμα ανόδου δικτύου EPON

4.2.2 Στοιβά πρωτοκόλλων και λειτουργία

Η στοιβά πρωτοκόλλων του EPON είναι πλήρως συμβατή με την αρχιτεκτονική διαστρωμάτωσης των προδιαγραφών IEEE 802.3. Η λειτουργία του βασίζεται στην αναγκαία προσαρμογή των πρωτοκόλλων όπως έχουν προκύψει από τα τοπικά δίκτυα Ethernet για να καλύψουν τις νέες απαιτήσεις λόγω της τοπολογίας και των ιδιοτήτων στις τεχνικές μετάδοσης του EPON με κύρια επίδραση στα χαμηλότερα

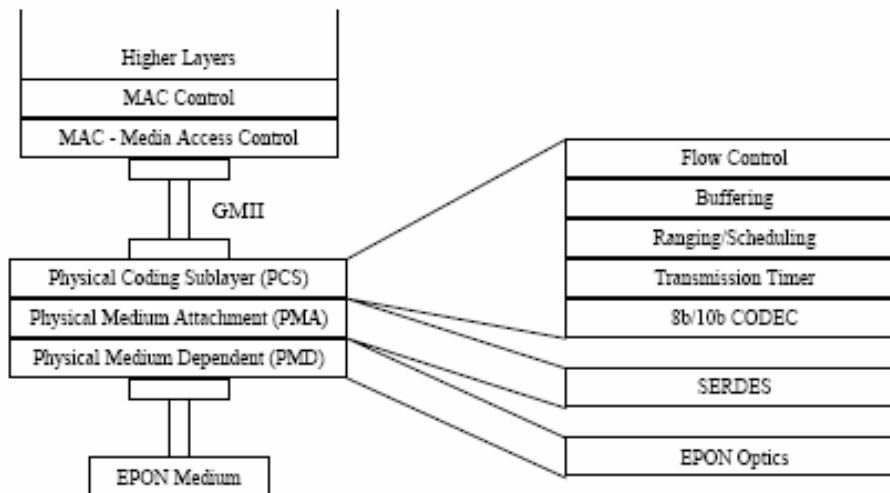
στρώματα (φυσικό και υπόστρωμα ελέγχου πολλαπλής προσπέλασης) όπως φαίνεται στο Σχήμα 37.



Σχήμα 37: Στοιβα πρωτοκόλλων EPON

4.2.2.1 Λειτουργίες φυσικού στρώματος

Το φυσικό στρώμα όπως είδαμε υποδιαιρείται σε τρία επί μέρους υπο-στρώματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 38.



Σχήμα 38: Λειτουργίες φυσικού στρώματος EPON

4.2.2.1.1 Physical Coding Sublayer (PCS)

Αποτελεί το υπόστρωμα όπου υλοποιείται η κατάλληλη κωδικοποίηση γραμμής (line coding) σύμφωνα με τον κώδικα 8b/10b και αποστολή της συμβολοσειράς δεδομένων ως κατάλληλα διαμορφωμένης ηλεκτρονικής παλμοσειράς. Εκτελεί επίσης έναν αριθμό λειτουργιών για την ομαλή ροή των δεδομένων πάνω από το δίκτυο:

Έλεγχος Ροής (Flow Control)

- Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο 802.3x για να διακόπτει τη ροή πακέτων

- Αποτρέπει την υπερχείλιση των ενταμιευτών όταν βρίσκεται σε κατάσταση «pause» μεταξύ ευκαιριών μετάδοσης

Ενταμίευση (Buffering)

- Προσαρμογή ρυθμών ροής (rate matching)
- Πρέπει να είναι δυνατή η ενταμίευση τουλάχιστον ενός πακέτου μέγιστου μήκους

Χρονιστής μετάδοσης (Transmission Timer)

- Προσδιορίζει με ακρίβεια την έναρξη μεταδόσεων (transmission bursts)
- Επιτρέπει τη μέγιστη χρησιμοποίηση του καναλιού
- Εξασφαλίζει την επάρκεια της σχισμής που έχει εγκριθεί σε σχέση με το μέγεθος του πακέτου προς μετάδοση
- Αποτρέπει την παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών πομπών

4.2.2.1.2 Physical Medium Attachment (PMA)

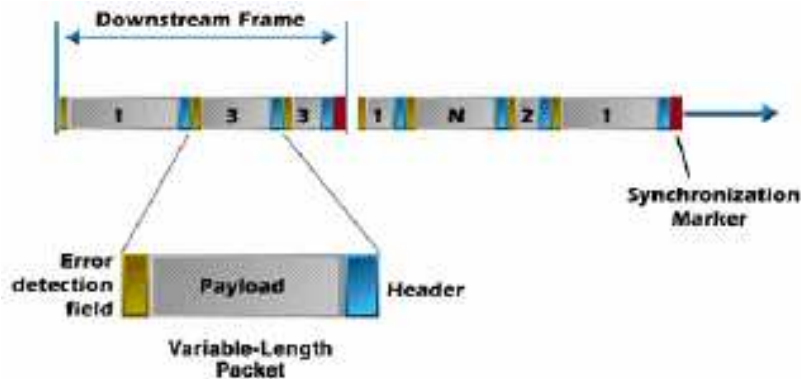
Αποτελεί μια απλή σειριακή διεπαφή για την αποστολή των υψίσυχνων σημάτων στον οπτικό διαμορφωτή και αντίστροφα.

4.2.2.1.3 Physical Medium Dependent (PMD)

Περιλαμβάνει τις προδιαγραφές λειτουργίας του οπτικού διαμορφωτή και όλα τα χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος μετάδοσης.

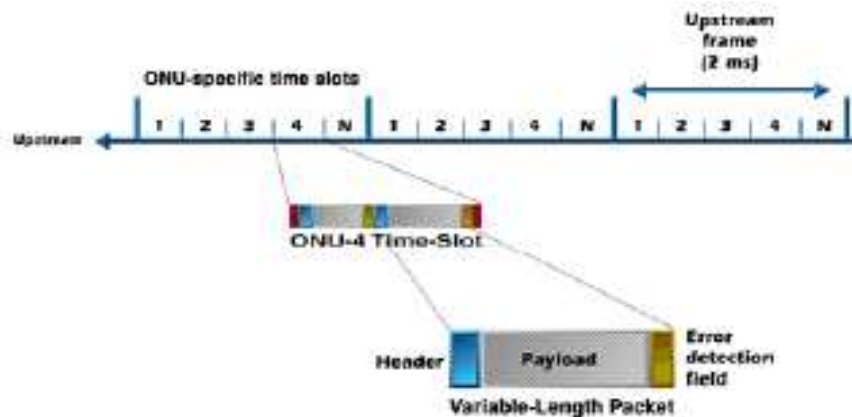
4.2.2.2 Δομή πλαισίων μετάδοσης και πολυπλεξία

Τα πλαίσια (frames) δεδομένων στο EPON είναι συμβατά (πλην μίας τροποίησης η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια) με το πρωτόκολλο IEEE 802.3 και αποτελούν συνένωση ενός ή περισσοτέρων Ethernet frames σε ένα πλαίσιο με την προσθήκη μιας επικεφαλίδας συγχρονισμού (synchronization marker, 1-byte κάθε 2 ms για τον συγχρονισμό των ONUs με την OLT), όπως φαίνεται στο Σχήμα 39



Σχήμα 39: Πλαίσια στο ρεύμα καθόδου δικτύου EPON (Downstream frame)

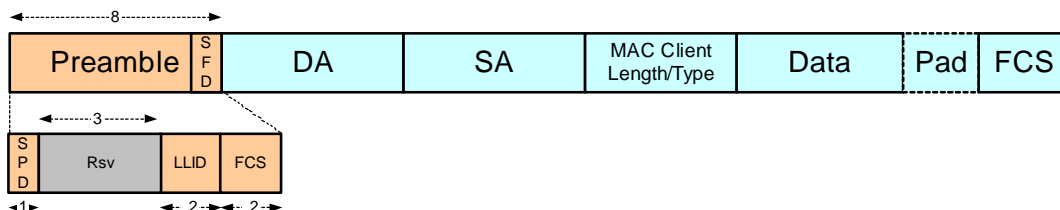
Παρομοίως τα πλαίσια δεδομένων Upstream υποδιαιρούνται σε χρονοσχισμές (slots) αφιερωμένες σε κάθε μία από τις ONU που είναι ενεργές στο δίκτυο. Κάθε ONU μπορεί να μεταδώσει ένα ή και περισσότερα Ethernet frames στη διάρκεια της αντίστοιχης σχισμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 40



Σχήμα 40: Πλαίσια στο ρεύμα ανόδου δικτύου EPON (Upstream frame)

Αντί να χρησιμοποιούνται επιπλέον επικεφαλίδες ενθυλάκωσης το EPON τοποθετεί την αναγκαία πληροφορία πλαισίου (PON-tag) στο πεδίο Preamble της δομής του πλαισίου 802.3. Καθώς η οπτική ίνα είναι μονοκατευθυντικό μέσο δεν απαιτείται η συνήθης χρήση του. Αυτό αποτελεί μεν παραβίαση του πρωτοκόλλου, η οποία όμως είναι καθ'όλα επιτρεπτή στα όρια λειτουργίας του συγκεκριμένου δικτύου! Η δομή του τροποποιημένου πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 41 και τα πεδία έχουν την παρακάτω χρήση:

- SPD: Start Packet Delimiter. Έχει μήκος 1 byte, σταθερή τιμή 0xD5 και χρησιμοποιείται για ευθυγράμμιση πλαισίου.
- LLID: Logical Link ID. Τα 15 LSB (Least Significant Bits) LLID[14:0] χρησιμοποιούνται ως αναγνωριστική διεύθυνση ONU (μία ανά ONU ή και περισσότερες), ενώ το MSB χρησιμοποιείται ως Mode bit (0 υποδεικνύει ONU MAC, 1 OLT MAC). Η διεύθυνση 0x7FFF δεσμεύεται ως διεύθυνση broadcast.
- FEC: Forward Error Correction. Αποτελεί το αποτέλεσμα εφαρμογής ενός κώδικα κυκλικού ελέγχου σφάλματος με χρήση πολυωνύμου 8-bit (CRC-8).

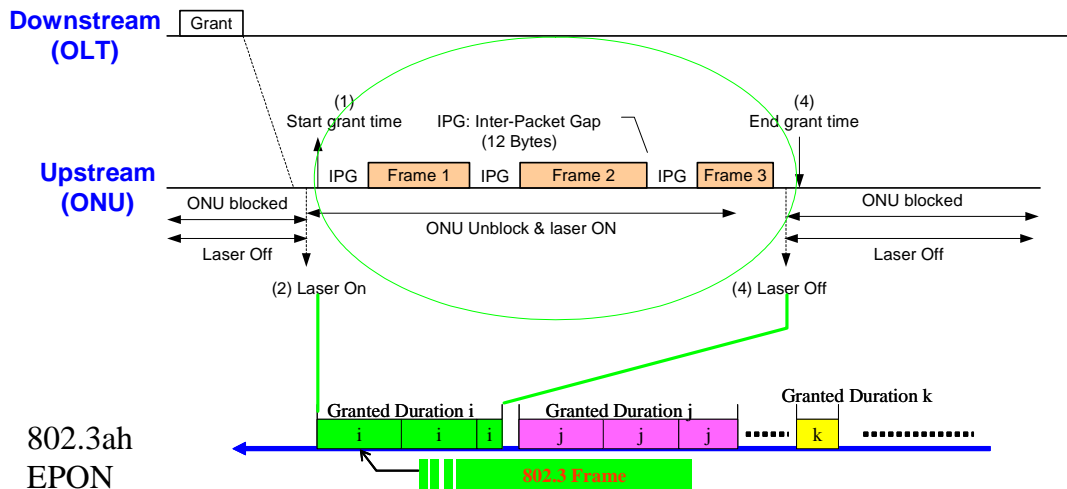


Σχήμα 41: Τροποποιημένη δομή πλαισίου 802.3 στα δίκτυα EPON

Η λειτουργία του EPON βασίζεται σε μερικά βασικά χαρακτηριστικά

- Απόδοση αδειών προς μετάδοση στο κανάλι upstream
- Αναγνώριση/αρχικοποίηση ONU (discovery/ID assignment)
- Περιοδικός έλεγχος ενεργών ONU
- Κατανομή εύρους ζώνης (Bandwidth allocation)
- Ασφάλεια (Security) (δεν προδιαγράφεται από το 802.3ah standard)
- Αντιμετώπιση σφαλμάτων (Error handling)

Για την λειτουργία του αναπτύχθηκε το πρωτόκολλο MPCP (Multipoint Control protocol) το οποίο προδιαγράφει συγκεκριμένα μηνύματα που μεταδίδονται ως εμβόλιμα στη ροή δεδομένων πλαίσια Ethernet σταθερού μεγέθους 64 Bytes. Τα μηνύματα MAC μεταφέρονται όμοια με τα πακέτα δεδομένων. Όπως προαναφέρθηκε η πολύπλεξη των δεδομένων βασίζεται στην τεχνική TDMA. Στη ροή ανόδου κάθε ONU μεταδίδει Ethernet frames μόνο σε κάθε αφιερωμένη σε αυτή –από την OLT- σχισμή. Η OLT υποδεικνύει πότε μπορεί να ξεκινήσει μετάδοση (Gigabit Ethernet) στο οπτικό μέσο (burst transmission). Η παραπάνω τεχνική έχει σαν αποτέλεσμα τον πλήρη έλεγχο της λειτουργίας του οπτικού πομπού (laser) κάθε ONU από την OLT σύμφωνα με τα μηνύματα επικοινωνίας του πρωτοκόλλου MPCP. Η διακοπτόμενη αυτή λειτουργία και εκπομπή σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (slots) ονομάζεται “εκρηκτική μετάδοση” (burst mode transmission).



Σχήμα 42: Εκρηκτική μετάδοση στη ροή ανόδου (upstream burst mode transmission)

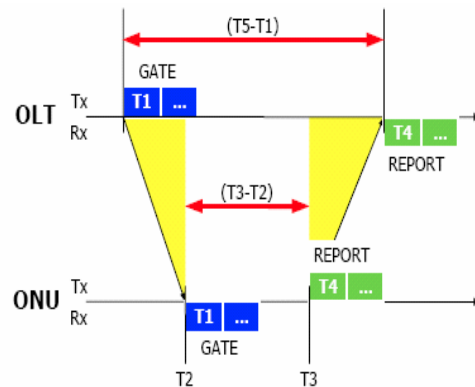
Για να λειτουργήσει αυτός ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης προβλέπεται η αναγκαία αποτίμηση της απόστασης (ranging) και η απόδοση σχισμών χρόνου για την είσοδο νέων ONU με τη μέθοδο του ανταγωνισμού (contention). Στατιστική πολυπλεξία επιτυγχάνεται με τη χρήση (απόδοση από την OLT) μεταβλητού μεγέθους σχισμών ανάλογα με τις απαιτήσεις (στατικά υπολογισμένες ή δυναμικά κατόπιν αιτήσεων) μετάδοσης δεδομένων.

4.2.2.2.1 Εκτίμηση καθυστέρησης (RTT measurement) και εξισορρόπηση καθυστέρησης (Ranging)

Για την εκτίμηση της καθυστέρησης διάδοσης και συνεπώς της απόστασης κάθε ONU κατά την ενεργοποίηση αυτή προηγείται η ανταλλαγή συγκεκριμένων μηνυμάτων (πρωτόκολλο MPCP) τα οποία επιτυγχάνουν τον συγχρονισμό των ONU μεταξύ τους (delay compensation) και με τον χρόνο αναφοράς της OLT. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια (Σχήμα 43):

- Η OLT στέλνει άδεια (μήνυμα GATE) στον (απόλυτο) χρόνο T1
- Η ONU το λαμβάνει στο χρόνο T2, and συγχρονίζει (reset) το ρολόι της στον χρόνο T1
- Η ONU στέλνει μήνυμα (REPORT) στο χρόνο T3 την ένδειξη (timestamp) T4
- Η OLT λαμβάνει το μήνυμα στον (απόλυτο) χρόνο T5 και υπολογίζει τον χρόνο διάδοσης μέχρι την ONU (μετ' επιστροφής, RTT)

- Ο χρόνος RTT εκφράζεται απευθείας από τη διαφορά T5-T4 (η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την OLT χρησιμοποιώντας την τιμή του τοπικού ρολογιού και αφαιρώντας την τιμή που περιλαμβάνεται στο μήνυμα REPORT που έχει λάβει).

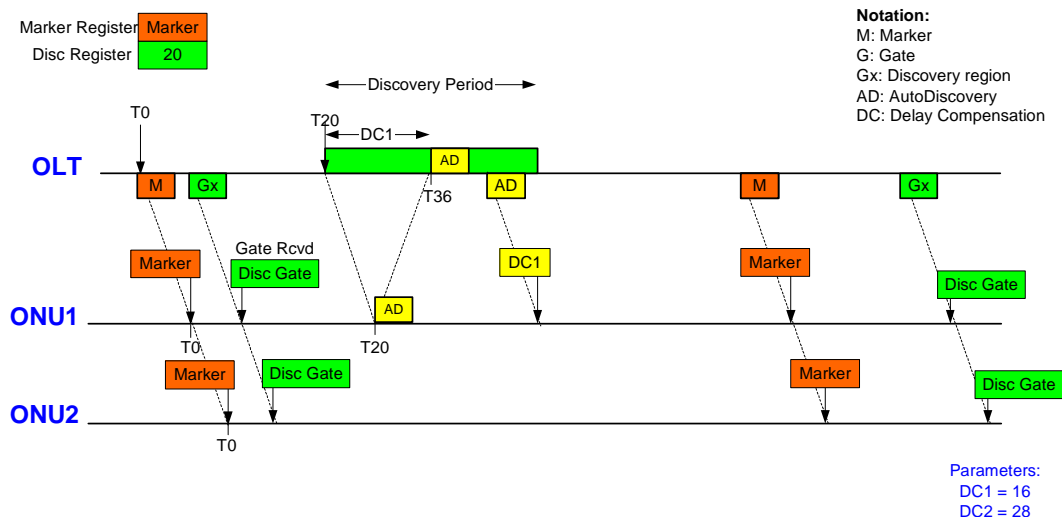


$$RTT = T2 - T1 + T5 - T3 \quad \text{AND} \quad T3 - T2 = T4 - T1$$

$$\Rightarrow RTT = T5 - T4$$

Σχήμα 43: Εκτίμηση καθυστέρησης (RTT measurement)

Η παραπάνω διαδικασία εισάγει την αναγκαία χρονική υστέρηση (delay compensation) στην ανταπόκριση κάθε ONU στις μελλοντικές άδειες για μετάδοση στα όρια συγκεκριμένων χρονοθυρίδων σύμφωνα με τον τοπικό χρόνο που αναγγέλει η OLT. Εκτελείται την πρώτη φορά που ενεργοποιείται μια νέα ONU στο δίκτυο και για το λόγο αυτό προβλέπονται ειδικές διαδικασίες (Discovery region) για την ανίχνευση νέων ONU οι οποίες δεν έχουν ρυθμιστεί για να συμμετέχουν στην κανονική διαδικασία ελέγχου πρόσβασης. Ένα παράδειγμα χρονικής εξέλιξης αυτής της διαδικασίας παριστάνεται στο Σχήμα 44 (η ακριβής χρήση των μηνυμάτων συμπεριλαμβάνεται στην αντίστοιχη ενότητα παρουσίασης του πρωτοκόλλου MPCP).



Σχήμα 44: Εξισορρόπηση καθυστέρησης (ONU Ranging)

4.2.2.2 Μηχανισμός αιτήσεων (Reservation)

Η πρόσβαση στο κανάλι upstream ελέγχεται από την OLT. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο ειδικά πακέτα/τύποι μηνυμάτων (MAC control frames) που μεταφέρουν χρονική σήμανση (timestamp):

- **Άδειες (Grants) από την OLT στις ONU**
 - Αποτελούν μηνύματα που προσδιορίζουν τους κανόνες πρόσβασης (κατανομή χρόνου μετάδοσης στο κανάλι upstream κλπ.)
- **Αιτήσεις-ενημέρωση κατάστασης (Reports) από τις ONU στην OLT**
 - Αποτελούν αιτήσεις για δέσμευση επιπλέον εύρους ζώνης

Η χρήση του καναλιού upstream περιλαμβάνει τρεις φάσεις (regions)

- **Discovery regions:**
 - Στοχεύει στην αναγνώριση και κατάλληλη διαμόρφωση πρόσφατα ενεργοποιημένων ONUs, για τις οποίες πρέπει να προηγηθεί η διαδικασία ranging
- **Contention regions:**
 - Μετάδοση με ανταγωνισμό για ONUs οι οποίες προηγουμένως δεν είχαν άλλη ανταλλαγή reports
- **Reserved regions:**
 - Δεσμευμένες σχισμές για μετάδοση ανά ONU

Η OLT στις συγκεκριμένες διαδικασίες εκτελεί τις παρακάτω λειτουργίες:

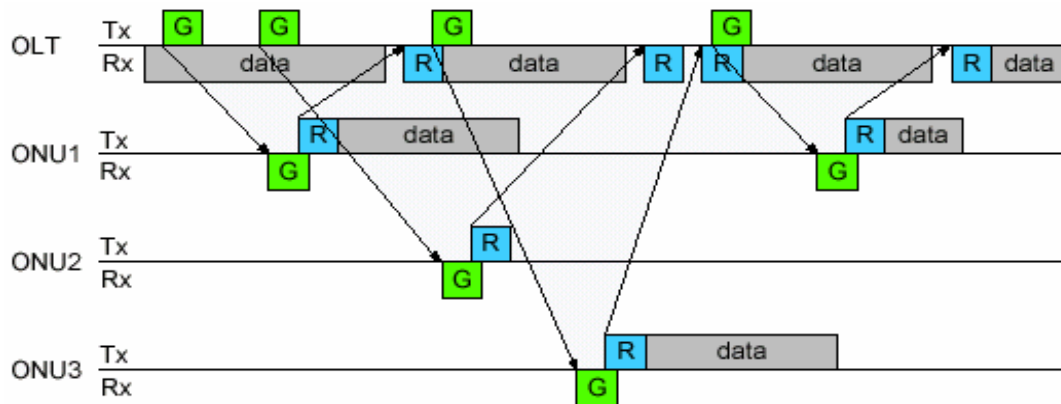
- Γέννηση μηνυμάτων με χρονικά σήμαντρα (timestamps) για καθολικό συγχρονισμό (global time reference)
- Γέννηση παραθύρων ανίχνευσης νέων ONUs (discovery windows) προς εξισορρόπηση καθυστέρησης (ranging)
- Εκτελεί εξισορρόπηση καθυστέρησης (ranging) και υπολογισμό της τιμής αντιστάθμισης (ONU delay compensation)
- Ελέγχει την καταγραφή (registration) των ONU
- Κατανομή εύρους ζώνης (MPCP allocation)
 - Γέννηση παραθύρων αδειών προς τις registered ONUs
 - Ο χρόνος της άδειας προσαρμόζεται σύμφωνα με το προσδιορισμένη κατά την προηγούμενη φάση τιμή αντιστάθμισης (ONU delay compensation)

Η ONU αντίστοιχα συμμετέχει στις παραπάνω διαδικασίες εκτελώντας τις παρακάτω λειτουργίες:

- Συγχρονισμό
 - Η ONU συγχρονίζεται με την OLT μέσω των μηνυμάτων (MAC-control frames) με χρονικά σήμαντρα (timestamps) στο κανάλι downstream
- Η ONU περιμένει για τη φάση ανίχνευσης (discovery gate)
- Η ONU εκτελεί τη διαδικασία αναγνώρισης (discovery process), που περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Ranging
- Ανάθεση LLIDs
- Απονομή εύρους ζώνης για να λειτουργήσει (Απαιτείται κατ'ελαχιστον το εύρος ζώνης που θα επιτρέψει την επικοινωνία για λόγους διαχείρισης και δικαιώματος αποστολής νέων αιτήσεων για τη δυναμική δέσμευση επιπλέον εύρους ζώνης)
- Αναμονή αδειών προς μετάδοση
 - Μετάδοση πλαισίων σύμφωνα με τις άδειες
 - Πιθανόν αποστολή αιτήσεων (report frames) επιπλέον εύρους ζώνης

Ο βασικός μηχανισμός όπως περιγράφηκε ήδη για την κατανομή του εύρους ζώνης (ροή ανόδου – upstream) στις ONU βασίζεται στον προγραμματισμό αδειών από την OLT. Αυτό βέβαια δημιουργεί ένα πρόβλημα σχετικά με την κατανομή των χρόνων μετάδοσης καθώς δεν μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων (a priori) η κατάσταση συμφόρησης σε κάθε ONU. Ο μόνος τρόπος για την εκτίμηση της κατάστασης του φορτίου κάθε ONU είναι η δειγματοληπτική αποστολή αδειών, ώστε να δοθεί η ευκαιρία σε αυτή να ανακοινώσει επιπλέον αιτήσεις για την εξυπηρέτηση τυχόν κίνησης που έχει συσσωρευτεί στις ουρές αναμονής στις εισόδους της από το δίκτυο πρόσβασης. Η διαδικασία αυτή συλλογής αιτήσεων αποκαλείται «δειγματοληψία» – polling. Ένα παράδειγμα εξέλιξης της διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 45.



G - Grant (μήνυμα GATE σύμφωνα με το πρωτόκολλο MPCP)

R - Request (μήνυμα REPORT σύμφωνα με το πρωτόκολλο MPCP)

data - User's data(packet train)

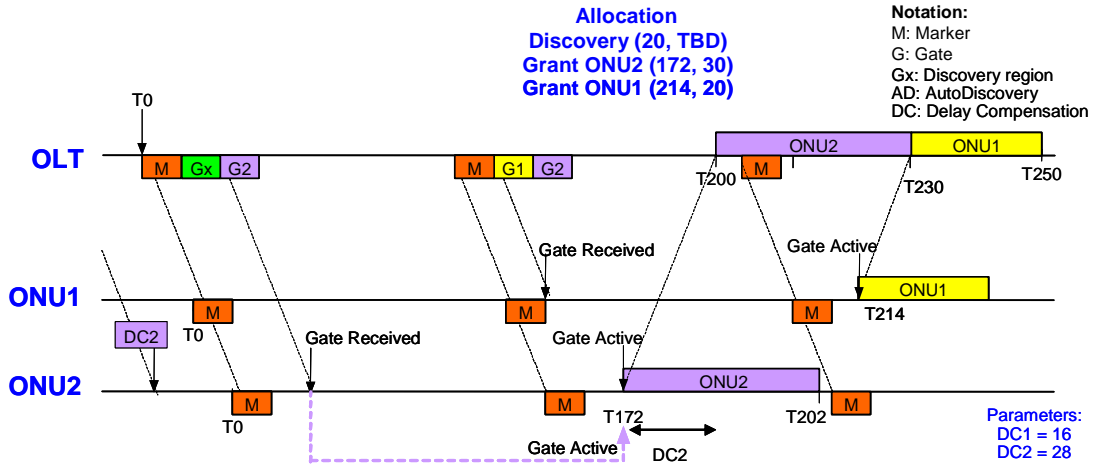
Σχήμα 45: Διαδικασία αδειών/συλλογής αιτήσεων (Interleaved Polling)

Στο προηγούμενο παράδειγμα στο δίκτυο βρίσκονται 3 ενεργές ONU. Έχει προηγηθεί η φάση ανίχνευσης (discovery) και η OLT έχει προγραμματίσει άδειες για κάθε μία. Η 1η έχει δεδομένα, οπότε με την άφιξη της πρώτης άδειας για μετάδοση προς αυτήν αιτείται (μήνυμα REPORT) περισσότερου χρόνου μετάδοσης (επιπλέον σχισμές σε μελλοντικά upstream frames). Η 2η δεν έχει δεδομένα (στέλνει κενό REPORT), ενώ η 3 έχει και αυτή δεδομένα και αιτείται περισσότερου χρόνου μετάδοσης (επιπλέον σχισμές σε μελλοντικά upstream frames). Η τελευταία αυτή αίτηση θα εξυπηρετηθεί στο μέλλον καθώς η OLT έχει ήδη προγραμματίσει επιπλέον άδειες προς εξυπηρέτηση της αίτησης της ONU1 την οποία έχει ήδη επεξεργαστεί.

Κάθε άδεια υποδεικνύει:

- την ακριβή χρονική στιγμή έναρξης μετάδοσης (σύμφωνα με το τοπικό ρολόι της ONU) σχετικά με τον χρόνο αναφορά της OLT (global time) και
- Το ακριβές μέγεθος του upstream burst (Bytes)

Ένα παράδειγμα εξέλιξης της διαδικασίας παριστάνεται στο Σχήμα 46 σε συνάρτηση και με το παράδειγμα που προηγήθηκε στο Σχήμα 44.



Σχήμα 46: Διαδικασία αδειών-μετάδοσης

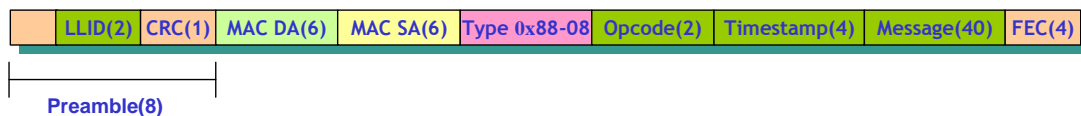
4.2.2.3 Το πρωτόκολλο MPCP

Το πρωτόκολλο Multi-Point Control Protocol (MPCP) προδιαγράφει ένα μηχανισμό ελέγχου μεταξύ δύο μονάδων που λειτουργούν ως Master & Slave συνδεδεμένοι σε μια τοπολογία σημείο-προς-πολλαπλά σημεία (Point-to-Multi-Point - P2MP) για την αποδοτική μεταφορά δεδομένων. Το MPCP υλοποιείται στο MAC Control layer.

Το MPCP χρησιμοποιεί πέντε τύπους μηνυμάτων (MAC Control messages):

- Από την OLT στις ONU αποστέλλονται τα:
 - GATE και REGISTER
- Ενώ από τις ONU στην OLT αποστέλλονται τα:
 - REPORT, REGISTER_REQUEST και REGISTER_ACK

Τα μηνύματα αυτά μεταφέρονται ως πλαίσια Ethernet σταθερού μεγέθους 64 Bytes. Η αντίστοιχη δομή του πλαισίου που μεταφέρει μήνυμα MPCP φαίνεται στο Σχήμα 46 ενώ ο Πίνακας 9 περιέχει τις ακριβείς τιμές των κωδικών (opcodes) για κάθε έναν από τους πέντε τύπους μηνυμάτων. Προφανώς όλα τα μηνύματα περιλαμβάνουν χρονοσφραγίδες (timestamp) για συγχρονισμό.



Σχήμα 47: δομή πλαισίου MPCP (MAC Control frame format)

	Opcode
GRANT	00 02
REPORT	00 03
REGISTER_REQ	00 04
REGISTER	00 05
REGISTER_ACK	00 06

Πίνακας 9: Τιμές κωδικών μηνυμάτων MPCP

4.2.3 Οφέλη των EPON

Τα EPON θεωρήθηκαν απλούστερα, πιο αποδοτικά και λιγότερο δαπανηρά από οποιαδήποτε εναλλακτική λύση πολλαπλών υπηρεσιών δικτύου πρόσβασης την εποχή που προτάθηκαν. Τα EPON προσέφεραν το υψηλότερο εύρος ζώνης στους πελάτες συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο δίκτυο PON. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μπορούν να υποστηριχθούν περισσότεροι συνδρομητές από το EPON, να διατίθεται περισσότερο εύρος ανά συνδρομητή, καλύτερο QoS και να υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών video.

Επιπλέον τα EPON οδηγούσαν σε μείωση των δαπανών μέσω της εξάλειψης των πολύπλοκων και ακριβών στοιχείων ATM και SONET και δραματική απλοποίηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Ακόμα η εξάλειψη του κόστους συντήρησης των εξωτερικών εγκαταστάσεων δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά στοιχεία σε αυτές λόγω χρήσης των μεγάλης διάρκειας ζωής παθητικών εξαρτημάτων οδηγούσε σε μείωση της συνολικής δαπάνης. Τέλος, οι Ethernet διαπαφές εξάλειψαν την ανάγκη για επιπλέον DSL ή cable modems γεγονός που οδηγούσε σε περαιτέρω μείωση του κόστους.

Η τεχνολογία EPON δεδομένου ότι μπορεί να υποστηρίξει υπηρεσίες, video και φωνής έδινε τη δυνατότητα στους παροχείς να προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και κατ'επέκταση να αυξήσουν τα έσοδά τους. Συγκεκριμένα, εκτός τις υπηρεσίες POTS, T1, 10/100BASE-T και DS3 τα EPON υποστηρίζουν και εξελιγμένες λειτουργίες όπως επιπέδου 2 και 3 μεταγωγή και δρομολόγηση, voice over IP, IP multicast, VPN 802.1Q και κατανομή και μορφοποίηση του εύρους ζώνης. Συνοψίζοντας τα EPON εξαιτίας της απλότητας τους, που προέρχεται από τη χρήση των τοπολογιών Ethernet, έδιναν τη δυνατότητα στους παροχείς να μπορούν εύκολα να αναπτύσσουν, να προβλέπουν και να διαχειρίζονται τις υπηρεσίες.

4.3 GPON

Το 2001 η FSAN ξεκίνησε μία προσπάθεια έτσι ώστε να αναγνωριστούν ως standard τα δίκτυα PON τα οποία λειτουργούσαν σε ταχύτητες μεγαλύτερες του 1Gbps. Εκτός από την ανάγκη να υποστηριχθούν υψηλότερα bit rates το συνολικό πρωτόκολλο θα έπρεπε να είναι ανοιχτό για επανεξέταση έτσι ώστε η τελική μορφή που αυτό θα λάμβανε να είναι η βέλτιστη και η πιο αποδοτική όσον αφορά στην υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών και λειτουργιών διαχείρισης, συντήρησης και πρόβλεψης. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας της FSAN ήταν μία νέα λύση στην αγορά οπτικών δικτύων πρόσβασης τα GPON που προσφέρουν πολύ υψηλά bit rates, έως και 2,048 Gbps, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζουν τη μεταφορά πολλαπλών υπηρεσιών, ιδιαίτερα δεδομένων και TDM, σε απλές διατάξεις και με μεγάλη αποδοτικότητα ([16], [17], [18]).

Το GPON διατηρεί, όπου αυτό είναι δυνατό, τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που χρονικά προηγήθηκαν αυτού και περιγράφονται στα ITU-T G.982 και τη σειρά G.983.x Recommendations έτσι ώστε να είναι συμβατά με όλες τις τεχνολογίες PON που προηγήθηκαν. Για να είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων με ρυθμό Gbit/sec σχεδιάστηκε εκ νέου το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence) και προδιαγράφηκαν οι απαιτήσεις για το υπόστρωμα φυσικού μέσου ώστε να είναι εφικτή η μετάδοση σε τέτοιους υψηλούς ρυθμούς.

Τα GPON εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης που παρέχουν υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένων υπηρεσιών φωνής, TDM, video, Ethernet, 10/100BASE-T, μισθωμένες γραμμές και επεκτάσεις χωρίς καλώδιο. Επίσης είναι δυνατό να εξυπηρετήσουν αποστάσεις των 60 km μεταξύ ONT/ONU και OLT, η απόσταση όμως αυτή υπολογίζεται χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί του φυσικού μέσου και αποτελεί τη λογική απόσταση. Σε αντίθεση με την τιμή αυτή η μέγιστη φυσική απόσταση που είναι δυνατό να καλυφθεί είναι ίση με 20 km. Τα GPON υποστηρίζουν 7 διαφορετικά bit rates χρησιμοποιώντας για όλα το ίδιο πρωτόκολλο. Οι δυνατοί συνδυασμοί για το upstream και το downstream κανάλι δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4).

Upstream	Downstream
155 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down
622 Mbit/s up	1.2 Gbit/s down
1.2 Gbit/s up	1.2 Gbit/s down
155 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
622 Mbit/s up	2.4 Gbit/s down
1.2 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down
2.4 Gbit/s up	2.4 Gbit/s down

Πίνακας 10: Συνδυασμοί bit rate για upstream/downstream κανάλι στα GPON

Όσον αφορά τη διαίρεση του σήματος της οπτικής ίνας στον οπτικό διαίρετή μία ρεαλιστική υλοποίηση με βάση το κόστος είναι η διαίρεση 1:64, ενώ παρά το γεγονός αυτό προβλέποντας τις μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις το TC στρώμα πρέπει να λαμβάνει μέριμνα για διαίρεση 1:128.

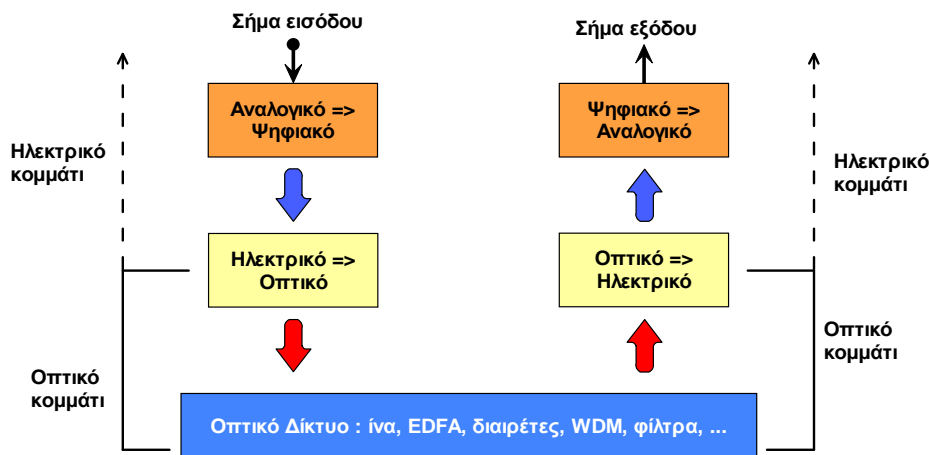
Επιπλέον το GPON έχει μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά στις λειτουργίες ανάπτυξης, πρόβλεψης και διαχείρισης του δικτύου ενώ παρέχει και ασφάλεια σε επίπεδο πρωτοκόλλου για την downstream κίνηση. Συγκεκριμένα δεδομένου του multicast χαρακτήρα του μεριμνά ώστε να μην είναι εύκολη η αποκωδικοποίηση των downstream δεδομένων από όλους τους χρήστες παρά μόνο από αυτόν για τον οποίο προορίζονται τα δεδομένα και επιτρέπει προς την κατεύθυνση αυτή οικονομικά αποδοτικές υλοποιήσεις.

Το δίκτυο GPON βασίζεται στη μεταφορά πακέτων αλλά με ένα πιο γενικό τρόπο σε σύγκριση με τους άλλους τύπους δικτύων (EPON, APON). Πιο συγκεκριμένα το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως το EPON, αλλά μπορεί να μεταδώσει και απευθείας πακέτα IP (χωρίς να είναι απαραίτητη η ενθυλάκωση σε πλαίσια Ethernet), με την προσθήκη μιας επικεφαλίδας MPLS (Multi Protocol Label Switching – Μεταγωγή Ετικέτας Πολλαπλών Πρωτοκόλλων), ή ακόμα και πακέτων ATM. Αυτό είναι εφικτό επειδή το πλαίσιο (frame) του στρώματος μετάδοσης σχεδιάστηκε εκ νέου, χωρίς να

Βασιστεί σε κάποια ήδη υπάρχουσα δομή που αφορούσε σε προγενέστερο δίκτυο (EPON, APON), με βασικό κριτήριο την αποδοτική και οικονομική υποστήριξη μεταβλητού μήκους πακέτων κάνοντας χρήση διαδοχικών σχισμών σταθερού μήκους. Η διαχείριση των πακέτων γίνεται από ένα πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC – Medium Access Protocol) που λειτουργεί με γνώμονα την Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS – Quality of Service), έτσι το GPON είναι ένα πλήρες δίκτυο πρόσβασης σε αντίθεση με το EPON που δεν λαμβάνει υπόψη του τη QoS. Η καινούργια αυτή σχεδίαση του πλαισίου επιτρέπει την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης για την παροχή υπηρεσιών πακέτου από παθητικά δίκτυα υψηλής ταχύτητας. Κατά τον καινούριο αυτό σχεδιασμό λήφθηκαν υπόψη διάφοροι περιορισμοί όπως το επίπεδο ισχύος, η λήψη δεδομένων σε εκρηκτική μετάδοση (burst mode), ο συγχρονισμός των ρολογιών καθώς επίσης και ζητήματα όπως η μειωμένη πολυπλοκότητα του συστήματος και ο περιορισμός του κόστους. Στο ρεύμα ανόδου (upstream – από ONU προς το OLT) χρησιμοποιείται μη γραμμική κωδικοποίηση σε συνδυασμό με διόρθωση λαθών. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε δίκτυο PON με λειτουργία burst mode στο ρεύμα ανόδου. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να υπάρχει μεγαλύτερο απόθεμα ισχύος, που είναι απαραίτητο για να αυξηθεί η μέγιστη απόσταση καθώς και ο λόγος της διαίρεση του σήματος της οπτικής ίνας στον οπτικό διαιρέτη, με τελικό και σημαντικό αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται από το δίκτυο περισσότεροι χρήστες.

4.3.1 Φυσικό υπόστρωμα GPON

Το φυσικό υπόστρωμα αποτελεί το χαμηλότερο στρώμα στην ιεραρχία και περιλαμβάνει το οπτικό στρώμα καθώς και ένα μέρος του ηλεκτρικού στρώματος του συστήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 48. Το οπτικό μέρος περιλαμβάνει τις οπτικές ίνες, τους διαχωριστές σήματος, τους πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες μήκους κύματος, τους εξασθενητές και τα οπτικά φίλτρα. Πάνω από το οπτικό στρώμα υπάρχει ένα υπόστρωμα υπεύθυνο για την ηλεκτρο-οπτική και οπτο-ηλεκτρική μετατροπή των σημάτων. Η μετατροπή γίνεται από μια ημιαγώγιμη δίοδο laser. Το ανώτερο στρώμα επιτελεί την μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα.



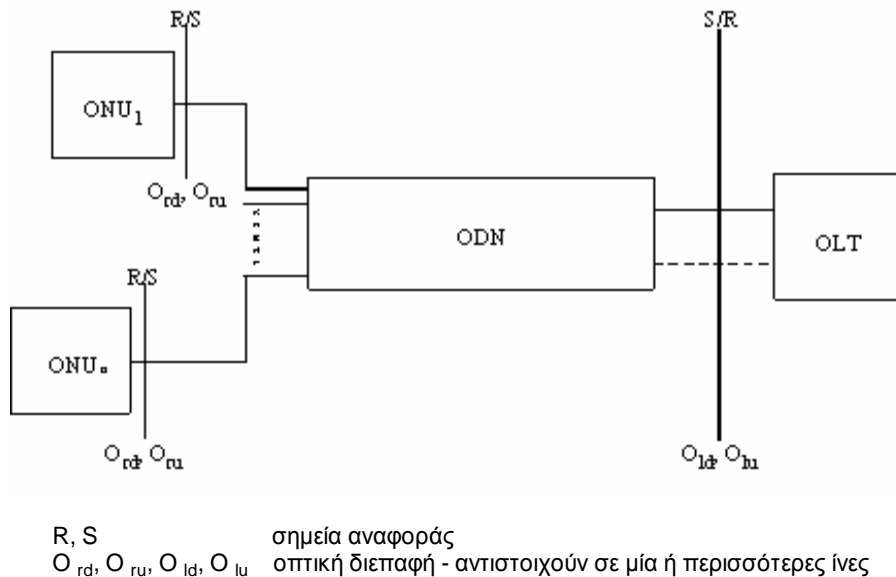
Σχήμα 48: Υπόστρωμα φυσικού μέσου

Το φυσικό υπόστρωμα είναι κατάλληλο για να μεταδώσει δεδομένα με ρυθμό Gbit/s. Η μετάδοση προς τα δύο ρεύματα μπορεί να γίνει είτε με τη χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος σε μια οπτική ίνα, είτε με τη χρήση δύο ιών. Το μήκος κύματος είναι 1480-1500 nm για το ρεύμα καθόδου και 1260-1360 nm για το ρεύμα ανόδου. Ο δέκτης έχει

μια ανοχή 1dB για τις απώλειες οπτικού δρόμου, που οφείλονται σε ανακλάσεις, διασυμβολική παρεμβολή, θόρυβο και διαμόρφωση της φάσης του laser.

Στο Σχήμα 49 φαίνεται το οπτικό δίκτυο ODN (Optical Distribution Network). Ανάμεσα στα σημεία προσαρμογής S/R και R/S το ODN αποτελείται :

- πολυπλέκτη/αποπολυπλεκτη μήκους κύματος του OLT
- πολυπλέκτη/αποπολυπλεκτη μήκους κύματος του ONU
- οπτική ίνα
- οπτικός διαχωριστής
- οπτικός ζεύκτης



Σχήμα 49: Οπτικό δίκτυο ODN

4.3.2 Υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (TC)

- Το υπόστρωμα σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence - TC) επιτελεί κυρίως δύο λειτουργίες. Πρώτον, καλύπτει την ανάγκη για απόκρυψη της φυσικής δομής του δικτύου από τα ανώτερα στρώματα. Συγκεκριμένα επειδή τα παθητικά οπτικά δίκτυα, και ειδικά το GPON, χρησιμοποιούν τοπολογία δένδρου έχουμε στο ρεύμα ανόδου μια δομή πολλαπλών σημείων προς σημείο, γεγονός που σημαίνει ότι δημιουργούνται πολλά ανεξάρτητα μονοπάτια από τους χρήστες προς το OLT, το οποίο είναι επιθυμητό να μην είναι ορατό στα ανώτερα στρώματα. Η δεύτερη λειτουργία είναι ο καθορισμός μιας δομής πλαισίου, η οποία να υποστηρίζει μεγάλο πλήθος υπηρεσιών που σε κάθε μια αντιστοιχεί και κάποια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Ο ρόλος του υποστρώματος μετάδοσης είναι καθοριστικός και για την οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος ενός PON, αφού είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του συστήματος μετάδοσης που θα εξυπηρετεί την απαιτούμενη μεταφορά δεδομένων. Το υπόστρωμα μετάδοσης δεδομένων αντιστοιχεί στο στρώμα 1.5 και 2 της διαστρωμάτωσης σύμφωνα με το OSI. Το TC σχεδόν πάντα συναντάται ως μέρος του στρώματος ATM και γι' αυτό ορίζεται ως υπόστρωμα.

Οι βασικές αρχές του υποστρώματος σύγκλισης είναι :

- Δημιουργία του πλαισίου μετάδοσης και επανάκτησή του
- Προσαρμογή του πλαισίου μετάδοσης
- Αποσυσχέτιση του ρυθμού των πακέτων
- Δημιουργία αλληλουχίας ελέγχου λάθους επικεφαλίδας και επαλήθευση
- Οριοθέτηση των πακέτων

Οι βασικές αρχές που υλοποιεί το υπόστρώμα μετάδοσης ενός δικτύου GPON είναι οι παρακάτω :

Αντιστάθμιση της διαφορετικής απόστασης των ONU

Στο ρεύμα ανόδου ενός δικτύου PON, το οποίο χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική πολλαπλών σημείων προς σημείο, στέλνονται τα δεδομένα από τους χρήστες στο OLT κάνοντας χρήση του πρωτοκόλλου TDMA. Τον έλεγχο όλων αυτών των μεταδόσεων τον έχει το OLT. Προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις μεταξύ της αποστολής δεδομένων από δύο διαφορετικά ONU και για να έχουμε αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης, το OLT πρέπει να γνωρίζει με ακρίβεια τη θέση κάθε ONU, και συγκεκριμένα την απόσταση ενός ONU από το OLT. Το μέγιστο της απόστασης μεταξύ OLT και ONU μπορεί να είναι 60 km, ενώ η μέγιστη διαφορά μεταξύ δύο ONU μπορεί να είναι 20 km. Για μήκος ίνας 20 km έχουμε μια καθυστέρηση διάδοσης μεταξύ του πιο κοντινού ONU και του πιο απομακρυσμένου περίπου ίση με $2 \times 100\mu\text{s}$ (διαδρομή από OLT σε ONU και αντιστρόφως). Με δεδομένο ότι σε ρυθμό 1.24416 Gb/s η μετάδοση ενός byte διαρκεί 6.43 ns, υπάρχει μια διαφορά 31100 “byte slots” (σχισμών) μεταξύ του πιο κοντινού και του πιο απομακρυσμένου ONU. Για το λόγο αυτό το OLT πρέπει να γνωρίζει το χρόνο μετάδοσης με επιστροφή για κάθε ONU. Αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας της αποστασιομέτρησης (ranging). Έτσι εφόσον το OLT γνωρίζει την καθυστέρηση με επιστροφή για κάθε ONU, επιβάλλει σε κάθε ONU να τηρεί μια συγκεκριμένη καθυστέρηση στην αποστολή δεδομένων. Η καθυστέρηση αυτή τηρείται από τη στιγμή που θα λάβει την άδεια για να στείλει δεδομένα (grant) έως ότου ξεκινήσει η αποστολή δεδομένων. Για κάθε ONU η καθυστέρηση είναι διαφορετική αφού εξαρτάται από τη θέση του στο δίκτυο.

Ευθυγράμμιση bit/byte και συγχρονισμός εκρηκτικής (burst) κίνησης

Στο ρεύμα καθόδου ο συρμός bit, κωδικοποιημένος με NRZ, επιτρέπει τον εύκολο συγχρονισμό για τα ONU. Ο συγχρονισμός byte βασίζεται στην αναγνώριση της διάταξης του πλαισίου καθόδου. Στο ρεύμα ανόδου χρησιμοποιείται η επικεφαλίδα (upstream overhead) για το συγχρονισμό, η οποία έχει μήκος 12 bytes στο GPON και χωρίζεται σε τρία πεδία ως εξής :

Χρόνος επιτήρησης

Σκοπός του είναι να παρέχει επαρκή απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων εκρήξεων (μεταφορά δεδομένων από τους χρήστες που υπακούει σε εκρηκτική κίνηση) από δύο διαφορετικές ONU, ώστε να μην υπάρξει σύγκρουση. Επίσης λαμβάνει υπόψη τον αριθμό που θα αναβοσβήσει το laser ενός ONU.

Εισαγωγή (preamble)

Η εισαγωγή επιτελεί δύο λειτουργίες. Πρώτον εξάγει τη φάση του συρμού bit ανοδικού ρεύματος που φθάνει σε σχέση με την τοπική ώρα στο OLT, επιτρέποντας έτσι το συγχρονισμό των Bit. Δεύτερον συμβάλλει στην επαναφορά της ισχύος. Η διαφορά

θέσης των ONU σε σχέση με το OLT έχει ως αποτέλεσμα τη διαφορετική εξασθένιση των οπτικών σημάτων όταν φθάνουν στο OLT.

Ένδειξη αρχής

Υπάρχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό που υποδεικνύει την αρχή του συρμού ανόδου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το συγχρονισμό των Byte.

Ευθυγράμμιση πλαισίου

Δομή του πλαισίου

Ανάθεση σχισμών

Ανάθεση εύρους ζώνης – MAC

Το πρωτόκολλο MAC επιτελεί ένα σημαντικό ρόλο στα δίκτυα PON, όπου υπάρχουν πολλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα να εξυπηρετηθούν. Ο ελεγκτής MAC, που υλοποιεί το πρωτόκολλο, δέχεται ως είσοδο διάφορες παραμέτρους σχετικές με το QoS για κάθε συνθήκη κίνησης, καθώς και στοιχεία από τα διάφορα ONU και αναλαμβάνει τη σωστή ανάθεση εύρους ζώνης σε κάθε ONU.

Ακεραιότητα των πληροφοριών

Χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός πρόβλεψης λαθών (FEC – Forward Error Detection), δηλαδή μια τεχνική κωδικοποίησης που επιτρέπει την εξασφάλιση του ίδιου ρυθμού λαθών (Bit Error Rate) αλλά σε μικρότερη ευαισθησία. Όμως έτσι έχουμε μείωση του ωφέλιμου εύρους ζώνης. Το FEC χρησιμοποιείται αντί ενός πρωτοκόλλου επανάληψης, δηλαδή ενός πρωτοκόλλου που ζητά την επανεκπομπή δεδομένων σε περίπτωση λάθους. Το FEC παρέχει επαρκή bit, ώστε να γίνει διόρθωση λαθών μέχρι ενός αριθμού, όπου αυτό απαιτείται.

Ασφάλεια

Εξαιτίας της κοινοποίησης της πληροφορίας σε όλα τα ONU στο κανάλι καθόδου, υπάρχει η δυνατότητα κάποιο ONU να διαβάσει την πληροφορία που προορίζεται για άλλα. Για το λόγο αυτό η πληροφορία πρέπει να υφίσταται κρυπτογράφηση, κάνοντας χρήση ενός κλειδιού κωδικοποίησης διαφορετικό για το κάθε ONU.

4.3.3 Πρωτόκολλο MAC

Όπως έχει ήδη αναφερθεί λόγω της δενδρικής τοπολογίας τους στα δίκτυα GPON, όπως και σε όλες τις περιπτώσεις PON που περιγράψαμε έως τώρα η πολλαπλή πρόσβαση στο ρεύμα ανόδου επιτυγχάνεται μέσω πολυπλεξίας TDMA. Για να επιτευχθεί η διαιτησία της πρόσβασης είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου ελέγχου της πρόσβασης στο μέσο. Το πρωτόκολλο αυτό ρυθμίζει την πρόσβαση αναθέτοντας σχισμές στα τερματικά των χρηστών ανάλογα με τη ζήτηση.

Ο ελεγκτής MAC συλλέγει της αιτήσεις για πρόσβαση στο μέσο από τα διάφορα ONU/ONT και διανέμει τον αριθμό των χρονοθυρίδων του ρεύματος ανόδου ανάλογα με τα δεδομένα που έχει συλλέξει. Κύριος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη για την κατανομή του εύρους ζώνης είναι η διασφάλιση της QoS που έχει συμφωνηθεί ανάμεσα στο OLT και τα ONU/ONT.

4.3.3.1 Διαχείριση ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) σε δίκτυα PON

Χαμηλό QoS είναι το αποτέλεσμα της ανεπάρκειας πόρων, που οδηγεί στην απώλεια πληροφορίας ή την καθυστέρηση μετάδοσης, και των σφαλμάτων μετάδοσης. Τα

σφάλματα μετάδοσης διορθώνονται στο βαθμό που είναι δυνατό με χρήση μηχανισμού πρόβλεψης ή διόρθωσης λαθών (forward ή backward error correction). Η ανεπάρκεια πόρων γίνεται φανερή στα σημεία συσσώρευσης από την υπερχειλίση των προσωρινών καταχωρητών. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις ελέγχου είτε ανοιχτού (πρόβλεψης) είτε κλειστού (αντίδρασης) βρόχου. Με τον πρώτο τρόπο γίνεται δέσμευση πόρων πριν αρχίσει η μετάδοση δεδομένων, γι' αυτό απαιτείται η διατήρηση πληροφοριών για την κατάσταση στα σημεία μεταγωγής, σε συνδυασμό με τον έλεγχο συμμόρφωσης της πηγής δεδομένων προς τις παραμέτρους μετάδοσης που έχουν συμφωνηθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για την κράτηση των πόρων. Με το δεύτερο τρόπο υλοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι προσαρμόζουν το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων από της πηγές ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους στα σημεία συμφόρησης. Η επιλογή της μεθόδου δε αφήνεται στη διακριτικότητα του σχεδιαστή του συστήματος αλλά υπαγορεύεται από το είδος των υπηρεσιών που θα εξυπηρετούνται. Η μετάδοση κίνησης πραγματικού χρόνου δεν μπορεί να γίνει με χρήση ελέγχου κλειστού βρόχου, ενώ η μετάδοση κίνησης βέλτισης προσπάθειας έχει καλά αποτελέσματα με αυτό το είδος ελέγχου. Δεν είναι δυνατή η χρήση και των δύο μεθόδων, αφού με τη μέθοδο του κλειστού βρόχου καταλαμβάνεται όλο και περισσότερο εύρος ζώνης έως ότου αρχίσουν οι απώλειες μετάδοσης. Παρόλο που η μέθοδος κλειστού βρόχου καλύπτει τις απώλειες, η κίνηση πραγματικού χρόνου θα είχε ελλιπή ποιότητα.

Το πρωτόκολλο MAC είναι ένας γενικός ρυθμιστής κίνησης στα δίκτυα PON, οποίος δε μπορεί να λειτουργήσει σωστά αν δε γνωρίζει το είδος και τις ιδιότητες της ροής στην οποία ανήκουν τα προς μετάδοση πακέτα. Αν η πληροφορία αυτή δεν είναι διαθέσιμη στον ελεγκτή MAC είναι δυνατόν να δώσει άδεια για μετάδοση σε ένα πακέτο μιας εφαρμογής δεδομένων ανεκτικής σε καθυστέρηση (π.χ. ανταλλαγή αρχείων FTP με χρήση TCP) μιας ONU, ενώ σε κάποια κοντινή ONU ένα πακέτο που ανήκει σε ροή μετάδοσης δεδομένων πραγματικής κίνησης να ανταγωνίζεται για την ίδια σχισμή. Αφού δεν είναι δυνατό για τον ελεγκτή MAC να ελέγχει και να ταξινομεί το κάθε πακέτο προς μετάδοση σε πιο είδος κίνησης ανήκει, είναι επιθυμητό η ταξινόμηση των πακέτων να γίνεται από την τερματική συσκευή. Έτσι υπάρχουν μερικές κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται τα πακέτα ανάλογα με την προτεραιότητά τους από το ONU//ONT. Ο ελεγκτής MAC ελέγχει τώρα μόνο το μήκος της κάθε ουράς αναμονής για την κάθε κατηγορία και παραχωρεί προτεραιότητα στις ουρές υψηλής προτεραιότητας κάθε ONU. Η τοπική ταξινόμηση των πακέτων σε κάθε ONU δε έχει τόση σημασία, όσο η καθολική ταξινόμηση ανάμεσα σε όλα τα ONU, αφού σκοπός είναι να εξυπηρετηθούν τα πακέτα υψηλής προτεραιότητας νωρίτερα από τα υπόλοιπα σε όλες τις ουρές των ONU.

Ο αριθμός των κατηγοριών που μπορεί να ταξινομηθούν τα διάφορα πακέτα είναι πέντε, ονομάζονται (Traffic Containers - TCONT) και τη χρήση κάθε μίας περιγράφει ο Πίνακας 11. Η ταξινόμηση των προτεραιοτήτων αυτών έχει καθοριστεί από την ITU στο G983.5 και έχουν υιοθετηθεί και από την FSAN. Για κάθε TCONT που υποστηρίζεται θα πρέπει να υπάρχει μια ξεχωριστή ουρά. Οι ροές δεδομένων με απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών πρέπει να αναγνωρίζονται και να εξυπηρετούνται διαφορετικά από τα υπόλοιπα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται στο ONU με την τοποθέτηση των δεδομένων αυτών στη σωστή ουρά του αντίστοιχου TCONT.

TCONT	Υπηρεσίες	Παράμετροι	Εγγυήσεις
1	DS-1, E1 υπηρεσίες	Μέγιστο SDI = Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη και σταθερή τιμή Μέγιστο TB = Ελάχιστο TB =	καθορισμένο σταθερό εύρος ζώνης καθορισμένη σταθερή

		προκαθορισμένη σταθερή τιμή	καθυστέρηση
2	μη πραγματικού χρόνου κίνηση	Μέγιστο SDI = Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη σταθερή τιμή Μέγιστο TB = Ελάχιστο TB = προκαθορισμένη σταθερή τιμή	καθορισμένο εύρος ζώνης περιορισμένο CTD, CDV
3	μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης	Μέγιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή Μέγιστο TB = προκαθορισμένη τιμή Ελάχιστο TB = προκαθορισμένη τιμή	προκαθορισμένο, εγγυημένο εύρος ζώνης μη εγγυημένο δεσμευμένο σε αναλογία με το εγγυημένο
4	καλύτερες δυνατές υπηρεσίες	Μέγιστο SDI = άπειρο Ελάχιστο SDI = προκαθορισμένη τιμή Μέγιστο TB = προκαθορισμένη τιμή Ελάχιστο TB = 0	ίση κατανομή του μη δεσμευμένου εύρους ζώνης
5	όλα τα παραπάνω		

Πίνακας 11: Διάκριση κλάσεων υπηρεσιών με χρήση των TCONT στο GPON

Max SDI : Μέγιστο διάστημα μεταξύ επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων

Min SDI : Ελάχιστο διάστημα μεταξύ επιτυχούς μετάδοσης δεδομένων

Max TB : Μέγιστος αριθμός byte που μεταδίδονται

Min TB : Ελάχιστο αριθμός byte που μεταδίδονται

Ο αλγόριθμος απόδοσης αδειών στις ONU θα πρέπει να προσαρμόζεται στις παραπάνω απαιτήσεις και ο προγραμματισμός αδειών θα πρέπει να χρησιμοποιεί τις αναγκαίες παραμέτρους κατά περίπτωση, για να επιτύχει κάλυψη των απαιτήσεων των υπηρεσιών. Για τους τύπους TCONT 3, 4 και 5 το άνω όριο του εύρους ζώνης είναι ίσο με το μέγιστο και είναι προκαθορισμένο. Στην ανάθεση εύρους ζώνης (προγραμματισμο αδειών) εξυπηρετούνται πρώτα όσοι έχουν διαπραγματευτεί σταθερό εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας και σχισμές για τη μείωση της καθυστέρησης και της μεταβολής της καθυστέρησης ανά μετάδοση. Κατόπιν εξυπηρετείται το εγγυημένο εύρος ζώνης, εφόσον έχουν εγκατασταθεί TCONT που το προβλέπουν. Το υπόλοιπο εύρος ζώνης διανέμεται στο μη εγγυημένο και το καλύτερο δυνατό. Το μη εγγυημένο έχει μεγαλύτερη προτεραιότητα εξυπηρέτησης έναντι του καλύτερου δυνατού. Ο Πίνακας 12 δείχνει τη σχέση μεταξύ της κάθε κατηγορίας εύρους ζώνης και των πέντε τύπων TCONT.

	Ευαισθησία στην καθυστέρηση	Τύπος ανάθεσης	Τύποι TCONT				
			1	2	3	4	5
Σταθερό	Ναι	Προκαθορισμένος	✓				✓
Εγγυημένο	Όχι	Προκαθορισμένος		✓	✓		✓

Μη Εγγυημένο	Όχι	Δυναμικός			✓		✓
Καλύτερο Δυνατό	Όχι	Δυναμικός				✓	✓

Πίνακας 12: Κατανομή εύρους ζώνης ανά TCONT

TCONT τύπου 1

Το TCONT τύπου 1 χαρακτηρίζεται από σταθερό εύρος ζώνης μόνο. Για αυτό το TCONT το εύρος ζώνης πρέπει να διανέμεται υποχρεωτικά, με σταθερό ρυθμό και ελεγχόμενη καθυστέρηση κελιών. Το TCONT αυτού του τύπου χρησιμοποιείται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο OLT πάντα αναθέτει το προκαθορισμένο εύρος ζώνης στις συνδέσεις με TCONT 1 ανεξαρτήτως αν υπάρχουν δεδομένα να σταλούν ή όχι. Για το TCONT αυτό δε γίνεται δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης.

TCONT τύπου 2

Το T -CONT τύπου 2 χαρακτηρίζεται από εγγυημένο εύρος ζώνης μόνο. Το εγγυημένο εύρος ζώνης είναι ίδιο με το σταθερό με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει ευαισθησία ως προς το χρόνο. Το TCONT 1 εγγυάται τόσο το ρυθμό μετάδοσης όσο και τη καθυστέρηση ανά κελί και τη μεταβολή της καθυστέρησης αυτής. Ενώ το TCONT 2 εγγυάται μόνο το ρυθμό μετάδοσης.

TCONT τύπου 3

Το TCONT τύπου 3 χαρακτηρίζεται τόσο από εγγυημένο όσο και από μη εγγυημένο εύρος ζώνης. Στο TCONT τύπου 3 διανέμεται τόσο εύρος ζώνης ίσο με το εγγυημένο μόνο όταν ο ρυθμός είναι ίσος ή μεγαλύτερος από αυτόν του εγγυημένου εύρους ζώνης. Αν υπάρχει απαίτηση για επιπλέον εύρος ζώνης θα διανεμηθεί ως μη – εγγυημένο. Η κατανομή αυτή θα γίνει από το εύρος ζώνης που αφιερώνεται στο μη – εγγυημένο και στο καλύτερο δυνατό και σε αναλογία με το εγγυημένο εύρος ζώνης. Το άθροισμα του εγγυημένου και μη – εγγυημένου δε θα πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο εύρος ζώνης το οποίο και είναι προκαθορισμένο. Με το TCONT 3 μπορεί να μεταδοθεί κίνηση μεταβλητού ρυθμού, εκτός από κίνηση πραγματικού χρόνου.

TCONT τύπου 4

Το TCONT τύπου 4 δεν έχει εγγυημένο εύρος ζώνης και μεταφέρει μόνο καλύτερο δυνατό. Το TCONT τύπου 4 θα έχει διαθέσιμο εύρος ζώνης μόνο αν εξυπηρετηθούν όλες οι άλλες κατηγορίες (σταθερό, εγγυημένο, μη – εγγυημένο) και υπάρχει πλεόνασμα.

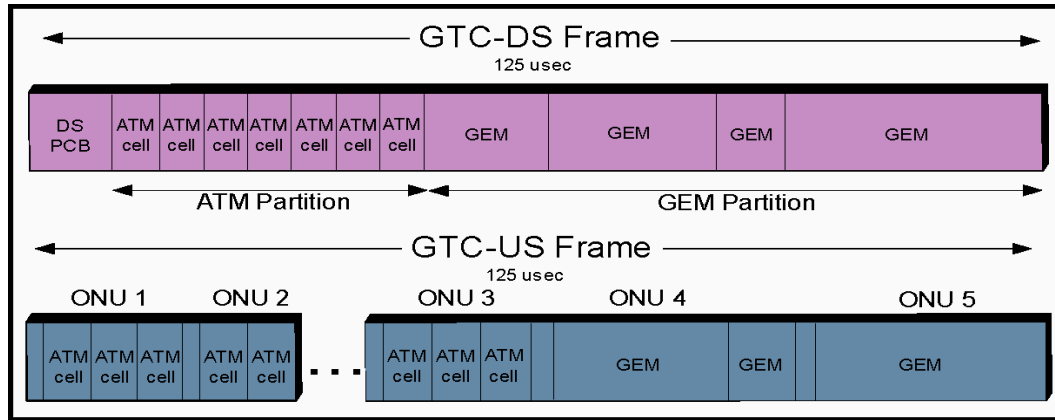
TCONT τύπου 5

Το TCONT τύπου 5 είναι ένας συνδυασμός όλων των παραπάνω κατηγοριών. Το TCONT τύπου 5 μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε είδος κίνησης συμπεριλαμβανομένης και της μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο

4.3.4 Δομή πλαισίου TC

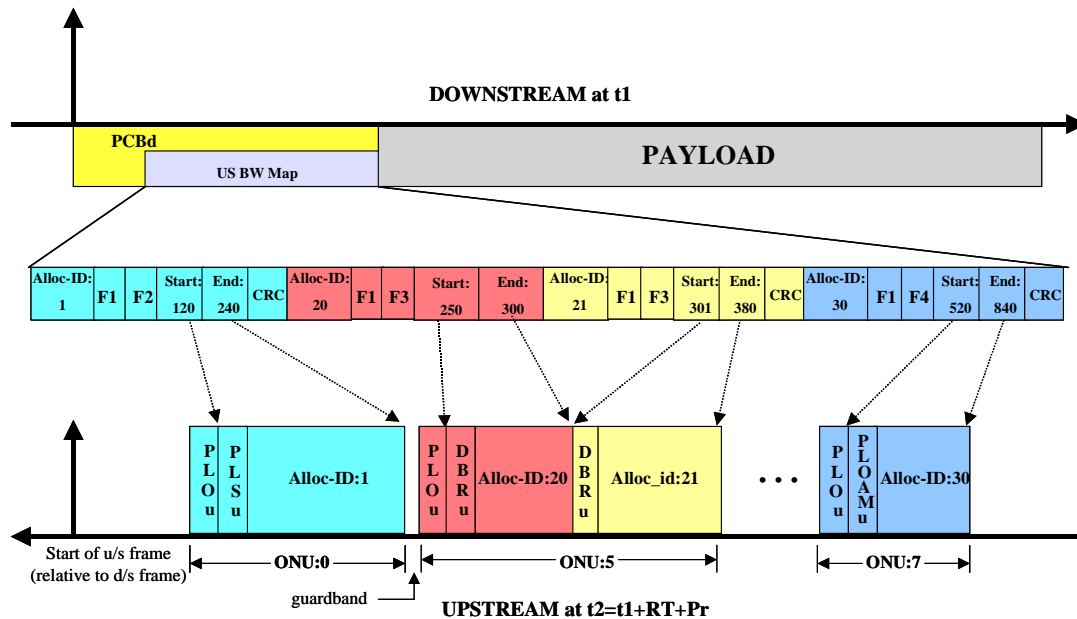
Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τη δομή και τη λειτουργία κάθε πεδίου του πλαισίου του TC τόσο όσον αφορά στην προς τα άνω όσο και στην προς τα κάτω ζεύξη. Χαρακτηριστικά διατηρείται η περιοδική επανάληψη μιας δομής πλαισίου συγχρονισμένα και στις δύο ροές με περίοδο επανάληψης 125μsec, ενώ παρέχεται συμβατότητα τόσο με δίκτυα ATM όσο και πακέτου (μεταβλητού μήκους) με χρήση της τεχνικής ενθυλάκωσης GEM (GPON Encapsulation Method), όπως φαίνεται στο Σχήμα

50. Μάλιστα οι δύο τύποι μπορούν να υποστηρίζονται ταυτόχρονα, αφού στο ίδιο πλαίσιο μπορεί να οριστούν δύο ανεξάρτητες περιοχές που η κάθε μία χρησιμοποιεί τον δικό της τύπο ενθυλάκωσης.



Σχήμα 50: Δομή πλαισίων στις δύο ροές (downstream/DS, upstream/US)

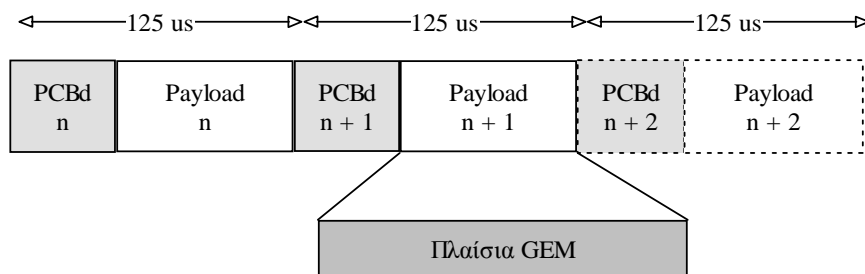
Η συσχέτιση των δύο ροών προκύπτει από τη διαδικασία πολύπλεξης TDMA κατόπιν αδειών από τον κεντρικό ελεγκτή στην OLT, όπως ισχύει σε κάθε τύπο PON που εξετάσαμε μέχρι τώρα. Οι ακριβείς προδιαγραφές των αδειών μετάδοσης προσεγγίζουν περισσότερο τη μορφή των αδειών μετάδοσης του EPON καθώς πρέπει να προσδιορίζουν επακριβώς το χρόνο που είναι διαθέσιμος σε κάθε ONU για μετάδοση στο επόμενο πλαίσιο της ροής προς τα άνω εκπεφρασμένο σε μήκος Bytes. Επίσης άλλη μια ομοιότητα με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου του EPON και τη χρήση του αντίστοιχου αναγνωριστικού LLID για τη διευθυνσιοδότηση και την ανταλλαγή αιτήσεων/αδειών μεταξύ συγκεκριμένων ουρών μέσα στην ίδια ONU (αφιερωμένων στην εξυπηρέτηση συγκεκριμένων κατηγοριών εισερχόμενης κίνησης) είναι η χρήση των αναγνωριστικών που στο πρότυπο GPON ονομάζονται AllocID. Όλες οι αναγκαίες πληροφορίες των αδειών περιέχονται σε ένα αντίστοιχο πεδίο στην επικεφαλίδα του πλαισίου στη ροή προς τα κάτω που αποκαλείται «χάρτης» (upstream bandwidth map) του αντίστοιχου πλαισίου στη ροή προς τα άνω που θα ακολουθήσει και το οποίο προσδιορίζουν. Ένα παράδειγμα εξέλιξης της διαδικασίας παριστάνεται στο Σχήμα 51.



Σχήμα 51: Συσχέτιση των πλαισίων στις δύο ροές , διαδικασία αδειών

4.3.4.1 Προς τα κάτω ζεύξη

Το πλαίσιο στη ζεύξη αυτή είναι σταθερού μήκους 125 us και αποτελείται από το δύο μέρη το PCBd (Physical Control Block D/S) και το GEM (G-PON Encapsulation Method) που αποτελεί τη χρήσιμη πληροφορία (payload) του πλαισίου αυτού. Το μήκος τους δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από το είδος και τον αριθμό των πελατών που έχουν ζητήσει εξυπηρέτηση ή αλλιώς από τις δομές ανάθεσης εύρους ζώνης στους διάφορους πελάτες που μεταφέρει το συγκεκριμένο πλαίσιο. Τα μέρη αυτά τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 53 χωρίζονται με τη σειρά τους σε μία σειρά πεδίων των οποίων η περιγραφή και η λειτουργικότητα θα γίνει αμέσως παρακάτω.



Σχήμα 52: Το προς τα κάτω πλαίσιο του GPON

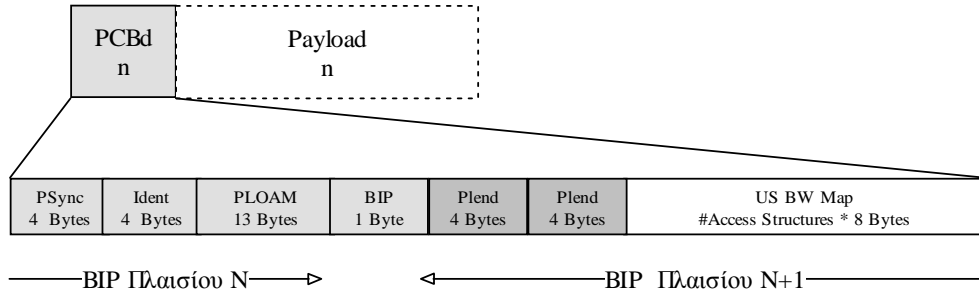
PCBd

Το PCBd που εκπέμπεται από την OLT προς όλες τις ONU και στη συνέχεια το κάθε ένα από αυτά αξιοποιεί τις πληροφορίες που προορίζονται για αυτό χωρίζεται σε πεδία τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες.

- Πεδία με πληροφορίες που αφορούν στο ίδιο το πλαίσιο που στέλνεται (PSync, Ident, BIP)

- Πεδία με πληροφορίες που αφορούν στο payload του πλαισίου(PLOAMd, Plend)
- Πεδίο με πληροφορίες που αφορούν στον καθορισμό της πρόσβασης στο μέσο από τις διαφορετικές ONU (US BW Map)

Η δομή του PCBd με τα διάφορα πεδία φαίνεται στο Σχήμα 53



Σχήμα 53: Το προς τα κάτω πλαίσιο του GPON

Δομή PCBd του προς τα κάτω πλαισίου

Πεδίο PSync

Το πεδίο αυτό που ονομάζεται Physical synchronization field είναι σταθερού μήκους 32-bit έχει σταθερή τιμή, τοποθετείται στην αρχή του PCBd ώστε να μπορούν τα ONU να αντιλαμβάνονται την αρχή ενός νέου πλαισίου και να συγχρονίζονται με την εκπομπή. Ο συγχρονισμός γίνεται με την υλοποίηση σε κάθε ONU μηχανής καταστάσεων που προορίζεται για τον σκοπό αυτό.

Πεδίο Ident

Το πεδίο αυτό είναι σταθερού μήκους 32-bit και χρησιμοποιείται ώστε να υποστηριχθούν μεγαλύτερες δομές πλαισίων (super-frames). Για να έχει τη δυνατότητα το κάθε ONU να αναγνωρίζει αν δύο πλαίσια ανήκουν στο ίδιο super-frame τα 30 λιγότερο σημαντικά bit του πεδίου αυτού υλοποιούν έναν αύξοντα μετρητή όπου για κάθε επόμενο πλαίσιο που ανήκει στο ίδιο super-frame έχει τιμή κατά ένα μεγαλύτερη. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται και πάλι μηχανή καταστάσεων στο ONU για συγχρονισμό.

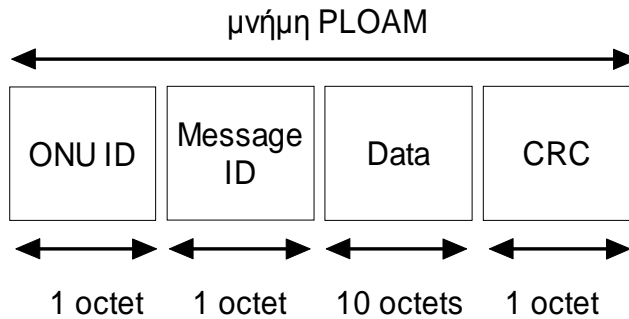
Το σημαντικότερο bit του πεδίου αυτού χρησιμοποιείται για να δείξει αν χρησιμοποιείται κωδικοποίηση FEC στην προς τα κάτω ζεύξη.

Πεδίο BIP

Το πεδίο αυτό έχει μήκος 8-bit και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοτιμίας όλων των bytes από το αμέσως προηγούμενο πεδίο BIP μέχρι το υπό εξέταση, έτσι ώστε να μετρηθεί ο αριθμός των λαθών στη ζεύξη.

Πεδίο PLOAM

Το πεδίο αυτό έχει μήκος 13 bytes και μεταφέρει τα μηνύματα λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer OAM ή PLOAM). Συγκεκριμένα μεταφέρουν πληροφορίες σχετικές με προειδοποιήσεις κινδύνου (alarms), προειδοποίηση για παραβίαση κατωφλιού και μηνύματα ενεργοποίησης. Η δομή ενός μηνύματος PLOAM φαίνεται στο Σχήμα 54.



Σχήμα 54: Δομή μηνύματος PLOAM

Τα πεδία ενός μηνύματος PLOAM είναι:

- **ONU ID**

έχει τη διεύθυνση ενός συγκεκριμένου ONU. Κατά τη διαδικασία της αποστασιομέτρησης κάθε ONU αντιστοιχίζεται σε ένα αριθμό από το μηδέν (0) έως το διακόσια πενήντα τρία (253), τον ONU ID. Για τη λειτουργία της κοινοποίησης (broadcasting) το πεδίο αυτό γίνεται ίσο με 0xFF.

- **Message ID**

δείχνει τον τύπο του μηνύματος. Το πεδίο αυτό περιέχει ένα αριθμό 8 bit που αντιστοιχεί σε ένα είδος μηνύματος. Τα μηνύματα αυτά μπορεί να είναι : μήνυμα επικεφαλίδας ρεύματος ανόδου (Upstream_Overhead), μήνυμα μάσκας σειριακού αριθμού (Serial_Number_Mask), μήνυμα ανάθεσης ONU ID (Assign_ONU-ID), μήνυμα χρόνου αποστασιομέτρησης (Ranging_Time), μήνυμα απενεργοποίησης ONU ID (Deactivate_ONU-ID), μήνυμα απενεργοποίησης σειριακού αριθμού (Disable_serial_number), μήνυμα απόκρυψης ID θύρας (Encrypted Port-ID), μήνυμα αίτησης κωδικού (Request_Password), μήνυμα ανάθεσης AllocId (Assign_AllocId), Κανένα Μήνυμα, Μήνυμα POPUP, μήνυμα Configure-Port-ID, μήνυμα λάθους εξοπλισμού (Physical Equipment Error (PEE)), μήνυμα αλλαγής στάθμης ισχύος (Change Power Level (CPL)), μήνυμα PST, μήνυμα BER Interval, μήνυμα Key_Switching_Time

- **Data**

περιέχει την πληροφορία του μηνύματος

- **CRC**

περιέχει τα bit του κυκλικού κώδικα πλεονασμού και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο λαθών.

Πεδίο Plend

Το πεδίο αυτό που ονομάζεται Payload Length στέλνεται δύο φορές σε κάθε πλαίσιο για την αποφυγή τυχόν λαθών. Καθορίζει το μέγεθος του χάρτη εύρους ζώνης (BW Map) και ATM μέρους (του οποίου το μέγεθος στο GPON δίκτυο που περιγράφεται στην υλοποίηση GIANT είναι μηδενικό) που στέλνεται στο πεδίο US BW Map. Συγκεκριμένα το πεδίο αυτό , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 55, χωρίζεται στα παρακάτω υποπεδία:

- **Blen**

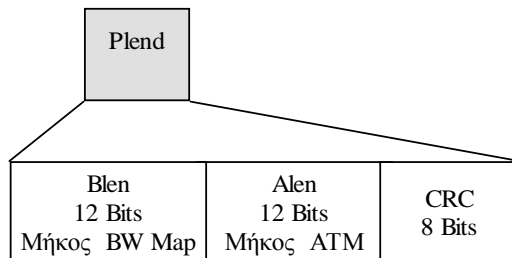
αποτελείται από τα 12 σημαντικότερα bit και δείχνει το μέγεθος του BW Map. Η ύπαρξη των 12-bit έχει ως συνέπεια να μπορούν να εξυπηρετηθούν μέχρι 4095 TCONT το καθένα από τα οποία αναγνωρίζεται από έναν αντίστοιχο αριθμό που ονομάζεται AllocId.

- **Alen**

αποτελείται από τα 12 επόμενα bit και δείχνει το μέγεθος του ATM μέρους

- **CRC**

αποτελείται από τα 8 τελευταία bit, που υλοποιούν κυκλικό κώδικα ελέγχου λαθών με βάση το πολυώνυμο $g(x)=x^8+x^2+x+1$.



Σχήμα 55: Δομή πεδίου Plend

Πεδίο US BW Map

Το πεδίο αυτό αποτελείται από ομάδες των 8 bytes που αποτελούν τις δομές πρόσβασης (Access Structures), ο αριθμός των ομάδων αυτών είναι μεταβλητός και δίνεται στο πεδίο Plend. Η κάθε δομή πρόσβασης προορίζεται για κάποιο συγκεκριμένο TCONT, που προσδιορίζεται από το AllocId του, και αναθέτει εύρος ζώνης στο δεδομένο TCONT. Η ανάθεση του εύρους ζώνης υλοποιείται με τη δυνατότητα που παρέχεται στο TCONT να καταλάβει κάποια bytes στο πλαίσιο της προς τα άνω ζεύξης. Η δομή περιλαμβάνει τα παρακάτω πεδία.

- **AllocId**

αποτελείται από τα 12 σημαντικότερα bit, ορίζει μία διεύθυνση και καθορίζει μονοσήμαντα ένα TCONT. Τα 12 bit συνεπάγονται ότι οι διευθύνσεις αυτές παίρνουν τιμές από 0 έως 4095.

Flags αποτελείται από τα επόμενα 12 bit και καθορίζει μηνύματα που θα πρέπει με εντολή του OLT να συμπεριληφθούν στο προς τα άνω πλαίσιο και έχουν να κάνουν με μετρήσεις του δικτύου (μηνύματα PLSu, PLOAMu, DBRu) ή ενέργειες στις οποίες θα πρέπει να προβεί το ONU (υπολογισμός και εισαγωγή FEC).

- **StartTime**

αποτελείται από τα επόμενα 16 bit και καθορίζει το byte από το οποίο θα πρέπει να αρχίσει να μεταδίδει το συγκεκριμένο TCONT. Η αρίθμηση των bytes αρχίζει από το μηδέν (αρχή του προς τα άνω πλαισίου) και έχει μέγιστη τιμή 65536 (τιμή που δίνει το μέγιστο του προς τα άνω πλαισίου λαμβάνοντας υπόψη ρυθμό μετάδοσης στην προς τα άνω ζεύξη ίσο με 2.488 Gb/s)

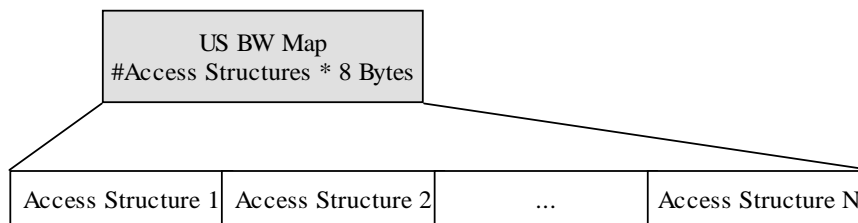
- **StopTime**

αποτελείται από τα επόμενα 16 bit και καθορίζει το byte του προς τα άνω πλαισίου στο οποίο θα πρέπει να σταματήσει να μεταδίδει το συγκεκριμένο TCONT

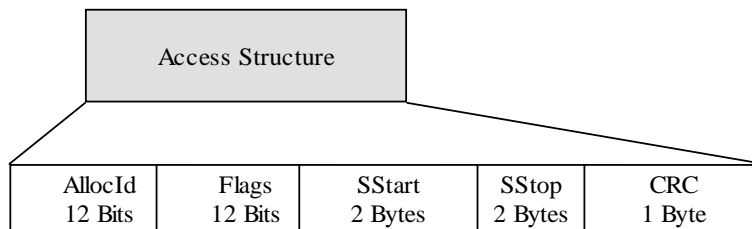
- **CRC**

αποτελείται από τα τελευταία 8-bit και υλοποιεί κυκλικό κώδικα μείωσης λαθών προστατεύοντας τη κάθε δομή πρόσβασης. Χρησιμοποιείται το πολυώνυμο $g(x)=x^8+x^2+x+1$ και αν εντοπιστεί λάθος το οποίο δεν είναι δυνατό να διορθωθεί απορρίπτεται η δομή πρόσβασης.

Το πεδίο US BW Map, οι δομές πρόσβασης και τα πεδία της δομής πρόσβασης φαίνονται στο Σχήμα 56 και Σχήμα 57.



Σχήμα 56: Δομή πεδίου US BW Map



Σχήμα 57: Δομή δομής πρόσβασης

Payload

Το πεδίο αυτό του προς τα κάτω πλαισίου ξεκινά αμέσως μετά το τέλος του PCBd και έχει μέγεθος όσα bytes έχουν απομείνει για να συμπληρωθεί το μήκος του πλαισίου. Το πεδίο αυτό μπορεί να καταλαμβάνεται από πακέτα ATM (cells) ή/και από πλαίσια GEM (G-PON Encapsulation Method).

4.3.4.2 Προς τα άνω ζεύξη

Το πλαίσιο στη ζεύξη αυτή έχει το ίδιο μήκος με το πλαίσιο στην προς τα κάτω ζεύξη για όλους τους ρυθμούς μεταφοράς. Το πλαίσιο φαίνεται στο Σχήμα 59 αποτελείται από κομμάτια που προέρχονται από διαφορετικές ONU και ο τρόπος διάταξης τους στο πλαίσιο υπαγορεύεται από το προς τα κάτω πλαίσιο με βάση όσα εξηγήσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον κάθε ONU, με εντολή της OLT, όποτε υποδεικνύουν τα Flags στο προς τα κάτω πλαίσιο, αποστέλλει κατάλληλες επικεφαλίδες με πρόσθετη πληροφορία πρωτοκόλλου. Οι επικεφαλίδες αυτές παραθέτονται παρακάτω και η χρήση και η λειτουργικότητά τους θα αναλυθούν στη συνέχεια.

- Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος PLOu
- Επικεφαλίδα φυσικού στρώματος λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου PLOAMu

- Επικεφαλίδα για μετρήσεις της ενέργειας PLSu
- Επικεφαλίδα αναφοράς δυναμικού εύρους DBRu

PLOu	PLOAMu	PLSu	DBRu	Payload
------	--------	------	------	---------

Σχήμα 58: Δομή προς τα άνω πλαισίου (η ύπαρξη των PLOAMu, PLSu, DBRu είναι προαιρετική και έπειτα από υπόδειξη με τις κατάλληλες σημαίες στις άδειες στη ροή καθόδου)

PLOu

Η επικεφαλίδα αυτή στέλνεται από κάθε ONU όταν αυτή αποκτά πρόσβαση στο μέσο. Ειδική μέριμνα λαμβάνεται στην περίπτωση που μία ONU έχει περισσότερα του ενός AllocId τα οποία πρέπει να στείλουν δεδομένα στο ίδιο προς τα άνω πλαίσιο. Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή στέλνεται ένα μόνο PLOu και οι εκπομπές των διαφορετικών AllocId ακολουθεί η μία την άλλη ή αλλιώς το δίκτυο συμπεριφέρεται σαν να πρόκειται για AllocId διαφορετικών ONU και στέλνει αντίστοιχο αριθμό PLOu. Το PLOu αποτελείται από τα πεδία εισαγωγής (preamble) και χαρακτήρα αρχής/τέλους (delimiter) που απευθύνονται στο φυσικό επίπεδο και χρησιμοποιούνται για το συγχρονισμό καθώς και από τρία πεδία δεδομένων που απευθύνονται στο ONU (Σχήμα 60). Συγκεκριμένα τα πεδία αυτά είναι τα παρακάτω:

- **BIP**, 8-bit

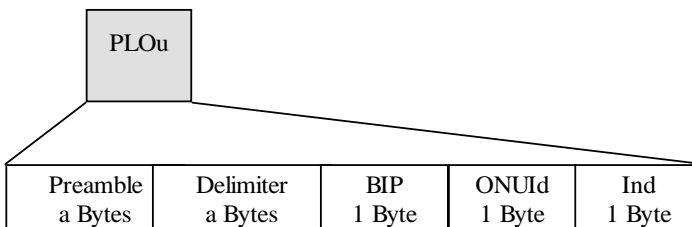
χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ισοτιμίας όλων των bytes (εξαιρούνται τα preamble και delimiter) από το αμέσως προηγούμενο πεδίο BIP μέχρι το υπό εξέταση έτσι ώστε να μετρηθεί ο αριθμός των λαθών στη ζεύξη.

- **ONU-ID**, 8-bit

αποτελεί τη διεύθυνση της ONU και χρησιμοποιείται για το μονοσήμαντο προσδιορισμό της.

- **Ind**, 8-bit

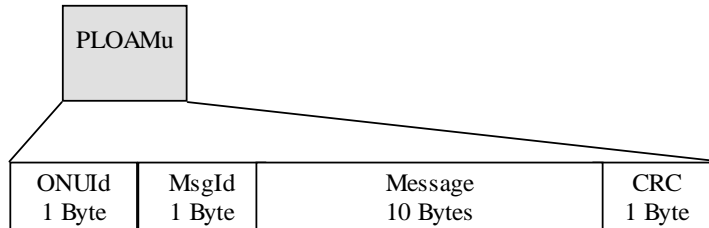
παρέχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες της ONU στην OLT. Οι πληροφορίες αυτές έχουν να κάνουν με επείγοντα μηνύματα PLOAM, το είδος του TCONT που αναμένει εξυπηρέτηση και πληροφορία σχετική με το FEC.



Σχήμα 59: Δομή επικεφαλίδας PLOu

PLOAMu

Έχει μήκος 13 bytes και μεταφέρει τα μηνύματα λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer OAM ή PLOAM). Η δομή του φαίνεται στο Σχήμα 60.



Σχήμα 60: Το προς τα κάτω πλαίσιο του GPON

Δομή επικεφαλίδας PLOAMu

PLSu

Έχει μήκος 120 bytes, μεταφέρει μηνύματα σχετικά με την ενέργεια και το περιεχόμενό του καθορίζεται από το ίδιο το ONU ανάλογα με το σχεδιασμό του. Οι έλεγχοι ενέργειας είναι απαραίτητοι στη περίπτωση τόσο στην περίπτωση που ένα ONU είναι ενεργό όσο και κατά την εγκατάσταση αυτού στο δίκτυο.

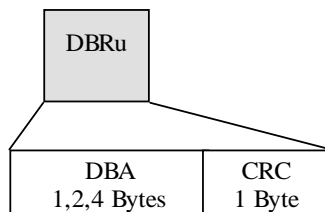
DBRu

Η επικεφαλίδα αυτή σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του TCONT που εκπέμπει και αποτελείται από δύο επιμέρους υποπεδία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 61.

Το πεδίο DBA παρέχει την κατάσταση της κίνησης στο συγκεκριμένο TCONT.

CRC

Προστατεύει με κυκλικό κώδικα μείωσης λαθών που χρησιμοποιεί το πολυώνυμο $g(x)=x^8+x^2+x+1$ την DBRu. Αν εντοπισθεί σφάλμα το οποίο δεν είναι δυνατό να διορθωθεί απορρίπτεται η πληροφορία που περιέχεται στην επικεφαλίδα DBRu.



Σχήμα 61: Δομή επικεφαλίδας DBRu

Payload

Το μέγεθος του πεδίου αυτού είναι μεταβλητό και καθορίζεται από τα byte που απομένουν αν από τα byte που συνολικά αναθέτονται σε ένα TCONT αφαιρεθούν τα byte που αφορούν στις επικεφαλίδες. Το πεδίο payload μεταφέρει δύο ειδών πληροφορίας και μέσω αυτών χαρακτηρίζεται.

Payload τύπου GEM περιέχει πακέτα τύπου GEM. Τα πλαίσια που στέλνονται από τα ONU στο OLT υφίστανται κατάτμηση για να διασχίσουν το δίκτυο και στη συνέχεια το OLT ενώνει τα διάφορα τμήματα. Τα διάφορα αυτά τμήματα αποτελούν το payload των GEM πακέτων το οποίο συμπληρώνεται με την προσθήκη της επικεφαλίδας GEM όπως φαίνεται στο Σχήμα 62 και αποτελείται από τα πεδία:

Το πεδίο Payload length indicator (PLI) μήκους 12-bit που δείχνει σε bytes το μέγεθος του τμήματος

Το πεδίο Port ID που καθορίζει το TCONT μήκους 12-bit από το οποίο προήλθε το τμήμα αυτό έτσι ώστε να είναι δυνατή η πολυπλεξία της κίνησης

Το πεδίο Payload type indicator (PTI) το είδος του μεταφερόμενου payload

Το πεδίο Header error control (HEC) μήκους 13-bit που διασφαλίζει την ορθότητα της επικεφαλίδας

PLI 12 Bits	Port Id 12 Bits	PTI 3 Bits	HEC 13 Bits	Τμήμα Payload N Bytes
----------------	--------------------	---------------	----------------	--------------------------

Σχήμα 62: Δομή πεδίου Payload προς τα άνω πλαισίου

4.4 Σύγκριση τεχνολογιών APON, EPON και GPON

Στην ενότητα αυτή θα δοθούν οι συγκρίσεις, με βάση τη σειρά εμφάνισής τους, των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες σε μία προσπάθεια να καταστεί συνολικά κατανοητή η μετάβαση από τη μία τεχνολογία στην άλλη καθώς και οι ανάγκες που οδήγησαν στην εξέλιξη αυτή. Σε ένα πρώτο στάδιο θα συγκριθούν οι τεχνολογίες APON και EPON ενώ σε ένα δεύτερο οι EPON και GPON. Ακόμα στην ενότητα αυτή δίνονται συνοπτικά και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν στις παραπάνω ενότητες.

4.4.1 Σύγκριση APON με EPON

Στον πίνακα 5 δίνεται η σύγκριση των τεχνολογιών APON και EPON.

	EPON	APON
Εισηγητής	EFM (Ethernet in the First Mile)	NTT,BC,etc.
Χρονολογία	-	1995
Πρωτόκολλο Επιπέδου 2	Ethernet	ATM
Μεταφορά	Frame	Fixed Cell
Ταχύτητα	1.25/1.25 Gbps	155/622 Mbps
Κύριοι Παροχείς Υπηρεσιών	CLECs, ELECs, DLECs, MSOs, ILECs	FSAN ILECs
Standard	IEEE 803.2ah	FSAN , ITU G.983
Τεχνική Upstream Ζεύξης	TDMA, κ.α.	TDMA
IP Αποδοτικότητα	Καλή	Μέτρια
Αναβάθμιση	Ναι στα 10Gbps	Δύσκολη
ONU λειτουργίες	Δρομολόγηση , Μεταγωγή κ.α.	-

Κύρια Δαπάνη	Ethernet Switch	ATM Switch
Υπηρεσίες	POTS, Data VOIP, IP Video	POTS, Data

Πίνακας 13: Σύγκριση APON – EPON

4.4.2 Σύγκριση EPON με GPON

Στον πίνακα 6 δίνεται η σύγκριση των τεχνολογιών EPON και GPON.

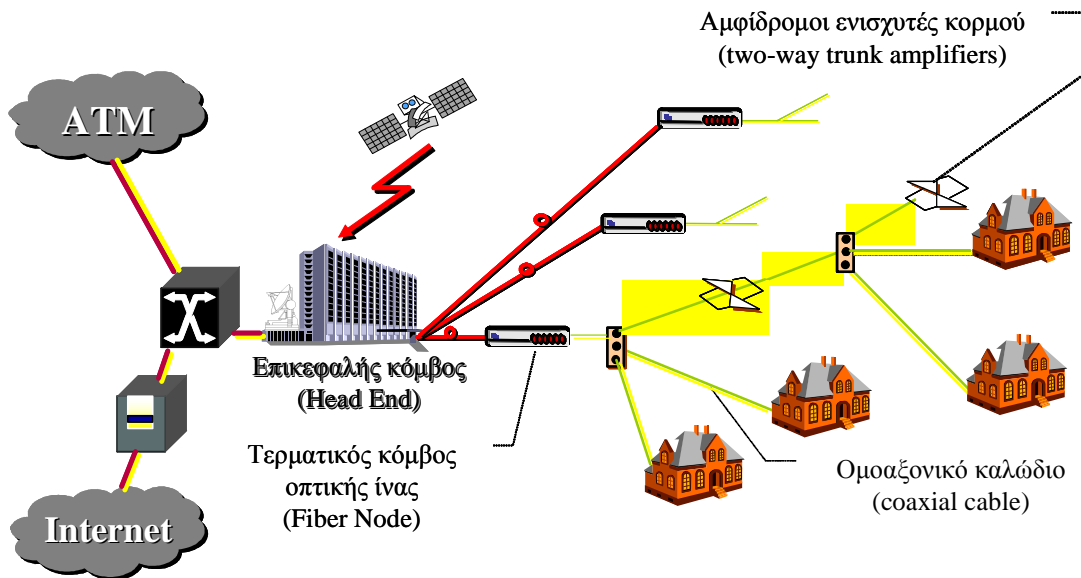
	EPON	GPON
Εισηγητής	EFM (Ethernet in the First Mile)	FSAN
ODN classes ODN = Optical Distribution Network = Οπτικό δίκτυο διανομής	A,B	A , B , C Η χρήση της ODN class C οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους για την τοπολογία μέσω διπλασιασμού των end-users σε κάθε δένδρο PON
Ταχύτητα	1.25/1.25 Gbps	1.25,2.5Gbps(d)/155,622 Mbps ή 1.25,2.5Gbps(u)
Αναβάθμιση	Μία επιλογή τα 10Gbps	Πολλές επιλογές
Ταχύτητα Upstream Ζεύξης	1.25Gbps πάντα → περιττό κόστος διότι δεν είναι αναγκαία πάντα τέτοια ταχύτητα για την upstream ζεύξη	Καθορίζεται ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες
Απόδοση	Μικρή → μεγάλες IP επικεφαλίδες φόρτωμα του δικτύου	Μεγάλη
Κόστος	Η TDM τεχνική και η μεταφορά φωνής υπαγορεύουν επιπλέον ανάγκες για Hardware/Software για τα VoIP schemes → Επιπλέον κόστος	Υποστηρίζουν μεταφορά υπηρεσιών TDM (σε χαμηλούς E1/T1 και υψηλούς ρυθμούς STM1/OC3) και για αυτό τα standard για Jitter και καθυστερήσεις ικανοποιούνται χωρίς αύξηση του κόστους

Πίνακας 14: Σύγκριση APON – GPON

Κεφάλαιο 4 - Αναβάθμιση Δικτύων Καλωδιακής Τηλεόρασης σε Αμφιδρομικά Ευρυζωνικά Δίκτυα Πρόσβασης (Hybrid Fiber-Coaxial - HFC)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την αναβάθμιση των υπαρχόντων δικτύων ομοαξονικών καλωδίων για την μονόδρομη εκπομπή προς τους χρήστες αναλογικού σήματος τηλεόρασης, ώστε να προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα με καλύτερη ποιότητα σήματος και ανοχή στο θόρυβο, οι διαχειριστές αυτών των δικτύων προχώρησαν στην αντικατάσταση του αρχικού (και μικρότερης έκτασης) τμήματος ομοαξονικών καλωδίων του δικτύου από οπτική ίνα. Τα δίκτυα αυτής της αρχιτεκτονικής αποκαλούνται *Υβριδικά Δίκτυα Ομοαξονικών Καλωδίων-Οπτικών Ινών* (Hybrid Fiber Coaxial, HFC) ([21]). Η δομή ενός δικτύου HFC φαίνεται στο Σχήμα 63.



Σχήμα 63: Τοπολογία δικτύου HFC για εκπομπή τηλεοπτικού σήματος και αμφίδρομη επικοινωνία δεδομένων

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 63 το δίκτυο έχει δενδροειδή τοπολογία ξεκινώντας από τον επικεφαλής κόμβο, στον οποίο είτε συγκεντρώνονται τηλεοπτικά προγράμματα από δορυφορικές εκπομπές, είτε παράγονται τοπικά και εκπέμπονται προς τους χρήστες. Το πρώτο τμήμα του δικτύου μέχρι το σημείο, όπου ξεκινά η διακλάδωση προς τις διάφορες κατευθύνσεις, όπως είπαμε αποτελείται από οπτικές ίνες για αύξηση της χωρητικότητας, της αξιοπιστίας και της ποιότητας του σήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί το δενδροειδούς τοπολογίας καλωδιακό τμήμα του δικτύου, όπου για την αποκατάσταση της εξασθένισης του σήματος χρησιμοποιούνται αναλογικοί ενισχυτές μονής κατεύθυνσης.

2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ HFC ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

2.1 Οπτικό τμήμα δικτύων HFC

Το οπτικό τμήμα των δικτύων HFC αποτελείται, είτε από αναλογικές, είτε από ψηφιακές οπτικές ίνες. Οι αναλογικές οπτικές ίνες ταιριάζουν άμεσα στα καλωδιακά δίκτυα καθώς προορίζονται για την μεταφορά της ίδιας φύσης σημάτων. Χρησιμοποιούν γραμμικά laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed FeedBack, DFB), λόγω των απαιτήσεων που προκαλούν τα φαινόμενα της ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation) των διαμορφωμένων κατά φάση (Amplitude Modulation ,AM) τηλεοπτικών σημάτων. Στην οπτική ίνα μεταφέρονται τα ίδια σήματα που μεταφέρονται και στο καλωδιακό τμήμα και απαιτείται μόνο η χρήση οπτικού πομπού και δέκτη στα άκρα του οπτικού τμήματος. Για λόγους ασφάλειας και ευρωστίας του συστήματος συνήθως τοποθετείται και μία εφεδρική ίνα, οπότε απαιτείται επιπλέον ένας RF μεταγωγέας για μεταγωγή μεταξύ της κύριας και της εφεδρικής ίνας. Μέσω αυτής της ζεύξης μπορούν επίσης να μεταφερθούν ψηφιακά σήματα με χρήση των κατάλληλων RF-διαμορφωτών/αποδιαμορφωτών στον επικεφαλής κόμβο (Head End) και στους χρήστες. Δυνατή είναι επίσης η αμφίδρομη μετάδοση στη ζεύξη αυτή, όπου στην περίπτωση ψηφιακού σήματος δεν απαιτείται η χρήση ακριβών DFB laser. Το περιορισμένο όμως εύρος του πομπού στην περίπτωση

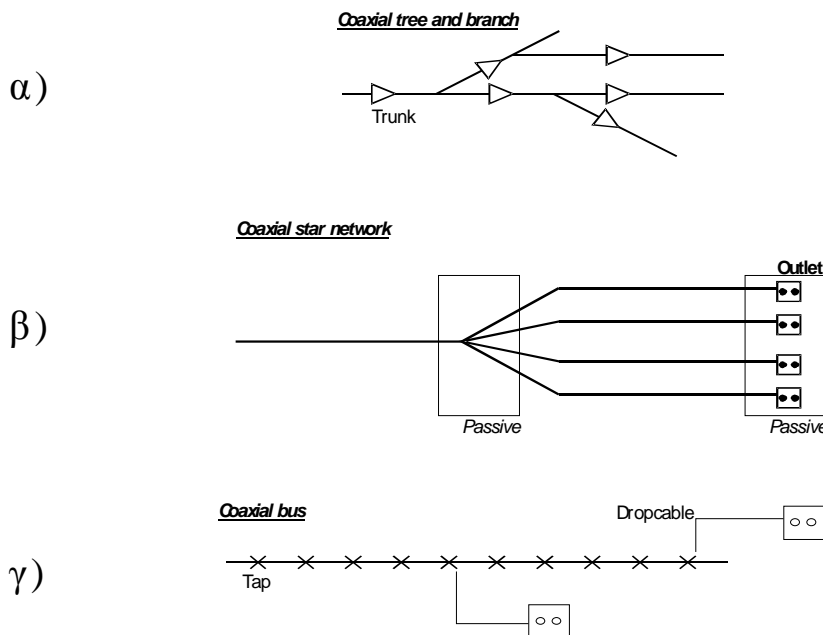
αυτή μπορεί να προκαλέσει αισθητές παρενοχλήσεις στην επικοινωνία στην αντίθετη αυτή κατεύθυνση λόγω της συγκέντρωσης θορύβου από τα σημεία προσαρμογής των χρηστών.

Στην περίπτωση αμφίδρομων δικτύων HFC, όπου μεταδίδονται ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα στο κανάλι επιστροφής (upstream) από τους συνδρομητές προς τον επικεφαλής κόμβο (Head End), ενδείκνυται η χρήση ψηφιακών οπτικών ινών. Για την αντιμετώπιση του εισαγόμενου στο δίκτυο θορύβου το ψηφιακό σήμα αποδιαμορφώνεται και/ή αναγεννάται στον τερματικό κόμβο της ίνας (βλ. Σχήμα 63). Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση του RF σήματος δεν απαιτείται μόνο στην περίπτωση παθητικών ομοαξονικών καλωδίων διανομής προς τους χρήστες, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση απαιτείται. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια το αναγκαίο διασκορπισμό και εγκατάσταση εξοπλισμού σε όλους τους τερματικούς κόμβους.

2.2 Ομοαξονικό τμήμα δικτύων HFC

Στο ομοαξονικό τμήμα των δικτύων HFC συναντώνται τρεις βασικές δομές: το ομοαξονικό δενδροειδές δίκτυο (coaxial tree-and-branch), το δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα (coaxial star) και ο ομοαξονικός δίαυλος (coaxial bus), τα οποία παριστάνονται στο Σχήμα 64. Στα περισσότερα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης συναντώνται και οι τρεις τύποι. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης καθορίζεται από τα ενεργά (ενισχυτές τηλεοπτικού σήματος) και τα παθητικά (διαχωριστές- splitters και συνδετήρες-taps) στοιχεία του δικτύου.

Το ομοαξονικό δενδροειδές δίκτυο (Σχήμα 64α) αντιστοιχεί απόλυτα στη φύση των υπηρεσιών εκπομπής και αποτελεί τον καλύτερο συνδυασμό ποιότητας, αξιοπιστίας και κόστους. Χρησιμοποιείται τόσο στο ανώτερα τμήματα του δικτύου για μεταφορά χαμηλής στάθμης σήματα με χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο και περιορισμένη ενδοδιαμόρφωση, όσο και στα χαμηλότερα τμήματα, όπου απαιτούνται υψηλής στάθμης σήματα για διανομή, αλλά τότε παρουσιάζει υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο και υψηλά επίπεδα ενδοδιαμόρφωσης.

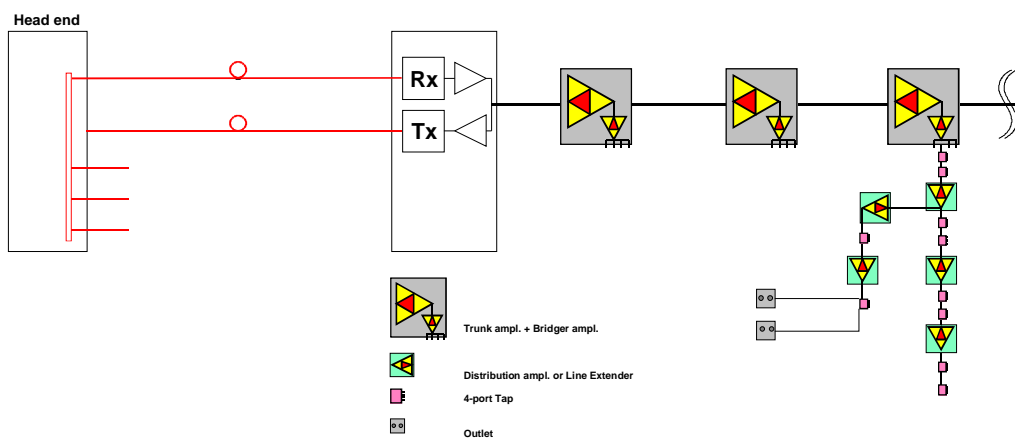


Σχήμα 64: Τοπολογίες καλωδιακών δικτύων

Το δίκτυο σε συνδεσμολογία αστέρα (Σχήμα 64β) χρησιμοποιείται στο τελευταίο τμήμα του δικτύου πρόσβασης. Για την προσαρμογή των επιπέδων ισχύος στις διάφορες απολήξεις απαιτείται στο κέντρο του αστέρα ένας κόμβος πολλαπλών συνδέσεων (multi-tap), που τροφοδοτεί με διαφορετική ισχύ κάθε σύνδεση ανάλογα με το μήκος της γραμμής που ακολουθεί. Το πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας αυτής είναι ο περιορισμένος αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων στοιχείων και η σύνδεση κάθε χρήστη στον κόμβο του αστέρα μέσω διαφορετικού καλωδίου. Στην περίπτωση υποστήριξης υπηρεσιών ζωτικής σημασίας όπως η τηλεφωνία καθίσταται εύκολη η εγκατάσταση γραμμών ηλεκτροδότησης μέσω μίας μονάδας τροφοδοσίας στον κόμβο του αστέρα. Μειονέκτημα αποτελεί το αυξημένο κόστος λόγω του πολλαπλασίου απαιτούμενο μήκους γραμμών, γι' αυτό και χρησιμοποιείται μόνο για την κάλυψη αποστάσεων μερικών εκατοντάδων μέτρων. Τέλος ο ομοαξονικός διάυλος (Σχήμα 64γ) είναι ο απλούστερος και οικονομικότερος τρόπος σύνδεσης νέων χρηστών. Σε κάθε σημείο σύνδεσης τοποθετείται κατάλληλος συνδετήρας (tap) για την προσαρμογή του καλωδίου προς τον χρήστη (drop cable). Λόγω του μεγάλου πλήθους εν σειρά συνδεδεμένων στοιχείων η αξιοπιστία της συνδεσμολογίας αυτής μειώνεται ανάλογα με το μήκος του δικτύου.

2.2.1 Αρχιτεκτονικές αμφίδρομων συστημάτων HFC

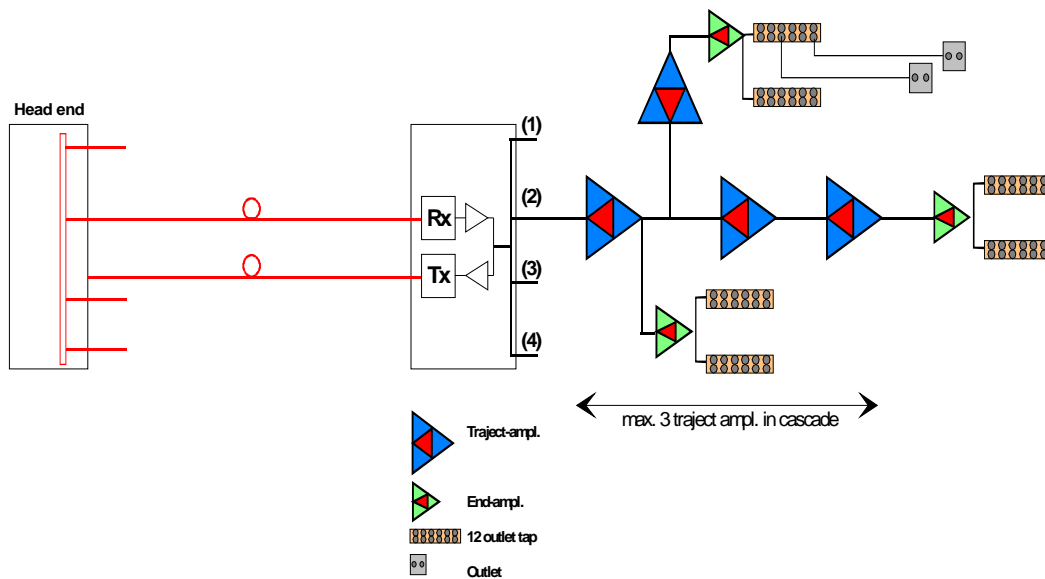
Μία συνήθης τοπολογία αμφίδρομου δικτύου HFC που συναντάται σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες (Βέλγιο, Λουξεμβούργο, Ελβετία, Βρετανία, Γαλλία και Γερμανία) είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 65 με χρήση αναλογικών οπτικών ινών.



Σχήμα 65: Συνήθης τοπολογία αμφίδρομου HFC με χρήση αναλογικών οπτικών ινών

Τα εκπεμπόμενα σήματα, είτε είναι αναλογικά, είτε ψηφιακά, εκπέμπονται από τον επικεφαλής κόμβο (Head End) προς τους τερματικούς οπτικούς κόμβους και από εκεί διαφανώς προς το καλωδιακό δίκτυο. Διαφορετικές οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μετάδοσης και στην αντίθετη κατεύθυνση στο κανάλι από τους χρήστες (upstream) προς τον επικεφαλής κόμβο. Στην κύρια γραμμή του ομοαξονικού δικτύου τοποθετούνται ζεύγη κύριων ενισχυτών (trunk amplifiers) και ενισχυτών ζεύξης (bridging amplifiers). Ο κάθε ενισχυτής ζεύξης συνήθως τροφοδοτεί 4 γραμμές διανομής στα τοπικά δίκτυα. Σε όλες τις ενισχυτικές διατάξεις υπάρχει η πρόβλεψη τοποθέτησης αμφίδρομων ενισχυτών για να καταστεί δυνατή η μετάδοση και στην αντίθετη κατεύθυνση. Το τελικό τμήμα αποτελείται συνήθως από έναν ομοαξονικό διάυλο τοποθετημένο υπόγεια ή παραπλεύρως του δρόμου είτε εναέρια.

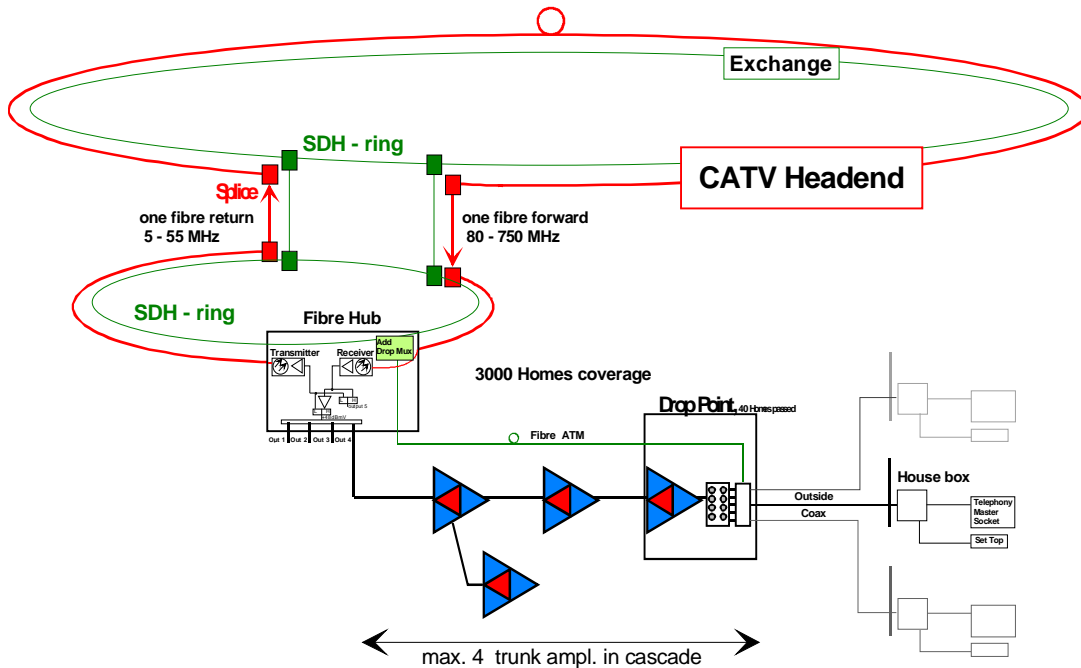
Παραλλαγή της προηγούμενης τοπολογίας αποτελεί η τοπολογία, που φαίνεται στο Σχήμα 66 και συναντάται κυρίως στην Ολλανδία.



Σχήμα 66: Αμφίδρομο HFC δίκτυο με χρήση αναλογικών οπτικών ινών και μικτή τοπολογία δενδροειδή/αστέρα στο καλωδιακό τμήμα

Στην περίπτωση αυτή από τους τερματικούς κόμβους της οπτικής ίνας ξεκινούν συνήθως τέσσερις εξοδοί. Στο καλωδιακό τμήμα χρησιμοποιείται μία μικτή τοπολογία δενδροειδούς δικτύου καταλήγοντας σε τοπολογία αστέρα συνήθως υπόγεια τοποθετημένου. Ο τελευταίος ενισχυτής της διαδρομής τροφοδοτεί το πολύ δύο παροχές για δώδεκα συνδέσεις ή κάθε μία.

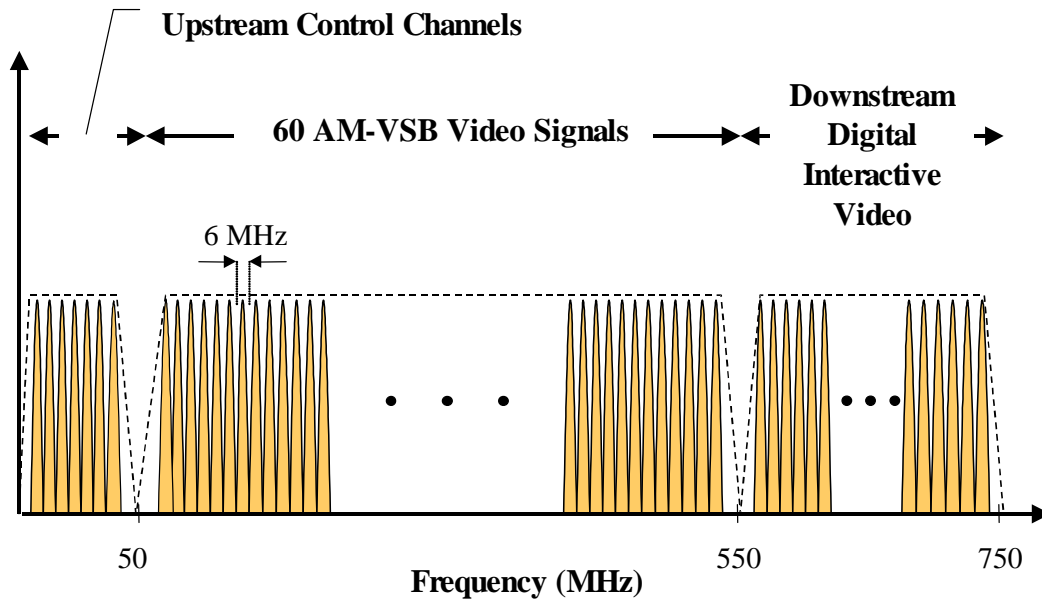
Τέλος στην Μ. Βρετανία έχει αναπτυχθεί δίκτυο HFC, που συνδυάζει την υποδομή ενός συνήθους SDH δακτυλίου, που χρησιμοποιείται για τηλεφωνία και επικοινωνίες δεδομένων, με το καλωδιακό δίκτυο τοπολογίας αστέρα για μετάδοση ραδιοσυχνοτήτων (RF) και συχνοτήτων βασικής ζώνης (baseband), όπως φαίνεται στο Σχήμα 66. Η οπτική ίνα του δικτύου HFC προκύπτει από τον ίδιο αγωγό του SDH δακτυλίου. Το υποκείμενο HFC δίκτυο έχει παρόμοια τοπολογία με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η κύρια γραμμή του ομοαξονικού δικτύου περιλαμβάνει το πολύ τέσσερις ενισχυτές σε σειρά και κάθε γραμμή καταλήγει σε ένα σημείο διανομής, όπου συνδέεται διακλάδωση πολλαπλών συνδέσεων. Για την μετάδοση των ψηφιακών σημάτων (ATM) από το SDH δίκτυο συνδέεται απευθείας οπτική ίνα μέχρι κάθε σημείο διανομής. Εκεί πολυπλέκονται με τα αναλογικά σήματα και εκπέμπονται στο παθητικό δίκτυο τοπολογίας αστέρα μέχρι τον χρήστη όπου διαχωρίζονται από ειδική συσκευή.



Σχήμα 67: Δίκτυο HFC με σύνθεση οπτικών και αναλογικών οπτικών ινών και καλωδιακό δίκτυο τοπολογίας αστέρα

2.2.2 Κατανομή φάσματος και απόδοση καναλιών εκπομπής σε δίκτυα HFC

Από την αναδρομή, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, στις υπάρχουσες υποδομές δικτύων HFC γίνεται φανερό ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αναβάθμιση, που έχει συντελεστεί στα παλαιότερα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης (CATV), καθιστά άμεσα δυνατή την υποστήριξη αμφίδρομων υπηρεσιών με μόνη προϋπόθεση την εισαγωγή ενός καναλιού επικοινωνίας στην κατεύθυνση από τους χρήστες προς τον επικεφαλής κόμβο (upstream). Καθώς ένα μόνο ποσοστό της χωρητικότητας του καλωδιακού δικτύου εξαντλείται από τα υπάρχοντα κανάλια εκπομπής αναλογικού σήματος τηλεόρασης υπήρξε έντονη τάση για την αξιοποίηση του υπολειπόμενου εύρους ζώνης και την απόδοσή του σε κανάλια μετάδοσης ψηφιακού σήματος εκπομπής τόσο προς όσο και από τους χρήστες και συνδρομητές του δικτύου καλωδιακής τηλεόρασης και εισαγωγής της ιδιαίτερα σημαντικής δυνατότητας της αμφίδρομης επικοινωνίας. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην κατανομή του διαθέσιμου φάσματος των ομοαξονικών δικτύων κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 68.



Σχήμα 68: Κατανομή καναλιών και συχνοτήτων στα δίκτυα HFC

Το μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης των καλωδιακών δικτύων εκτείνεται ανάλογα με την υπάρχουσα υποδομή μέχρι τα 300 έως 860 MHz. Από αυτό το φάσμα η περιοχή 50-450 MHz κατανέμεται σε 60 κανάλια εύρους 6 MHz για τη μετάδοση των κατά AM-VSB διαμορφωμένων τηλεοπτικών σημάτων, όπως έχει καθιερωθεί από τα παλαιότερα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης. Το υπολειπόμενο φάσμα αξιοποιείται για την μετάδοση ψηφιακά διαμορφωμένων σημάτων. Καθώς η πρόβλεψη για την εισαγωγή νέων υπηρεσιών επικεντρώθηκε αρχικά στην επέκταση του υπάρχοντος μοντέλου, που καθιερώθηκε από τα δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης, με την συμπλήρωση παρεχομένων υπηρεσιών σχετικά με τη διανομή ψηφιακής τηλεόρασης και σχετικών εφαρμογών με έμφαση στο ψυχαγωγικό περιεχόμενο το υπολειπόμενο εύρος ζώνης μέχρι τα ανώτερα όρια του φάσματος αποδόθηκε σε κανάλια για την εκπομπή προ τους χρήστες ψηφιακών σημάτων, ενώ η χαμηλότερη ανεκμετάλλευτη περιοχή συχνοτήτων αποδόθηκε σε κανάλια επιστροφής για την εκπομπή από τους χρήστες. Οι νεώτερες εξελίξεις οδηγούν με ταχείς ρυθμούς στην αντικατάσταση όλων των υπάρχοντων αναλογικών καναλιών από ψηφιακά. Οι ταχύτητες καθώς και το φάσμα του καλωδιακού δικτύου μπορούν να αυξηθούν σημαντικά με κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης και αναβάθμιση του καλωδιακού δικτύου για καταπολέμηση του θορύβου. Έτσι οι τελευταίες προδιαγραφές προβλέπουν την κατανομή του φάσματος σε διάφορες φάσεις εξέλιξης των HFC δικτύων, τις οποίες συνοψίζει ο Πίνακας 15.

STANDARD	UPSTREAM	DOWNSTREAM
DVB-C ETSI 300 800	5-65 MHz	70-862 MHz QAM
		70-130 MHz QPSK
		300-862 MHz QAM
DAVIC 1.3	8-26.5 MHz	70-1000 MHz QAM
		70-130 MHz QPSK
		300-1000 MHz QAM

MCNS/DOCSIS	5-30 MHz 5-42 MHz (extended subsplit)	50-860 MHz
-------------	------------------------------------------	------------

Πίνακας 15: Συστάσεις για την κατανομή του φάσματος σε κανάλια για αμφίδρομη επικοινωνία σε δίκτυα HFC

Το κάθε κανάλι είναι εύρους 6 MHz (σύμφωνα με τα Αμερικανικά πρότυπα) ή 8 (σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στα χαρακτηριστικά αυτών των καναλιών ανάλογα με την περιοχή του φάσματος στην οποία κείται και θα περιγράψουμε τις εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης και πολλαπλής προσπέλασης σε αυτά ([23], [24], [22]).

2.2.3 Χαρακτηριστικά του διαύλου μετάδοσης

Το κανάλι εκπομπής προς τους χρήστες είναι από παλαιά μελετημένο καθώς ήταν βασικά προδιαγεγραμμένο για υψηλής πιστότητας μετάδοση τηλεοπτικού σήματος. Οι συνθήκες εκπομπής είναι ευνοϊκές καθώς το εύρος ζώνης είναι αρκετό και η εκπομπή προς όλους επιτρέπει τη συνεχή μετάδοση σήματος. Περισσότερες δυσκολίες αντιμετωπίζει η εκπομπή στο κοινό κανάλι επιστροφής, όπου η δενδροειδής τοπολογία και ο συνδυασμός των μεταδιδόμενων σημάτων στο laser εκπομπής στο οπτικό τμήμα του δικτύου καταλήγει σε φαινόμενα συγκέντρωσης και ενίσχυσης θορύβου (noise funneling), είτε ενδογενούς του δικτύου λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ατελειών, είτε εισερχόμενου στο δίκτυο από τα σημεία προσαρμογής των χρηστών. Ιδιαίτερους περιορισμούς επίσης επιβάλλει η διακοπτόμενη μετάδοση σήματος με τη μορφή ριπών εκπομπής (burst transmission) στην περίπτωση πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA), όπου κάθε τερματικό εκπέμπει σε καθορισμένα και κατανεμημένα χρονικά διαστήματα.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καναλιού αυτού μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη μορφή υποσυστημάτων του συνολικού μοντέλου του καναλιού, όπου κάθε ένα αντιστοιχεί στην επίδραση της αντίστοιχης συνιστώσας θορύβου στο μεταδιδόμενο σήμα. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε εν συντομία στα χαρακτηριστικά αυτά και την επίδρασή τους στο μεταδιδόμενο σήμα στην περίπτωση εκπομπής από τους χρήστες προς τον επικεφαλής κόμβο, όπως αυτά έχουν μελετηθεί και συνοψίζονται στα [23], [24].

Ένα πρώτο φαινόμενο, που παρατηρείται στην περίπτωση σύζευξης γραμμών παροχής εναλλασσόμενης τάσης, είναι η εμφάνιση ενός κατά πλάτος διαμορφωμένου «βόμβου» (hum amplitude modulation), ο οποίος είναι προϊόν της διαμόρφωσης της παρεμβαλλόμενης ισχύος του εναλλασσόμενου ρεύματος και υπερτίθεται στην περιβάλλουσα πλάτους του σήματος. Η διαταραχή αυτή επηρεάζει περισσότερο τα τετραγωνικά κατά πλάτος διαμορφωμένα σήματα (QAM) και λιγότερο τα κατά QPSK διαμορφωμένα σήματα.

Μικρο-ανακλάσεις (micro-reflections) εμφανίζονται σε κάθε σημείο προσαρμογής στο καλωδιακό τμήμα λόγω αναπόφευκτων τεχνικών ατελειών και ασυνεχειών. Σε αυτά τα σημεία ένα ποσοστό της ενέργειας του σήματος μοιραία ανακλάται. Το φαινόμενο αυτό επίσης επηρεάζει λιγότερο τα κατά QPSK ή BPSK διαμορφωμένα σήματα ενώ για τα τετραγωνικά κατά πλάτος διαμορφωμένα σήματα (QAM) ενδέχεται να απαιτείται εξισορρόπηση (equalization).

Θόρυβος επίσης εισάγεται λόγω της φύσεως του καλωδιακού δικτύου, που παρουσιάζει χαρακτηριστικά κεραίας λόγω κατασκευαστικών ατελειών των διαφόρων συνδετήρων/διακλαδωτήρων. Έτσι εισάγονται στο δίκτυο παρεμβολές (ingress noise)

από ραδιοφωνικά σήματα και γενικότερα παρεμβολές από περιβαλλοντικές εκπομπές ραδιοφωνικών συχνοτήτων, όπως θόρυβοι παραγόμενοι από μηχανές, οι οποίοι μεταδίδονται στο κανάλι επηρεάζοντας το ψηφιακό σήμα πληροφορίας. Αυτό το είδος θορύβου μπορεί να διακριθεί σε δύο κύριες κατηγορίες:

Παρεμβολές στενής ζώνης (narrowband interference), που σχετίζονται με τη μετάδοση σημάτων της ζώνης HF. Τα σήματα στην περιοχή 5-30 MHz διαδίδονται ως γνωστό με συνεχείς ανακλάσεις στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η διάδοση αυτή επηρεάζεται τόσο από τις ημερήσιες διακυμάνσεις όσο και από την περιοδική ανά 10.7 έτη διακύμανση της ηλιακής δραστηριότητας. Η διέγερση των ηλιακών κηλίδων έχει αποδειχθεί ότι είναι συσχετισμένη με την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης λόγω του αυξημένου ιονισμού των ανωτέρων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Αντίστροφα μείωση της ηλιακής δραστηριότητας διευκολύνει την μετάδοση σημάτων στην περιοχή 5-30 MHz, τα οποία εάν συζευχθούν στα σημεία προσαρμογής των χρηστών περιορίζουν το αξιοποιήσιμο τμήμα του φάσματος.

Τοπικής φύσεως παρεμβολές (local specific interference) σκόπιμες είτε ακούσιες. Τέτοιου είδους παρεμβολές εμφανίζονται, όταν η καλωδιακή υποδομή των χρηστών βρίσκεται πλησίον μονάδων εκπομπής υψηλής ισχύος στην περιοχή 5-40 MHz, όπως για παράδειγμα ερασιτεχνικές ραδιοφωνικές μεταδόσεις.

Θόρυβοι κρουστικής φύσεως (impulsive noise) παρουσιάζονται για διάφορους λόγους, όπως: στεμματόμορφες ηλεκτρικές εκκενώσεις (corona discharges) σε γραμμές τροφοδοσίας, οι οποίες βρίσκονται συχνά τοποθετημένες μαζί με τμήμα του καλωδιακού δικτύου, εκκενώσεις στις επαφές φθαρμένων συνδετήρων, αναφλέξεις κινητήρων αυτοκινήτων και οικιακών ηλεκτρικών συσκευών. Προκαλούνται επίσης από φυσικές αιτίες όπως κεραυνοί, γαλαξιακός θόρυβος και ηλεκτροστατικές εκκενώσεις. Παραλλαγή αυτής της φύσεως θορύβων μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας αποτελούν και οι θόρυβοι ριπής (burst noise). Αυτή η κατηγορία θορύβου μοντελοποιείται ως ζωνοπερατός, προσθετικός λευκός θόρυβος με Γκαουσιανή κατανομή (Additive White Gaussian Noise, AWGN). Για την αντιμετώπιση σε μεγάλο βαθμό των λαθών στη μετάδοση εξαιτίας θορύβων κρουστικής φύσεως ενδείκνυται η εφαρμογή εμπροσθόδοτου ελέγχου σφαλμάτων (Forward Error Correction, FEC).

Το αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης περιορίζεται επίσης από τα γραμμικά στοιχεία του δικτύου, όπως τα φίλτρα διαχωρισμού των καναλιών στις δύο αντίθετες κατευθύνσεις μετάδοσης καθώς και από τη μη γραμμική συμπεριφορά των ενισχυτών, του δέκτη laser στον επικεφαλής κόμβο (Head End) και κυρίως του laser εκπομπής στο οπτικό τμήμα του δικτύου. Η μη γραμμική αυτή συμπεριφορά προκαλεί την εμφάνιση αυξημένων γινομένων ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation products) και αρμονικών εξαιτίας της συμπίεσης, που προκαλείται στον εισαγόμενο θόρυβο, καθώς και όταν τα επίπεδα εκπεμπόμενης από τους χρήστες ισχύος υπερβαίνουν τα καθορισμένα όρια. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να προκαλέσουν παρενοχλήσεις και σε άλλες υπηρεσίες σε ολόκληρη την έκταση του φάσματος και γι'αυτό πρέπει ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης στο κοινό κανάλι (Medium Access Control, MAC) να ελαχιστοποιεί τις περιπτώσεις συγκρούσεων κατά τη μετάδοση από τα διάφορα τερματικά.

Τέλος μπορούν να παρουσιαστούν φαινόμενα μετατόπισης συχνότητας (frequency offset) και θορύβου φάσης (phase noise) σε πολυπλέκτες με συσώρευση συχνοτήτων, που ενδέχεται να περιέχονται στο κανάλι επιστροφής. Φαινόμενα παραμόρφωσης φάσης μπορεί επίσης να προκληθούν και στους ταλαντωτές των τερματικών. Το φαινόμενο αυτό μοντελοποιείται ως ζωνοπερατός γκαουσιανός θόρυβος, που έχει υποστεί φιλτράρισμα μέσω ολοκληρωτή και ο οποίος διαμορφώνει τη φάση του φέροντος.

2.2.4 Εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης για τη μετάδοση προς και από το χρήστη

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του καναλιού μετάδοσης προς τους χρήστες (downstream), όπου επικρατεί το σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης, ο χαμηλός θόρυβος και η δυνατότητα συνεχούς μετάδοσης, που επιτρέπει η μαζική κοινοποίηση (broadcasting) οι εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης, που μελετήθηκαν ως υποψήφιες, είναι τα σχήματα δυαδικής ή ανώτερης τάξης μετατόπισης φάσης (Binary Phase Shift Keying-BPSK, higher level PSK) και της τετραγωνικής διαμόρφωσης πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation-QAM). Η διαμόρφωση BPSK μπορεί και να θεωρηθεί ως ειδική εφαρμογή της αμφίπλευρης διαμόρφωσης πλάτους με καταπιεσμένο φέρον (Double-Side-Band Suppressed Carrier, AM-DSBSC), όπου το ημιτονοειδές φέρον διαμορφώνεται από την κωδικοποιημένη ψηφιακή ακολουθία. Κωδικοποίηση περισσότερων επιπέδων οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος, όπως για παράδειγμα κωδικοποίηση τριάδων ψηφίων οδηγεί στην 8-PSK με αύξηση του ρυθμού μετάδοσης κατά 3/2 σε σχέση με την διαμόρφωση QPSK για τον ίδιο ρυθμό ροής συμβόλων (symbol rate) χωρίς όμως να μπορεί να αντιστοιχηθεί σε ακέραιο αριθμό συμβόλων. Η ακόμα μεγαλύτερης τάξης 16-PSK επιτυγχάνει την ίδια αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης με την 16-QAM, αλλά απαιτεί 4-5dB καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) για τις ίδιες επιδόσεις. Αποτελεί συνήθη επιλογή στην περίπτωση μεθόδου πολλαπλής προσπέλασης με ασύγχρονη διαίρεση κωδίκων (asynchronous CDMA), αλλά δεν προτιμάται στην περίπτωση πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση χρόνου λόγω της κατώτερης επίδοσης και ανοχής στο θόρυβο.

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation-QAM) αποτελεί επίσης επέκταση της διαμόρφωσης πλάτους. Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιεί ως φέρον τη συνισταμένη δύο τετραγωνικών μεταξύ τους ημιτονοειδών σημάτων, τα οποία διαμορφώνονται τόσο κατά πλάτος όσο και κατά φάση. Με κωδικοποίηση υψηλότερων επιπέδων (M-ary encoding) προκύπτουν οι αντίστοιχες μιαιδικές QAM διαμορφώσεις (16-QAM, 64-QAM, 256-QAM κλπ.). Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει πολύ καλή αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και δίνει επίσης τη δυνατότητα σταδιακής αναβάθμισης και αντικατάστασης των αναλογικών καναλιών, καθώς το διαμορφωμένο φέρον παραμένει αναλογικό σήμα, οπότε είναι εύκολη η αναβάθμιση των τερματικών συσκευών αποδιαμόρφωσης για τη δυαδική λειτουργία τόσο για τη λήψη ψηφιακών όσο και αναλογικών σημάτων.

Για το κοινό κανάλι μετάδοσης από τους χρήστες προς τον επικεφαλής κόμβο (upstream), όπου επικρατεί η εκπομπή κατά ριπές (burst transmission) ο δέκτης θα πρέπει να μπορεί να συγχρονίζεται σε διαφορετικό πομπό στα χρονικά πλαίσια κάθε χρονοθυρίδας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση καθορισμένης σχηματομορφής (word preamble), που προηγείται του σήματος πληροφορίας. Οι αντίστοιχες επιλογές για την τεχνική της διαμόρφωσης στο κανάλι επιστροφής περιορίζονται από αυτή την αυστηρή απαίτηση. Η διαμόρφωση QPSK σε μορφή ριπής (burst QPSK) περικλείει την πληροφορία του μεταδιδόμενου σήματος στη φάση του διαμορφωμένου φέροντος, που μπορεί να πάρει τέσσερις διαφορετικές τιμές, οπότε μεταδίδονται δύο ψηφία ανά σύμβολο. Αποτελεί αρκετά εύρωστη διαμόρφωση, όσον αφορά το θόρυβο και τις συνθήκες εκπομπής στο κοινό κανάλι επιστροφής, καθιστώντας δυνατή την αποδιαμόρφωση του σήματος και στην περίπτωση ολίσθησης κατά περίπου +/- 1 σύμβολο. Αυτό σημαίνει ότι οι ριπές εκπομπής επιτρέπεται να ολισθαίνουν εμπρός ή πίσω από το βέλτιστο σημείο για την ορθή αποδιαμόρφωση κατά ένα σύμβολο. Στην περίπτωση, που η ολίσθηση φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, αναλαμβάνει ο επικεφαλής κόμβος την ανατροφοδότηση της πληροφορίας για ευθυγράμμιση της εκπομπής μέσω της διαδικασίας του ranging.

Η τετραγωνική διαμόρφωση πλάτους (QAM) αποτελεί επίσης εναλλακτική λύση και προβλέπεται χρήση μέχρι και 16-QAM. Η λύση αυτή προβλέπεται για μελλοντικές κυρίως επεκτάσεις καθώς η διαμόρφωση αυτή περικλείει την πληροφορία τόσο στο πλάτος όσο και στη φάση του διαμορφωμένου σήματος καθιστώντας την περισσότερο ευαίσθητη στην παρουσία θορύβου. Η παρουσία λευκού θορύβου (AWGN) στο κανάλι προκαλεί τη μείωση της ελάχιστης απόστασης των σημείων στο χώρο καταστάσεων κατά 0.45 ή 7 dB αυξάνοντας την ευαισθησία στην ενδοσυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference-ISI) και αντίστοιχα απαιτείται κατά 5 dB καλύτερος σηματοθορυβικός λόγος (SNR) για να επιτύχει τις ίδιες επιδόσεις με τη διαμόρφωση QPSK υπό την παρουσία λευκού θορύβου. Μία επίσης θεμελιώδης διαφορά των δύο διαμορφώσεων είναι η ανεξαρτησία της QPSK από το πλάτος του διαμορφωμένου φέροντος, ενώ η QAM απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στο κέρδος ενίσχυσης (gain). Σφάλμα της τάξης των 0.4 dB, (που αντιστοιχεί σε 120 MHz θορύβου) προκαλεί χειροτέρευση του λόγου κατά 0.5 dB. Συνολικά η QAM απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια στη συχνότητα του ρολογιού, καταπίεση του φέροντος και εξισορρόπηση πλάτους και φάσης των I και Q συνιστωσών του σήματος. Η περίπτωση διπλάσια χωρητικότητά της όμως έναντι της QPSK την κάνει ελκυστική, εάν εξασφαλιστεί η απαραίτητη αναβάθμιση των δικτύων, ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις λειτουργίας της.

2.2.5 Εναλλακτικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής

Η συγκέντρωση κίνησης στο κανάλι επιστροφής (upstream) από όλα τα τερματικά του δικτύου απαιτεί την εφαρμογή μίας κατάλληλης τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης στο δενδροειδούς τοπολογίας δίκτυο HFC σε συνδυασμό με την εφαρμογή ενός πρωτοκόλλου ελέγχου της πρόσβασης στο κοινό μέσο (Medium Access Control, MAC). Οι επιλογές και σε αυτήν την περίπτωση καθορίζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης και την κατανομή του φάσματος στα κανάλια μετάδοσης. Η τεχνική της πολύπλεξης των καναλιών με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiplexing, FDM), όπως αναφέραμε διατηρείται για την κατανομή του φάσματος μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων HFC. Η επιλογή της ίδιας μεθόδου για κατανομή του φάσματος του καναλιού επιστροφής μεταξύ των χρηστών με κατανομή συχνοτήτων (FDMA) θα ήταν μία απλή και πλήρως αξιόπιστη λύση. Από πλευράς αξιοπιστίας η τεχνική FDMA είναι εξαιρετικά εύρωστη στο θορυβώδες περιβάλλον των δικτύων HFC και η εφαρμογή της αποτελεί απλή και οικονομική λύση. Η στατική κατανομή όμως ενός σταθερού εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη επιφέρει μεγάλη σπατάλη ιδιαίτερα στο πλαίσιο λειτουργίας ετερογενών εφαρμογών με διάφορες απαιτήσεις πόρων και εκρηκτικότητα (burstiness) της παραγόμενης κίνησης. Όπως θα αναφέρουμε και στο επόμενο κεφάλαιο οι απαιτήσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή νέων υπηρεσιών και των νέων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων οδηγούν υποχρεωτικά στην επιλογή μιας δυναμικής διαχείρισης του εύρους ζώνης.

Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί τεχνικές όπως η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) και η πολυπλεξία με διαίρεση κωδικών (Code Division Multiple Access, CDMA), με τις οποίες κατανέμεται δυναμικά κατά τη διάρκεια της σύνδεσης το διαθέσιμο φάσμα μεταξύ των χρηστών ανάλογα με τις στιγμιαίες ανάγκες του κάθε ένα. Η πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου διαιρεί το κανάλι σε σχισμές (χρονοθυρίδες) στα πλαίσια των οποίων μπορεί να εκπέμπουν οι χρήστες. Ο επικεφαλής κόμβος κατανέμει δυναμικά τις χρονοθυρίδες του καναλιού μεταξύ των χρηστών σύμφωνα με τη διαδικασία, που ορίζει το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης για την επικοινωνία των χρηστών με τον επικεφαλής κόμβο. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι

η ευαισθησία στον θόρυβο, ο οποίος προκαλεί την εξάπλωση των μεταδιδόμενων συμβόλων στο πεδίο του χρόνου και αλληλεπικάλυψη αυτών, φαινόμενο γνωστό ως ενδο-συμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference, ISI). Εκεί έγκειται η ανωτερότητα της μεθόδου FDMA, που αντιμετωπίζει καλύτερα το στενής ζώνης θόρυβο, που δημιουργείται εντός του δικτύου HFC, τον οποίο μπορεί και να καταπολεμήσει αποκλείοντας τις ζώνες συχνοτήτων, όπου αυτός εντοπίζεται. Η ανάγκη συμβιβασμού των δύο απαιτήσεων (ευέλικτη διαχείριση του φάσματος και αντοχή στο θόρυβο) οδήγησε σε ένα συνδυασμό των δύο μεθόδων. Επειδή η κατανομή όλου του διαθέσιμου εύρους ζώνης για εκπομπή από τους χρήστες προς τον επικεφαλής κόμβο (upstream) με τη μέθοδο TDMA, δημιουργεί μεν ένα ενιαίο ευρύ κανάλι [25], που μπορεί να αξιοποιηθεί στο μεγαλύτερο ποσοστό του από τους χρήστες, αλλά δημιουργεί συνθήκες μετάδοσης ιδιαίτερα ευπαθείς στο θόρυβο και τις ατέλειες των δικτύων HFC, επιλέχθηκε σε όλες τις υλοποιήσεις και συστάσεις για την ανάπτυξη αμφίδρομων συστημάτων HFC η κατάτμηση του διαθέσιμου φάσματος σε στενότερα κανάλια, τα οποία κατανέμονται μεταξύ των επιμέρους συστημάτων HFC. Η εκμετάλλευση της τεχνικής FDMA με αυτόν τον τρόπο δημιουργεί μικρότερα κανάλια για την εξυπηρέτηση μικρότερου αριθμού χρηστών και αυξάνει τη διάρκεια των μεταδιδόμενων συμβόλων μειώνοντας το φαινόμενο της ενδο-συμβολικής παρεμβολής εξασφαλίζοντας καλύτερη ανοχή στο θόρυβο. Η κατάτμηση των καναλιών σε επιμέρους συστήματα μικρότερου αριθμού χρηστών, στα οποία χρησιμοποιείται η τεχνική TDMA, αποφέρει καλύτερη αντιμετώπιση του θορύβου και την ευελιξία δυναμικής διαχείρισης του εύρους ζώνης. Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε και τη μέθοδο απόδοσης περισσοτέρων του ενός καναλιού επιστροφής σε κάθε σύστημα HFC για την κατανομή των χρηστών δυναμικά κατά της διάρκειας σε κάθε κανάλι με μόνη προϋπόθεση οι πομποί των τερματικών διατάξεων να μπορούν να συντονιστούν στο φέρον κάθε καναλιού στο χρόνο μεταξύ της εκπομπής διαδοχικών πακέτων (frequency agility).

Εναλλακτική μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής τέλος αποτελεί η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κωδικών (Code Division Multiple Access, CDMA), η οποία προτάθηκε για χρήση τόσο στα δίκτυα πρόσβασης HFC [26] όσο και σε δίκτυα ασύρματης μετάδοσης, όπου αντιμετωπίζονται οι ίδιες και περισσότερο αυξημένες συνθήκες θορύβου [27], [28]. Η τεχνική αυτή ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών ευρέως φάσματος (spread spectrum) και έχει μερικά πολύ χρήσιμα χαρακτηριστικά στην περίπτωση εφαρμογής της στα δίκτυα HFC. Η υλοποίηση αυτής της μεθόδου απαιτεί την εφαρμογή ενός εξειδικευμένου σχήματος διαμόρφωσης, που δημιουργεί μία μοναδική κατανομή του εκπεμπόμενου σήματος στο φάσμα του καναλιού ανάλογα με τον κώδικα, που χρησιμοποιεί ο πομπός του χρήστη για τη διαμόρφωση. Οι κώδικες, που χρησιμοποιούνται σε αυτό το Σχήμα διαμόρφωσης, επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή αυτό-συσχέτισης του εκπεμπόμενου σήματος και η ελάχιστη δυνατή ετερο-συσχέτιση των σημάτων μεταξύ τους. Η ταυτόχρονη αποδιαμόρφωση των σημάτων είναι δυνατή στη λήψη με χρήση δεκτών συσχετισμού (correlation receivers). Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει πολύ καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο καθώς το φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος είναι απλωμένο σε μεγαλύτερη περιοχή και ο θόρυβος δεν μπορεί εύκολα να το υπερκαλύψει. Μειωμένη απόδοση της μεθόδου προκύπτει με αύξηση του αριθμού των χρηστών λόγω του αποκαλούμενου ενδογενούς θορύβου (self-generated noise). Ο θόρυβος αυτός είναι αποτέλεσμα των μεγαλύτερων τιμών ετερο-συσχέτισης λόγω της μη τέλειας ορθογωνιότητας των μεταδιδόμενων σημάτων, η οποία προκύπτει λόγω της χρονικής μετατόπισης των σημάτων από τους διαφορετικούς χρήστες, όταν οι πομποί τους δεν είναι συγχρονισμένοι στο πεδίο του χρόνου. Στην περίπτωση των δικτύων HFC έχει

εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή με συγχρονισμό των πομπών των χρηστών του δικτύου με πληροφορία συγχρονισμού, που παράγεται στον επικεφαλής κόμβο και ανατροφοδοτείται μέσω του καναλιού εκπομπής προς τους χρήστες. Η μέθοδος αυτή αποκαλείται σύγχρονη CDMA (S-CDMA) και επιτυγχάνει καλύτερο σηματοθορυβικό λόγο και αύξηση του δυνατού αριθμού χρηστών [26]. Η εγγενής ανοχή σε θόρυβο και παρεμβολές είναι τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, που την κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για εφαρμογή σε θορυβώδες περιβάλλον με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας της μεταδιδόμενης πληροφορίας των χρηστών, αλλά πρέπει να δικαιολογούν το πρόσθετο κόστος και την αυξημένη πολυπλοκότητα του απαραίτητου εξοπλισμού.

3 ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

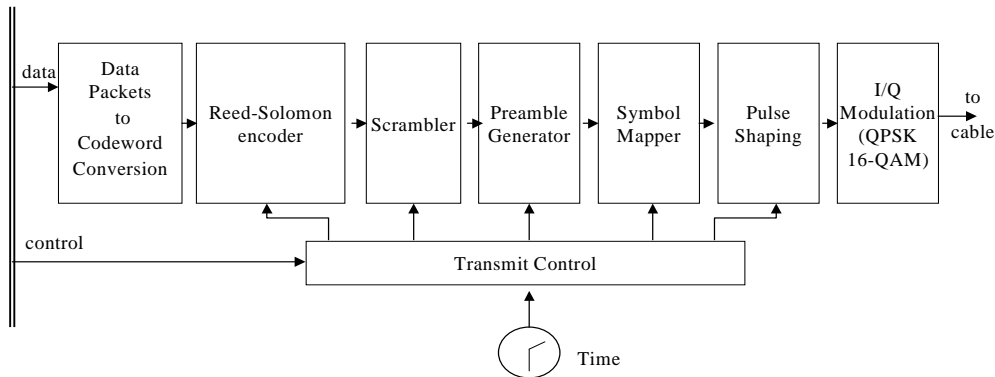
Από τις βασικότερες λειτουργικές απαιτήσεις σε ένα αμφίδρομο δίκτυο HFC είναι η υλοποίηση ενός μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής (Medium Access Control, MAC), που προκύπτει από τη δενδροειδή τοπολογία του δικτύου αυτού και το χαρακτηριστικό της πολλαπλής προσπέλασης στην κατεύθυνση από τους χρήστες προς τον επικεφαλής κόμβο (Head End). Η κατανομή του φάσματος και η επιλογή ενός κατάλληλου σχήματος για τη δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης στους χρήστες καθορίζουν τη χωρητικότητα, τις επιδόσεις και την ευελιξία του συστήματος να υποστηρίξει νέες υπηρεσίες με διάφορες απαιτήσεις ποιότητας. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων, που προδιαγράφονται στα σχετικά πρότυπα, που έχουν δημοσιευθεί έως σήμερα για τον καθορισμό της λειτουργίας των συστημάτων HFC.

3.1 Αναγκαίες λειτουργίες του φυσικού στρώματος για την υποστήριξη του καναλιού επιστροφής και του υποστρώματος MAC

Για την εξασφάλιση αμφίδρομης επικοινωνίας εκτός από την κατανομή του φάσματος, όπως περιγράψαμε, απαιτείται και ένα ευρύτερο σύνολο λειτουργιών από το φυσικό στρώμα για την εξασφάλιση των αναγκαίων λειτουργικών χαρακτηριστικών, οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση του πολύπλοκου σχήματος ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης σε ένα σύστημα HFC. Οι νέες λειτουργικές απαιτήσεις, που προκύπτουν από την ανάγκη υποστήριξης νέων υπηρεσιών με διάφορες απαιτήσεις ποιότητας, πρέπει να υποστηρίζονται και από το αντίστοιχο μοντέλο του φυσικού στρώματος. Στην ενότητα 2 παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του φυσικού μέσου και των διαφόρων εναλλακτικών σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης, και έγινε αναφορά στις νέες λειτουργικές απαιτήσεις, που ανακύπτουν στην περίπτωση αναβάθμισης ενός δικτύου καλωδιακής τηλεόρασης σε αμφίδρομο μέσο για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών.

Όλα τα υπάρχοντα πρότυπα σχετικά με την ανάπτυξη αμφίδρομων συστημάτων HFC, όπως περιγράψαμε στο πρώτο κεφάλαιο, επέλεξαν τη μέθοδο της κατανομής του διαθέσιμου φάσματος των καναλιών με χρήση πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (FDM), ενώ ως μέθοδο ελέγχου πρόσβασης των χρηστών στο κοινό κανάλι επιλέχθηκε η μέθοδος της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου (TDMA). Οι επιλογές αυτές είναι αλληλένδετες με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης και πρέπει να συνδυάζονται με ένα κατάλληλο μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης για την καλύτερη αξιοποίηση του διατιθέμενου εύρους ζώνης. Εκτός από τις λειτουργίες διαμόρφωσης το φυσικό στρώμα είναι επιφορτισμένο με τις λειτουργίες της κωδικοποίησης για έλεγχο

σφαλμάτων και αντιμετώπιση του θορύβου, την κωδικοποίηση των δεδομένων κάθε χρήστη για λόγους ασφαλείας καθώς και την απόκριση στην καθοδήγηση του επικεφαλής κόμβου για την κατανομή των χρονοθυρίδων (time-slots) μετάδοσης στο κοινό κανάλι. Σχηματικά οι λειτουργίες που προβλέπονται να υλοποιούνται σε κάθε τερματικό γενικά από όλα τα πρότυπα παριστάνονται με τη μορφή λειτουργικών οντοτήτων στο Σχήμα 69.



Σχήμα 69: Γενικό μοντέλο λειτουργικών οντοτήτων για την υλοποίηση των λειτουργιών του φυσικού στρώματος για εκπομπή στο κανάλι επιστροφής

Σε όλα τα πρότυπα, στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, προβλέπεται μια εξειδικευμένη λειτουργία του φυσικού στρώματος με στόχο την δυναμικότερη διαχείριση και ταυτόχρονα καλύτερη αξιοποίηση του εύρους ζώνης. Πέραν της διαίρεσης του καναλιού επιστροφής σε χρονοθυρίδες (time-slots) προβλέπεται και η περαιτέρω κατανομή του σε μικρο-σχισμές (mini-slots), οι οποίες εξυπηρετούν τη μετάδοση μηνυμάτων του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης (MAC). Η κατανομή αυτή καθοδηγείται επίσης δυναμικά από τον επικεφαλής κόμβο και ελέγχεται από τη μονάδα ελέγχου πρόσβασης.

Μία επιπλέον λειτουργία του φυσικού στρώματος στην οποία βασίζεται η λειτουργία του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης είναι αυτή του συγχρονισμού των πομπών των τερματικών συσκευών στο σύστημα αναφοράς χρόνου του καναλιού επιστροφής (ranging), ώστε να είναι δυνατή η υλοποίηση του μηχανισμού αιτήσεων στα πλαίσια μικρο-σχισμών, όπως θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Η διαδικασία ευθυγράμμισης των πομπών στο πεδίο του χρόνου εξασφαλίζει το συγχρονισμό των πομπών στα όρια της διάρκειας κάθε χρονοθυρίδας ή μικρο-σχισμής, ώστε να είναι δυνατή η ορθή λήψη από τους διαφορετικούς πομπούς. Γενικά η λειτουργία του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης στα δίκτυα HFC είναι αλληλένδετη με τη λειτουργία του φυσικού στρώματος και αυτό έχει γίνει αποδεκτό από όλα τα σχετικά πρότυπα.

3.2 Λειτουργικές απαιτήσεις του υποστρώματος MAC και μηχανισμοί για τον έλεγχο πρόσβασης στο κοινό κανάλι

Ο μηχανισμός ελέγχου πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής (MAC) είναι υπεύθυνος για την κατανομή των χρονοθυρίδων μεταξύ των χρηστών για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων καθώς και για την εκπομπή αιτήσεων από τα τερματικά για τη δυναμική δέσμευση εύρους ζώνης (αδειών μετάδοσης δεδομένων). Για να είναι δυνατή η δυναμική δέσμευση εύρους ζώνης και να αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA), προβλέπεται η λειτουργία του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης (MAC) το οποίο καθορίζει τα μηνύματα επικοινωνίας των τερματικών με τον επικεφαλής κόμβο για την διαπραγμάτευση του εύρους ζώνης και

καθορισμό όλων των αναγκαίων παραμέτρων για τον συντονισμό των τερματικών και τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Τα πρότυπα, στα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια, επιχειρούν να καθορίσουν ένα σύνολο βασικών παραμέτρων για την εξέλιξη αυτής της επικοινωνίας, ώστε να καθοδηγούνται όσοι αναπτύσσουν συστήματα για δίκτυα HFC και να παράγουν συστήματα βασισμένα σε ένα σύνολο επιλεγμένων μηχανισμών και συμβατά με ένα πρωτόκολλο, που να εξασφαλίζει τη συμβατότητα των διαφορετικών προϊόντων.

3.2.1 Σχήματα διευθυνσιοδότησης στο υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης

Η πρώτη και άμεσα καθοριστική παράμετρος για την υποστήριξη των εναλλακτικών μηχανισμών για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης είναι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος διευθυνσιοδότησης. Όλα τα σχετικά πρότυπα καθορίζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά και την ερμηνεία των διαφόρων διευθύνσεων και αναγνωριστικών αριθμών, που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση των τερματικών και των τυχόν επί μέρους συνδέσεων. Ο προσδιορισμός αυτός είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη συμβατών συστημάτων ικανών να επικοινωνήσουν. Οι δυνατές επιλογές διευθύνσεων είναι ανάλογες των συνολικών προδιαγραφών του πρωτοκόλλου και αποτελούν επιλογή μεταξύ της αυξημένης πολυπλοκότητας της υλοποίησης και των δυνατοτήτων διάκρισης και υποστήριξης υπηρεσιών με διάφορες απαιτήσεις ποιότητας. Εκτός από τη σταθερή διεύθυνση, που συνοδεύει κάθε τερματική συσκευή και συνήθως είναι μήκους 48 ψηφίων σε αντιστοιχία με τις διευθύνσεις, που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα της σειράς 802 της IEEE για τοπικά δίκτυα (LAN), σε κάθε σύστημα HFC χρησιμοποιούνται διευθύνσεις μικρότερου μήκους δυναμικά αποδιδόμενες στα ενεργά τερματικά για την εξέλιξη του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης, των οποίων τη χρήση θα συνοψίσουμε στη συνέχεια.

Η πρώτη και απλούστερη επιλογή είναι η απόδοση μίας μοναδικής διεύθυνσης σε κάθε συνδεδεμένο και ενεργό τερματικό. Η πρόσβαση στο κοινό κανάλι επιστροφής εξασφαλίζεται με άδειες, που εκπέμπει ο επικεφαλής κόμβος και κατανέμουν μία προς μία τις χρονοθυρίδες του καναλιού επιστροφής. Τα τερματικά, των οποίων οι συνδέσεις εξυπηρετούνται με δυναμικές αιτήσεις, εκπέμπουν αιτήσεις για δέσμευση αδειών. Οι άδειες και οι αιτήσεις χρησιμοποιούν τη διεύθυνση του τερματικού, για να καθορίσουν το τερματικό για το οποίο προορίζεται η άδεια ή από το οποίο προέρχεται η αίτηση. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η αδυναμία προσφοράς διακεκριμένων υπηρεσιών ανάλογη των απαιτήσεων των διαφορετικών συνδέσεων ανωτέρων επιπέδων, που ενδέχεται να έχει εγκαταστήσει το τερματικό.

Η επόμενη διαβάθμιση είναι η χρήση διευθύνσεων ανά κλάση υπηρεσιών. Η παραγόμενη κίνηση από συνδέσεις ανωτέρων επιπέδων μπορεί να συγκεντρώνεται σε διαφορετικές ουρές αναμονής στα τερματικά των χρηστών και να χρησιμοποιούνται διαφορετικές αναγνωριστικές διευθύνσεις ανάλογα με την προτεραιότητα και τις απαιτήσεις της σύνδεσης.

Τελική επιλογή στην απόδοση διευθύνσεων αποτελεί η απόδοση διαφορετικών διευθύνσεων ανά σύνδεση ανωτέρου επιπέδου. Για παράδειγμα στην περίπτωση, που ως υπερκείμενο στρώμα χρησιμοποιείται το ATM, κάθε σύνδεση (VPI, VCI) θα πρέπει να χρησιμοποιεί διαφορετικό αναγνωριστικό στο επίπεδο του υποστρώματος ελέγχου πρόσβασης. Αυτή η επιλογή αυξάνει το αναγκαίο μήκος των χρησιμοποιούμενων διευθύνσεων αυξάνοντας αντίστοιχα τη μεταδιδόμενη πληροφορία πρωτοκόλλου, αλλά

παρέχει και τη μέγιστη ευελιξία υποστήριξης διαφοροποιημένης ποιότητας προσφερόμενων υπηρεσιών.

Για την εξασφάλιση της υποστήριξης διακεκριμένων κλάσεων υπηρεσιών στο περιβάλλον ενός δικτύου HFC απαιτείται τουλάχιστον η διάκριση των τεσσάρων βασικών κλάσεων υπηρεσιών, όπως έχουν καθοριστεί από την ITU-T και το ATM Forum [29], [30]. Η υποστήριξη των κλάσεων αυτών σύμφωνα με τις απαιτούμενες παραμέτρους ποιότητας προσφερόμενης υπηρεσίας προϋποθέτει και αντίστοιχη προσφορά διακεκριμένης υπηρεσίας από τον ελεγκτή πρόσβασης στο κανάλι επιστροφής. Οι συνδέσεις σταθερού ρυθμού (CBR) και αυστηρών απαιτήσεων (όπως για παράδειγμα συνδέσεις για μετάδοση φωνής) δεν μπορούν να συμμετέχουν στην ίδια διαδικασία πρόσβασης στο κοινό κανάλι και να υφίστανται την καθυστέρηση λόγω του πρωτοκόλλου ελέγχου πρόσβασης. Οι μεταβλητού ρυθμού συνδέσεις για μετάδοση εφαρμογών πραγματικού χρόνου (rt-VBR), όπως για παράδειγμα συνδέσεις για μετάδοση ζωντανού ήχου και εικόνας, έχουν επίσης αυστηρές απαιτήσεις ως προς τις καθυστερήσεις και κυρίως ως προς τις μεταβολές της καθυστέρησης, ενώ στο επίπεδο του στρώματος ATM έχουν επίσης εγγυημένο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης. Οι συνδέσεις που χρησιμοποιούν το μηχανισμό ABR του στρώματος ATM έχουν επίσης εγγυημένο ελάχιστο εύρος ζώνης και ποσοστό απωλειών, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται, όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στις συνθήκες συμφόρησης του δικτύου. Λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων αλλά και των χαρακτηριστικών της κίνησης, που παράγεται από κάθε κλάση υπηρεσιών, επιβάλλεται το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης να λαμβάνει υπόψη του όλες αυτές τις παραμέτρους, ώστε να εξασφαλίζεται το επιθυμητό επίπεδο προσφερόμενης υπηρεσίας και να αξιοποιούνται ταυτόχρονα με βέλτιστο τρόπο οι διαθέσιμοι πόροι του δικτύου. Διαφορετικοί επίσης είναι και οι κατάλληλοι μηχανισμοί πρόσβασης για κάθε περίπτωση σύνδεσης, τους οποίους θα περιγράψουμε συνοπτικά στη συνέχεια.

3.3 Μηχανισμοί για τον έλεγχο πρόσβασης στο κοινό κανάλι

Ο έλεγχος πρόσβασης στο κοινό κανάλι επιστροφής των συστημάτων HFC, όπως περιγράψαμε, είναι αποκλειστική αρμοδιότητα του επικεφαλής κόμβου (Head End), ο οποίος κατανέμει τις χρονοθυρίδες του κατά TDMA διαιρεμένου εύρους ζώνης με εκπομπή αδειών μετάδοσης προς τα τερματικά και τις επιμέρους συνδέσεις αυτών. Οι εναλλακτικοί μηχανισμοί για τη κατανομή των αδειών μεταξύ των τερματικών ποικίλλουν ως προς την ευελιξία και τις επιδόσεις και επιλέγονται πάντα σε αντιστοιχία με τις απαιτήσεις των συνδέσεων, που προβλέπεται να εξυπηρετούν και τις προσφερόμενες υπηρεσίες.

Η πρώτη επιλογή, η οποία είναι ιδιαίτερα απλή στην υλοποίηση, είναι η στατική κατανομή εύρους ζώνης βάσει προγραμματισμένων και προ-κατανεμημένων αδειών (pre-arbitrated grants), οι οποίες αποδίδονται αυτόκλητα κατά τη φάση εγκατάστασης της σύνδεσης (unsolicited) χωρίς την ανταλλαγή μηνυμάτων αιτήσεων σε επίπεδο ελέγχου πρόσβασης. Η μέθοδος αυτή δεν αξιοποιεί καθόλου την ευελιξία της μεθόδου πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA) και τις στατιστικές μεταβολές της κίνησης για καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, αλλά είναι ο μόνος τρόπος για εξασφάλιση συγκεκριμένων και ελέγξιμων παραμέτρων σε συνδέσεις αυστηρών απαιτήσεων. Για αυτό το λόγο προβλέπεται για την εξυπηρέτηση κυρίως συνδέσεων φωνής.

Για δυναμική απόδοση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του καναλιού χρησιμοποιείται όπως είπαμε η διαδικασία των αιτήσεων (reservation). Για τη μετάδοση των αιτήσεων

υπάρχουν επίσης εναλλακτικοί μηχανισμοί. Οι αιτήσεις μπορούν να μεταδίδονται με μορφή μηνυμάτων του MAC πρωτοκόλλου στα πλαίσια χρονοθυρίδων του καναλιού, που έχουν αποδοθεί από τον επικεφαλής κόμβο στο συγκεκριμένο τερματικό. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι το τερματικό έχει ήδη δεσμεύσει άδειες για μετάδοση με κάποιο τρόπο. Για την αρχικοποίηση της διαδικασίας των αιτήσεων μπορεί να προγραμματίζεται από τον επικεφαλής κόμβο περιοδικά η απόδοση μίας άδειας σε κάθε ενεργό τερματικό με σκοπό τη δειγματοληπτική συλλογή αιτήσεων από αυτό (polling). Η απόκριση του τερματικού σε αυτή την άδεια μπορεί να είναι η εκπομπή ενός μηνύματος αιτήσεων του πρωτοκόλλου στα πλαίσια μιας χρονοθυρίδας ή μιας μικρο-σχισμής αιτήσεων (polling of requests) ή να συνοδεύεται και από την εκπομπή ενός πακέτου δεδομένων, εάν υπάρχουν πακέτα σε αναμονή στις ουρές του τερματικού. Η διαδικασία αυτή, δεν είναι ιδιαίτερα ελαστική καθώς απαιτεί μια στατική δέσμευση εύρους ζώνης ανά τερματικό για λόγους δειγματοληψίας ανεξάρτητα από τις πραγματικές ανάγκες του τερματικού.

Για ακόμη πιο δυναμική απόκριση του συστήματος στις μεταβολές της κίνησης, προβλέπεται και η διαδικασία εκπομπής αιτήσεων με ανταγωνισμό μεταξύ των χρηστών (contention). Επειδή κατά τη διαδικασία αυτή ενδέχεται να προκύψουν συγκρούσεις κατά τη μετάδοση των αιτήσεων από τους χρήστες, προβλέπεται και ο αντίστοιχος αλγόριθμος επίλυσης των συγκρούσεων (contention resolution), ώστε να επιλύονται οι συγκρούσεις με κατάλληλη επανάληψη της διαδικασίας μέχρι όλες οι αιτήσεις να φτάσουν στον επικεφαλής κόμβο. Οι συγκρούσεις όμως οδηγούν στο αντίστοιχο ποσοστό μείωσης της αξιοποίησης του καναλιού καθώς οδηγούν σε επαναμεταδόσεις. Η μέγιστη διέλευση σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται από τον αλγόριθμο επίλυσης συγκρούσεων και έχει μελετηθεί για διάφορους αλγόριθμους, αλλά σε κάθε περίπτωση δεν ξεπερνά ένα ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας του καναλιού και μάλιστα χαμηλότερο από το μισό. Για να μειωθεί η απώλεια αυτή και να εξισορροπηθούν τα οφέλη από τη δυναμική μέθοδο άμεσης πρόσβασης στο κοινό κανάλι, επιλέχθηκε τελικά σε όλα τα πρότυπα η χρήση αυτής της μεθόδου στα πλαίσια μικρο-σχισμών. Έτσι ελαττώνεται το ποσοστό της απώλειας λόγω συγκρούσεων σε ένα μικρότερης χωρητικότητας νοητό κανάλι αιτήσεων, που αποτελείται από τις μικρο-σχισμές. Ο ρυθμός απόδοσης μικρο-σχισμών καθορίζεται από τον επικεφαλής κόμβο και αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ του αναγκαίου εύρους ζώνης για την εκπομπή αιτήσεων και του αναγκαίου εύρους ζώνης για την εκπομπή δεδομένων.

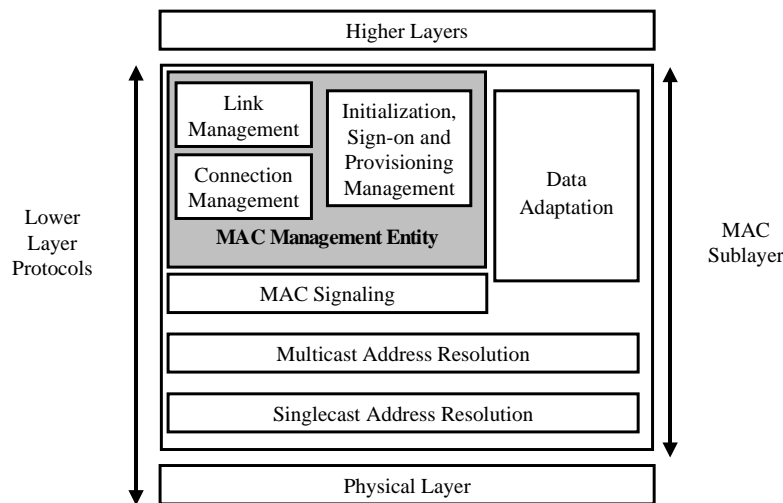
3.4 Πρότυπο DAVIC 1.3

Ο οργανισμός DAVIC (Digital Audio-Visual Council) ασχολείται με τη καθιέρωση ανοιχτών αρχιτεκτονικών για την ανάπτυξη διαλειτουργικών (interoperable) συστημάτων για την υποστήριξη διαδραστικών (interactive) εφαρμογών με μετάδοση ήχου και εικόνας. Στόχος του είναι η προώθηση στους αρμόδιους διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης προτύπων σχετικά με σημεία προσαρμογής δικτύων και στρωμάτων (interfaces), πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικών για τη μεταφορά εφαρμογών ήχου και εικόνας. Για τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέων τεχνολογιών ο οργανισμός αυτός συντάσσει οδηγίες και πρότυπα με στόχο την καθοδήγηση των κατασκευαστών συστημάτων και συσκευών και όσων αναπτύσσουν εφαρμογές για την από κοινού κατανόηση των απαιτήσεων και ανάπτυξη συμβατών και αλληλοϋποστηριζόμενων συστημάτων και υπηρεσιών.

Για την ανάπτυξη δικτύων πρόσβασης στους τελικούς χρήστες με υποστήριξη αμφίδρομων υπηρεσιών πολυμέσων ο οργανισμός αυτός εξελίσσει μία σειρά προτύπων για τον πλήρη καθορισμό του φυσικού στρώματος και των απαραίτητων λειτουργικών απαιτήσεων των τερματικών συσκευών για την επικοινωνία μεταξύ τους σε κάθε δίκτυο

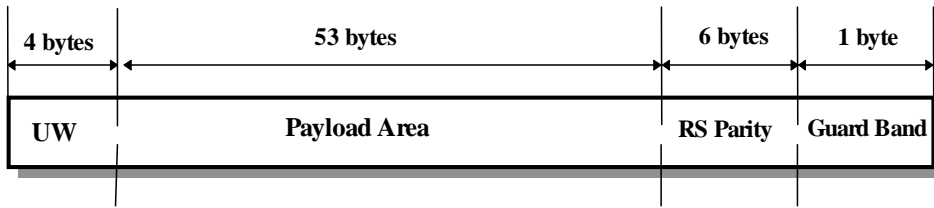
ανάλογα με το διαθέσιμο φυσικό μέσο (δισύρματες γραμμές, ομοαξονικό καλώδιο, οπτική ίνα και κάθε συνδυασμός αυτών). Η στοίβα πρωτοκόλλων κατωτέρων στρωμάτων, η οποία προβλέπεται να υλοποιείται στα συστήματα HFC ([31]) και πάνω στην οποία βασίζεται η ανάπτυξη των προτύπων του οργανισμού DAVIC φαίνεται στο Σχήμα 70.

Η διαστρωμάτωση αυτή ακολουθεί πιστά το πρότυπο IEEE802.1F για LAN και MAN. Μέγιστη σημασία έχει δοθεί, ώστε η λειτουργικότητα των νέων πρωτοκόλλων να είναι στον μέγιστο βαθμό συμβατή και να υποστηρίζει τη λειτουργία υπαρχόντων πρωτοκόλλων, αλλά και παλαιότερων εκδόσεων της ίδιας σειράς προτύπων. Ως υπερκείμενο στρώμα δικτύου προβλέπεται κατά το πρότυπο το στρώμα ATM και οι προδιαγραφές είναι προσαρμοσμένες γύρω από αυτό κυρίως ως προς τη διαμόρφωση πεδίων συμβατών με τη δομή των πλαισίων του ATM. Λιγότερο συγκεκριμενοποιημένες είναι οι λειτουργικές απαιτήσεις για την υποστήριξη των μηχανισμών του ATM, οι οποίοι προβλέπεται να υποστηρίζονται από πλευράς μηνυμάτων επικοινωνίας, αλλά δεν είναι σαφής ο βαθμός προσαρμογής και εναρμόνισης με τις λειτουργικές απαιτήσεις, που αυτοί επιβάλλουν.



Σχήμα 70: Η στοίβα πρωτοκόλλων κατωτέρων στρωμάτων σε δίκτυα HFC κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

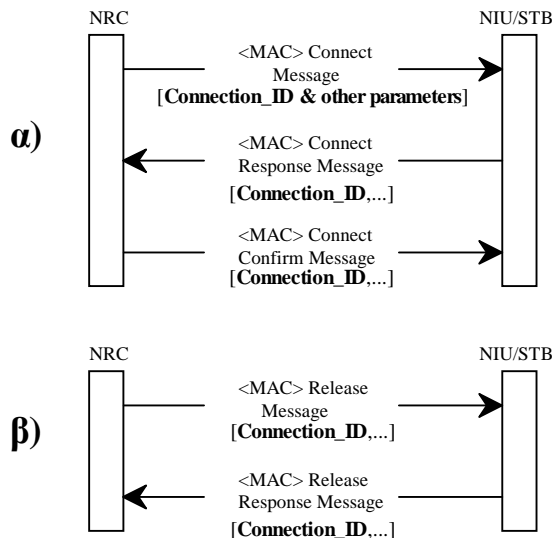
Το κοινό κανάλι επιστροφής (upstream) έχει τα χαρακτηριστικά, που περιγράψαμε στην ενότητα 2 και προβλέπονται όλοι οι μηχανισμοί, που περιγράψαμε στην ενότητα 3.2. Ο έλεγχος προσπέλασης στο κοινό κανάλι επιστροφής γίνεται με διαίρεση χρόνου και στην παρούσα έκδοση του πρωτοκόλλου υποστηρίζονται μικρο-σχισμές αιτήσεων. Η διάρκεια της πλήρους χρονοθυρίδας δεδομένων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής των μικρο-σχισμών, ώστε κάθε χρονοθυρίδα να μπορεί να αποδοθεί κατά βούληση σε τρεις διαδοχικές μικροσχισμές αιτήσεων. Η δομή της χρονοθυρίδας δεδομένων παριστάνεται στο Σχήμα 71 και η δομή της μικρο-σχισμής αιτήσεων στο Σχήμα 74. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι η προηγούμενη έκδοση 1.2 του προτύπου, η οποία υιοθετήθηκε από τον οργανισμό ETSI ως πρότυπο με την ονομασία ETSI 300 800, δεν προέβλεπε τη χρήση μικρο-σχισμών για τη μετάδοση αιτήσεων. Σύμφωνα με την προηγούμενη έκδοση αιτήσεις μπορούσαν να μεταδοθούν με τη μορφή MAC μηνύματος στα πλαίσια πλήρων χρονοθυρίδων και με ανταγωνισμό (contention) μεταξύ των τερματικών, που επιχειρούν μετάδοση αιτήσεων, κατά τη διάρκεια χρονοθυρίδων, που υποδείκνυε ο επικεφαλής κόμβος για αυτό το σκοπό.



Σχήμα 71: Η δομή της χρονοθυρίδας δεδομένων του καναλιού επιστροφής (upstream) σε δίκτυο HFC κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

Το πεδίο δεδομένων της χρονοθυρίδας δεδομένων προβλέπεται για τη μεταφορά ενός πλήρους πακέτου του ATM στρώματος και έχει μήκος 53 bytes και το συνολικό μήκος της χρονοθυρίδας είναι σταθερό και ίσο με 64 bytes. Από αυτά τα τέσσερα πρώτα αποτελούν την ακολουθία συγχρονισμού, τα έξι που ακολουθούν το πεδίο δεδομένων περιέχουν τον κώδικα ελέγχου σφαλμάτων και το τελευταίο byte αφήνεται κενό ως διάστημα ασφαλείας.

Για την επικοινωνία των τερματικών συσκευών των χρηστών (Network Interface Unit, NIU) με τον επικεφαλής κόμβο (Network Related Control, NRC) καθορίζονται μηνύματα του MAC πρωτοκόλλου και το πρωτόκολλο επικοινωνίας καθώς και οι εναλλακτικές μέθοδοι πρόσβασης. Η απόδοση διευθύνσεων στις συνδέσεις προβλέπει μία μοναδική MAC διεύθυνση σταθερή για κάθε τερματική συσκευή (NIU) και μία δυναμικά αποδιδόμενη διεύθυνση, που χρησιμοποιείται ως αναγνωριστικό της κάθε ενεργής σύνδεσης και αποδίδεται από τον επικεφαλής κόμβο (NRC) κατά τη φάση εγκατάστασης της σύνδεσης. Το πρότυπο αυτό καθορίζει τέσσερις βασικές μεθόδους πρόσβασης, εκ των οποίων η μία χρησιμοποιείται κατά τη φάση συγχρονισμού των τερματικών σταθμών. Οι μέθοδοι αυτοί πρόσβασης αποκαλούνται *contention*, *contentionless*, *reservation* και *ranging access*. Η *contentionless* τύπου πρόσβαση προβλέπεται για συνδέσεις, που εξυπηρετούνται με σταθερό ρυθμό προκατανεμημένων αιτήσεων, μέθοδος που εξυπηρετεί, όπως περιγράψαμε στην ενότητα 3.2, ιδιαίτερα συνδέσεις σταθερού ρυθμού και υψηλής προτεραιότητας. Η διαδικασία για την εγκατάσταση και κατάργηση μίας νέας σύνδεση στο HFC δίκτυο περιγράφεται στο Σχήμα 73.



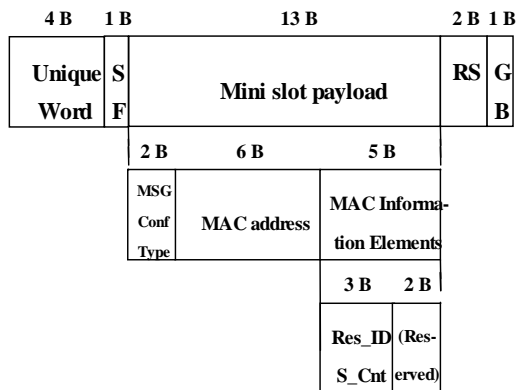
Σχήμα 72: Εξέλιξη φάσεων εγκατάστασης και κατάργησης σύνδεσης κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

Κατά τη φάση εγκατάστασης της σύνδεσης αποδίδεται από το NRC στο τερματικό ο τρέχων αναγνωριστικός αριθμός της σύνδεσης *Connection_ID*. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της σύνδεσης εξυπηρετείται ως *contentionless* σύνδεση και τις ανακοινώνονται περιοδικές άδειες με σταθερό ρυθμό, διαφορετικά της ανατίθεται δεύτερος αναγνωριστικός αριθμός, ο οποίος χρησιμοποιείται ως αναγνωριστικός των αιτήσεων και αδειών της συγκεκριμένης σύνδεσης (*Reservation_ID*). Το μήνυμα για την απόδοση του αναγνωριστικού αριθμού σύνδεσης για την μετάδοση αιτήσεων από τον NRC στο NIU φαίνεται στο Σχήμα 73.

Reservation_ID_Assignment_Message () {	Bits	Bytes	Bit Number / Description
Connection_ID	32	4	
Reservation_ID	16	2	
Grant_Protocol_Timeout	16	2	
}			

Σχήμα 73: Η δομή του μηνύματος ανάθεσης αναγνωριστικού αριθμού σύνδεσης για υποστήριξη συνδέσεων με δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης βάσει αιτήσεων κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

Η μετάδοση αιτήσεων γίνεται στα πλαίσια ειδικού μηνύματος του MAC είτε στα πλαίσια μικρο-σχισμών αιτήσεων, που αποδίδονται από τον κόμβο NRC για τη μετάδοση αιτήσεων από όλα τα NIU με ανταγωνισμό (*contention*) και ενδεχόμενη σύγκρουση, είτε στα πλαίσια πλήρους χρονοθυρίδας, η οποία τότε χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μετάδοση MAC μηνυμάτων. Η δομή των μικρο-σχισμών αιτήσεων παριστάνεται στο Σχήμα 74 και η δομή του μηνύματος αιτήσεων φαίνεται στο Σχήμα 75.



Σχήμα 74: Η δομή των μικρο-σχισμών αιτήσεων κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

Σε κάθε μικρο-σχισμή αιτήσεων περιλαμβάνεται μόνο η μοναδική MAC διεύθυνση της τερματικής διάταξης NIU και ένα MAC μήνυμα αίτησης, το οποίο περιγράφεται στο Σχήμα 75.

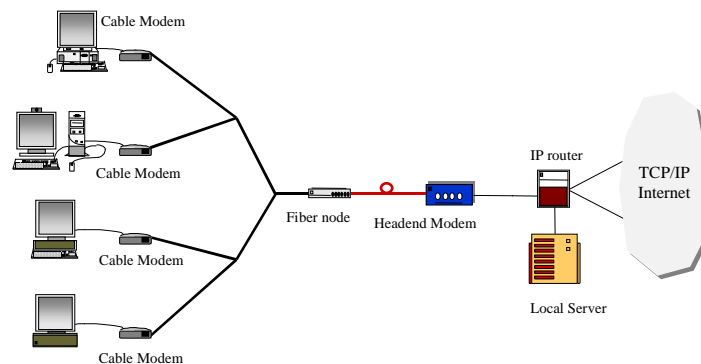
Reservation_Request_Message () {	Bits	Bytes	Bit Number / Description
Reservation_ID	16	2	
Reservation_Request_Slot_Count	8	1	
}			

Σχήμα 75: Η δομή του μηνύματος αίτησης χρονοθυρίδων για μετάδοση κατά το πρότυπο DAVIC 1.3

Σε κάθε περίπτωση (είτε αποστολή μηνύματος με ανταγωνισμό στη διάρκεια μικρο-σχισμών, είτε κατά τη διάρκεια χρονοθυρίδων δεδομένων) η ορθή λήψη της αίτησης επιβεβαιώνεται (positive acknowledgement) από τον κόμβο NRC. Βάσει της επιβεβαίωσης γίνεται και ο εντοπισμός των συγκρούσεων στην περίπτωση αποστολής μηνύματος με ανταγωνισμό στη διάρκεια μικρο-σχισμών αιτήσεων. Η επίλυση των συγκρούσεων στην περίπτωση αυτή γίνεται με καθοδήγηση από τον επικεφαλής κόμβο βάσει ενός αλγορίθμου τριαδικού διαχωρισμού (ternary splitting). Όλοι οι σταθμοί παρακολουθούν την πληροφορία ελέγχου, που μεταδίδει ο κόμβος NRC και όταν επιτρέπεται εκπομπή αιτήσεων σε μικρο-σχισμές, επιχειρούν τη μετάδοση των αιτήσεων σε οποιαδήποτε μικρο-σχισμή. Από τη στιγμή, που κάποιος σταθμός επιχειρήσει μετάδοση αίτησης σε μικρο-σχισμή ξακινά η διαδικασία επίλυσης και μέχρι την επιτυχή μετάδοση της αίτησης δεν επιτρέπεται να επιχειρήσουν άλλοι σταθμοί.

3.5 Πρότυπο DOCSIS

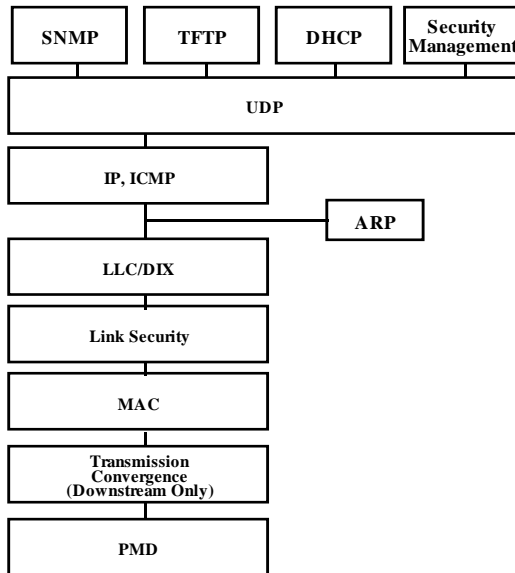
Ο οργανισμός MCNS (Multimedia Cable Network System) συστάθηκε για την προώθηση ενός προτύπου σύμφωνα με τις εξελίξεις της τεχνολογίας, που σημειώθηκαν κυρίως στην αγορά των Η.Π.Α και του Καναδά και προσαρμοσμένο στα πρότυπα και τις προσφερόμενες υπηρεσίες των τοπικών δικτύων καλωδιακής τηλεόρασης. Κύριος στόχος στην παρούσα φάση ανάπτυξης αμφίδρομων δικτύων με χρήση των υποδομών της καλωδιακής τηλεόρασης είναι η διασύνδεση με το Διαδίκτυο (Internet), υπηρεσία η οποία θεωρείται η πιο άμεσα προσοδοφόρα και ελκυστική καθώς γνωρίζει τεράστια ανάπτυξη στην Αμερικάνικη αγορά. Ως εκ τούτου ο οργανισμός MCNS επικεντρώθηκε στη μελέτη ενός προτύπου, το οποίο θα υιοθετηθεί άμεσα από τις αντίστοιχες εταιρείες και θα εκπροσωπεί τα συμφέροντά τους από τις επιλογές και τις επενδύσεις σε συγκεκριμένες τεχνολογίες. Η συνήθης τοπολογία και διασύνδεση, που προβλέπεται να προσφέρει ένα σύστημα HFC ανταποκρίνεται στο γενικό παράδειγμα που περιγράφεται στο Σχήμα 76.



Σχήμα 76: Σύστημα αμφίδρομου HFC δικτύου για την υποστήριξη υπηρεσιών πολυμέσων με πρόσβαση στο υπάρχον Διαδίκτυο (Internet)

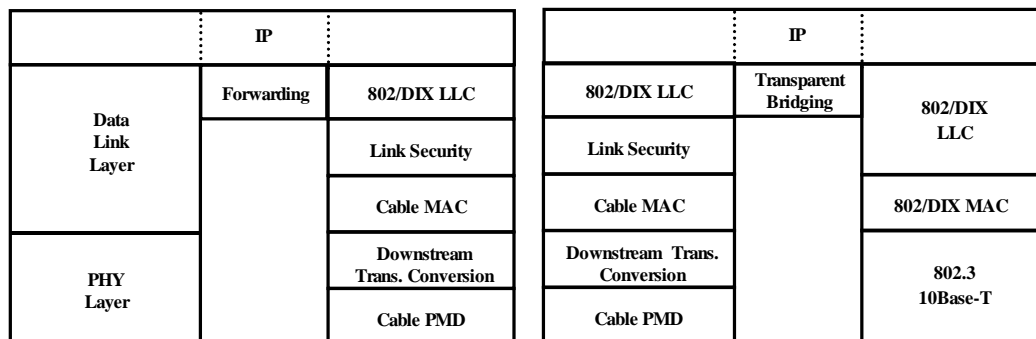
Το πρότυπο που αναπτύχθηκε από τον οργανισμό MCNS σχεδιάστηκε με στόχο την άμεση κάλυψη υπαρχόντων και εντός μικρού χρονικά ορίζοντα αναπτυσσόμενων προϊόντων και υπηρεσιών της αγοράς και καθορίζει τους βασικούς μηχανισμούς και τις ελάχιστες λειτουργικές απαιτήσεις με γενικό τρόπο για την ανάπτυξη αμφίδρομων συστημάτων. Το πρότυπο υιοθετήθηκε από τον οργανισμό SCTE, ο οποίος αποτελεί τμήμα του διεθνώς αναγνωρισμένου Αμερικάνικου οργανισμού παραγωγής προτύπων ANSI, με την ονομασία SCTE DSS 97-2, MCNS Data-over-Cable RF Interface Specification (DOCSIS, [32]) και οδήγησε στην έκδοση της σύστασης του οργανισμού

ITU-T J.112 Annex B. Όλο το πρότυπο επικεντρώνεται στην υποστήριξη υπηρεσιών βασισμένων στη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, στην οποία έχει βασιστεί και η ανάπτυξη του έως τώρα εγκατεστημένου Διαδικτύου (Internet). Η αρχιτεκτονική της διαστρωμάτωσης, που ακολούθησε ο οργανισμός MCNS είναι άμεσα προσαρμοσμένος στις προδιαγραφές του οργανισμού IETF, που εκδίδει τις προδιαγραφές ανάπτυξης του Διαδικτύου (Internet) και παριστάνεται στο Σχήμα 77.



Σχήμα 77: Η στοίβα πρωτοκόλλων, που υποστηρίζονται από το πρότυπο DOCSIS

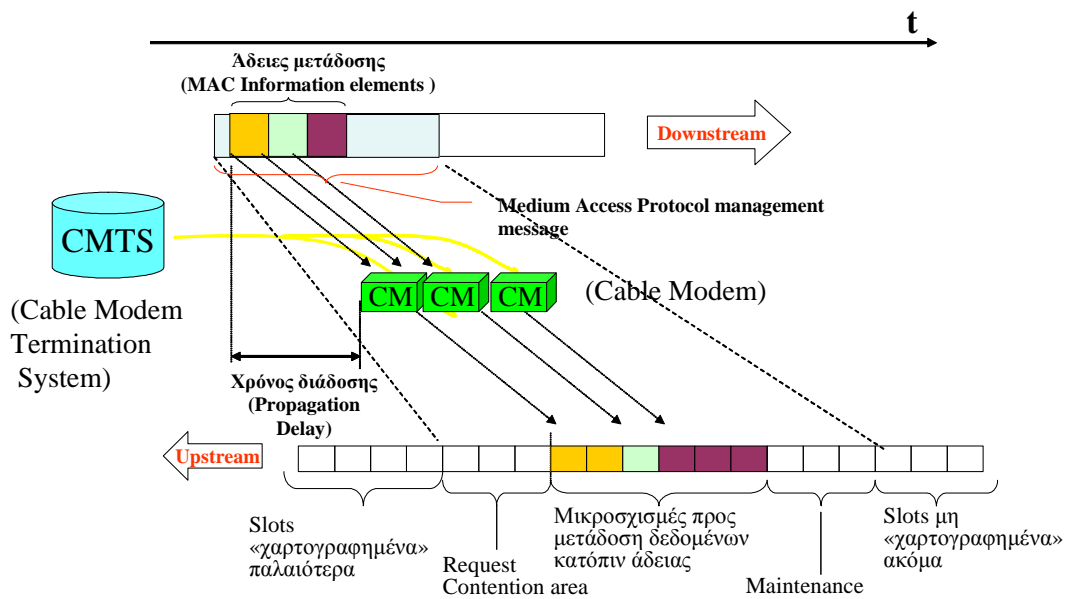
Τα πρωτόκολλα των αντιστοίχων στρωμάτων και τα σημεία διασύνδεσης των τερματικών συσκευών με τις συσκευές των συνδρομητών και του επικεφαλής κόμβου παριστάνονται στο Σχήμα 78.



Σχήμα 78: Η επικοινωνία των διαφόρων στρωμάτων μεταξύ τερματικών διατάξεων και επικεφαλής κόμβου, όπως προβλέπεται από το πρότυπο DOCSIS

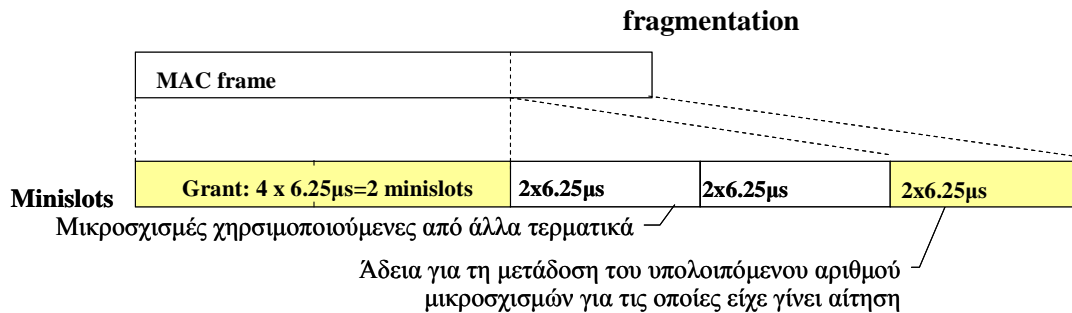
Το πρότυπο που αναπτύχθηκε βασίστηκε κατά πολύ στην εμπειρία από την φάση μελέτης του προτύπου από την ομάδα εργασίας IEEE 802.14 το οποίο όμως δεν ολοκληρώθηκε ποτέ σαν διεθνές πρότυπο καθώς η συγκυρία και η εμπορική υποστήριξη του DOCSIS 1.0 ([32]) το κατέστησαν αδιαφιλονίκητο πρότυπο. Το κοινό κανάλι επιστροφής (upstream) έχει τα χαρακτηριστικά, που περιγράψαμε σε προηγούμενη ενότητα και προβλέπονται όλοι οι μηχανισμοί, που περιγράψαμε στην ενότητα 3.2. Ο έλεγχος προσπέλασης στο κοινό κανάλι επιστροφής γίνεται με διαίρεση χρόνου και υποστηρίζονται μικρο-σχισμές αιτήσεων. Η πρόσβαση στο κανάλι upstream γίνεται με

τυχαία προσπέλαση (συναγωνισμό-contention) όχι για την μετάδοση πακέτων αλλά για τη μετάδοση αιτήσεων προς εξασφάλιση μελλοντικών αδειών μετάδοσης. Η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης είναι TDMA και ο χρόνος διαιρείται όλος σε μικροσχισμές (minislots) διάρκειας ίσης με κάποιο πολλαπλάσιο, δύναμη του 2, των 6.25μsec (δηλαδή η διάρκειά της εκφράζεται ως $2^M \cdot 6.25\mu\text{sec}$, όπου $M=1, 2, \dots, 7$). Βάση αναφοράς χρόνου στο κανάλι επιστροφής αποτελεί η διάρκεια της μικρο-σχισμής και προβλέπεται η σύνθεση χρονοθυρίδων δεδομένων από συρμό διαδοχικών μικρο-σχισμών (δίνοντας τον χαρακτηρισμό στο κανάλι ως «θάλασσα μικρο-σχισμών» - sea of mini-slots). Η κατανομή των μικρο-σχισμών του κοινού καναλιού επιστροφής (upstream) καθορίζεται πλήρως από τον επικεφαλής κόμβο, οποίος «χαρτογραφεί» τις θέσεις των μικρο-σχισμών του καναλιού και αποδίδει ακέραια πολλαπλάσια μικρο-σχισμών για τη μετάδοση μεταβλητού μήκους πακέτων δεδομένων ανάλογα με τις προηγούμενες αιτήσεις από τα τερματικά (Σχήμα 79).



Σχήμα 79: Πολυπλεξία στο κανάλι upstream σύμφωνα με το πρότυπο DOCSIS

Η TDMA πολύπλεξη των πακέτων γίνεται με άδειες μετάδοσης σε ακέραια πολλαπλάσια, διαδοχικών μικροσχισμών (minislot). Αν ο χρόνος δεν επαρκεί να καλύψει τη μετάδοση ενός πλήρους πακέτου, αυτό μπορεί να τεμαχιστεί και μέρος του να μεταδοθεί σε επόμενες διαδοχικές μικροσχισμές κατόπιν αντίστοιχης άδειας.



Σχήμα 80: Μετάδοση TDMA με χρήση μικροσχισμών και ενδεχομένως τεμαχισμού πακέτων ανωτέρων στρωμάτων σύμφωνα με το πρότυπο DOCSIS

Οι μικρο-σχισμές για εκπομπή αιτήσεων αποδίδονται πάντα ανοιχτές σε ανταγωνισμό (contention) μεταξύ όλων των τερματικών (Cable Modems, CM) του δικτύου. Για την επίλυση συγκρούσεων κατά τη μετάδοση αιτήσεων στη διάρκεια μικρο-σχισμών το πρότυπο προβλέπει έναν απλό αλγόριθμο επίλυσης συγκρούσεων (contention resolution) βασισμένο στο μηχανισμό της δυαδικά εκθετικά κατανεμημένης οπισθοδρόμησης (binary exponential back-off), κατά τα πρότυπα των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης της σειράς IEEE 802 (slotted ALOHA) για τα γνωστά τοπικά δίκτυα LAN.

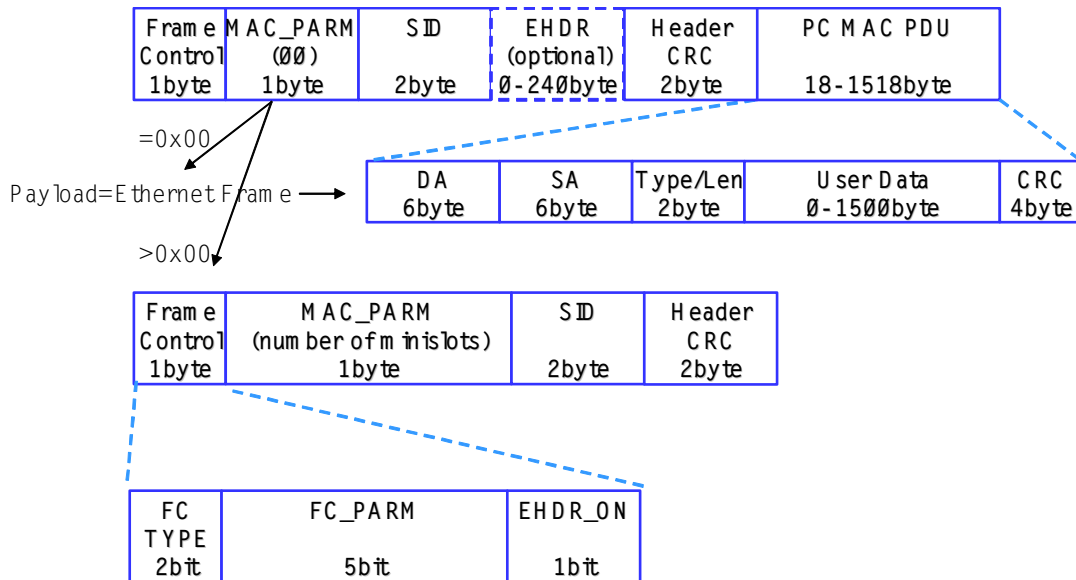
Το πρότυπο αυτό προβλέπει τη περιορισμένη δυνατότητα διάκρισης κλάσεων υπηρεσιών παρέχοντας αναγνωριστικές παραμέτρους ένδειξη της κλάσης υπηρεσίας. Η μέθοδος υποστήριξης των διαφόρων κλάσεων δεν καθορίζεται και αφήνεται στη διακριτική ικανότητα των σχεδιαστών αντίστοιχων συστημάτων. Το πρότυπο αυτό είναι επικεντρωμένο στην εύκολη υλοποίηση αμφίδρομων επικοινωνιών δεδομένων αλλά δεν παρέχει προοπτικές υποστήριξης νέων υπηρεσιών και πρωτοκόλλων με έμφαση στη παροχή διακεκριμένων κλάσεων υπηρεσιών (και κυρίως του ATM).

3.5.1 Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης (MAC) του προτύπου DOCSIS

Το πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης πρέπει σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή να παρέχει την εξής λειτουργικότητα:

- Προσδιορισμό των μικροσχισμών μετάδοσης (minislots)
- Κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των CM
- Προσδιορισμό των μικροσχισμών για αιτήσεις με σύγκρουση και των αφιερωμένων για μετάδοση
- Υποστήριξη μεταβλητού μεγέθους πακέτων
- Δυναμική υποστήριξη διαφόρων ρυθμών μετάδοσης

Για τη δυναμική εξέλιξη του πρωτοκόλλου προβλέπονται συγκεκριμένα μηνύματα (MAC messages) που ανταλλάσσονται μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή στο CMTS (Cable Modem Termination System) και των CM. Η δομή των πλαισίων που ανταλλάσσονται στο επίπεδο MAC είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 81. Όπως φαίνεται στο σχήμα στο επίπεδο MAC υποστηρίζεται ενθυλάκωση των πακέτων του ανώτερου στρώματος (με προφανέστερη χρήση πλαισίων Ethernet ως MAC PDU, γι' αυτό προβλέπεται και σχετικό μέγιστο μήκος PDU 1518 Byte) με την προσθήκη επικεφαλίδας 6 (με επέκταση έως 246 εάν απαιτείται) Bytes. Το πεδίο επικεφαλίδας EHDR μεταβλητού μεγέθους είναι προαιρετικό και χρησιμοποιείται κυρίως για την υποστήριξη λειτουργιών ασφαλείας (Baseline Privacy Interface Plus, “BPI _ MAC Extended Header”). Η ανταλλαγή μηνυμάτων αποκλειστικά για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MAC υποδεικνύεται από το πεδίο MAC_PARM (1 Byte), το οποίο έχει την τιμή 0x00 για πλαίσια τα οποία μεταφέρουν δεδομένα του ανώτερου στρώματος, ενώ οποιαδήποτε μη μηδενική τιμή αντιστοιχεί σε αντίστοιχο μήνυμα του πρωτοκόλλου MAC και τερματίζεται μεταξύ CMTS και CM.



Σχήμα 81: Δομή πλαισίου σύμφωνα με το πρότυπο DOCSIS

Τα πεδία της επικεφαλίδας του πλαισίου MAC συνολικά έχουν τις εξής λειτουργίες:

- **FC**, Frame Control, 1 Byte, χαρακτηρίζει τον τύπο της επικεφαλίδας και αναλύεται στα παρακάτω υπο-πεδία:
 - FC TYPE, 2 bits χαρακτηρίζει τον τύπο του υπολοίπου πακέτου
 - FC PARM, 5 bits στην τιμή 0; άλλες τιμές είναι δεσμευμένες για μελλοντική χρήση και στην παρούσα έκδοση αγνοούνται
- **EHDR_ON**, 1 bit, τιμή 1 αν υφίσταται Extended Header αλλιώς 0
- **MAC_PARM**, MAC Parameters 1 Byte, αποκωδικοποιείται ανάλογα με την τιμή του FC
 - Αν EHDR_ON=1, περιέχει το μήκος του πεδίου EHDR.
 - Αλλιώς αν αποτελεί μέρος σύντμησης πολλαπλών μηνυμάτων περιλαμβάνει τον αριθμό των πλαισίων που αποτελούν το συνολικό μήνυμα.
 - Αλλιώς υποδεικνύει τον αριθμό των μικροσχισμών για τις οποίες γίνεται αίτηση.
- **LEN** (ή **SID**), 2 Bytes, δηλώνει το μήκος του MAC πλαισίου, αλλιώς το SID
 - Αν η επικεφαλίδα είναι μηνύματος αίτησης (Request header), τότε υποδηλώνει τον αναγνωριστικό αριθμό SID της ουράς/κατηγορίας κίνησης για την οποία γίνεται αίτηση από το CM στα 14 LSbits.
 - Αλλιώς περιέχει το μήκος του πλαισίου MAC που εκφράζεται ως το άθροισμα των οκτάδων της επικεφαλίδας επέκτασης, (που ως προαιρετική μπορεί να είναι μηδέν) και του αριθμού των οκτάδων του πεδίου HCS.
- **EHDR**, Extended header; προαιρετικό 0 έως 240 Bytes
- **HCS**, Header Check Sequence; 2 Bytes. Εξασφαλίζει την ορθότητα της επικεφαλίδας.

- Περιέχει το αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός κυκλικού κώδικα ελέγχου σφαλμάτων 16-bit (Cyclic Redundancy Check -CRC) που υπολογίζεται επί των τιμών των υπόλοιπων πεδίων της επικεφαλίδας (του EHDR περιλαμβανομένου, αν υφίσταται). Η μέθοδος υπολογισμού του HCS βασίζεται στο πολυώνυμο CRC-CCITT ($x^{16} - x^{12} - x^5 - 1$), που περιλαμβάνεται στο πρότυπο ISO recommendation 8802-3.
- **PC MAC PDU**; 18-1518 Bytes. Αποτελεί το πεδίο περιεχομένου και μπορεί να μεταφέρει είτε πακέτα δεδομένων ανωτέρων στρωμάτων ή μηνύματα αποκλειστικής χρήσης από το πρωτόκολλο MAC και τερματίζεται μεταξύ CMTS και CM. Σε κάθε περίπτωση η εθυλάκωση του πεδίου ακολουθεί το πρότυπο Ethernet (όπως αυτό ορίζεται στο πρότυπο ISO 8802-3) με τα εξής πεδία (14 Bytes επικεφαλίδα και 4 στο τέλος με το πεδίο ελέγχου σφάλματος):
 - **DA**, Destination Address, 48-bit
Η διεύθυνση (MAC address) του παραλήπτη για τον οποίο προορίζεται το πακέτο
 - **SA**, Source Address, 48-bit
Η διεύθυνση (MAC address) του πομπού από τον οποίο προέκυψε το πακέτο
 - **Type/Len**, 16-bit
Καθορίζει είτε το μήκος (σε Bytes), αν η τιμή του είναι μικρότερη του 1518, διαφορετικά τον τύπο των δεδομένων που περιέχει σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8802-3.
 - **CRC**, 32-bit
Κώδικας ελέγχου σφάλματος του υπολοίπου πακέτου (PDU) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8802-3

3.5.1.1 Δομή μηνυμάτων MAC (MAC Packet PDU Format)

Όπως αναφέρθηκε για τη δυναμική εξέλιξη του πρωτοκόλλου, αλλά και την διαχείριση, διαμόρφωση και λειτουργία του δικτύου, προβλέπονται συγκεκριμένα μηνύματα (MAC messages) που ανταλλάσσονται μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή στο CMTS (Cable Modem Termination System) και των CM. Ένα πλαίσιο που στο πεδίο πληροφορίας (payload) μεταφέρει μήνυμα αποκλειστικά για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου MAC υποδεικνύεται από τη μη μηδενική τιμή του πεδίου MAC_PARM (1 Byte). Στην αντίθετη περίπτωση πρόκειται για πακέτο μεταφοράς δεδομένων και θα έχει υποχρεωτικά την τιμή 0 στα πεδία FC TYPE και EHDR_ON. Η ενθυλάκωση μηνύματος MAC στο πεδίο πληροφορίας (πέραν της επικεφαλίδας DOCSIS) ακολουθεί το πρότυπο Ethernet (όπως αυτό ορίζεται στο πρότυπο ISO 8802-3). Για τους παραπάνω σκοπούς προβλέπονται τα αντίστοιχα μηνύματα, για τα οποία προδιαγράφονται οι παρακάτω επικεφαλίδες:

- Timing Header
- MAC Management Header
- Request Frame
- Fragmentation Header
- Concatenation Header

- Fragmentation Extended Header
- Service Flow Extended Header
- Payload Header Suppression Header
- Unsolicited Grant Synchronization Header

Χωρίς να επεκταθούμε στις λεπτομέρειες χρήσης του κάθε μηνύματος θα αναφέρουμε μόνο τη θεμελιώδη χρήση των *MAC Management header* και *Request frame*, τα οποία αποτέλεσαν και βασική αναβάθμιση της πρώτης έκδοσης του πρωτοκόλλου (DOCSIS 1.0) στη μεταγενέστερη έκδοση DOCSIS 1.1 ([33]), η οποία συμπεριέλαβε αυτούς τους μηχανισμούς για τη δυναμική δέσμευση εύρους ζώνης με τη ταυτόχρονη διάκριση κλάσεων υπηρεσιών και την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας.

Η χρήση του *MAC Management header* αφορά (όπως δηλώνει και η ονομασία του) τη μεταφορά μηνυμάτων διαχείρισης (MAC management messages). Τα αντίστοιχα πεδία έχουν τις παρακάτω τιμές.

- **FC**
FC TYPE=11
FC PARM=00001
EHDR_ON=0
- **MAC_PARM**
Δεσμευμένο (για μελλοντική χρήση)
- **LEN**
Μήκος πακέτου (PDU), σε bytes
- **HCS**
Header Check Sequence

Η επικεφαλίδα ακολουθείται από το μήνυμα *MAC management message*. Μέχρι και 255 τέτοια μηνύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά μέχρι στιγμής έχουν προδιαγραφεί μόνο τα 22 σύμφωνα με την περιγραφή που περιλαμβάνει ο Πίνακας 16.

Message Type Value	Message Name	Message Description
1	SYNC	Timing Synchronization
2	UCD	Upstream Channel Descriptor
3	MAP	Upstream Bandwidth Allocation
4	RNG-REQ	Ranging Request
5	RNG-RSP	Ranging Response
6	REG-REQ	Registration Request
7	REG-RSP	Registration Response
8	UCC-REQ	Upstream Channel Change Request
9	UCC-RSP	Upstream Channel Change Response
10	TRI-TCD	Telephony Channel Descriptor
11	TRI-TSI	Termination System Information
12	BPKM-REQ	Privacy Key Management Request

13	BPKM-RSP	Privacy Key Management Response
14	REG-ACK	Registration Acknowledgement
15	DSA-REQ	Dynamic Service Addition Request
16	DSA-RSP	Dynamic Service Addition Response
17	DSA-ACK	Dynamic Service Addition Acknowledgement
18	DSC-REQ	Dynamic Service Change Request
19	DSC-RSP	Dynamic Service Change Response
20	DSC-ACK	Dynamic Service Change Acknowledgement
21	DSD-REQ	Dynamic Service Deletion Request
22	DSD-RSP	Dynamic Service Deletion Response

Πίνακας 16: MAC Management Messages

Η χρήση του *request frame* χρησιμοποιείται από τό CM για την αποστολή αιτήσεων για τη μετάδοση πακέτων δεδομένων και συνεπώς δέσμευση αιτήσεων στη ροή προς τα άνω. Το μήνυμα αποτελείται από την επικεφαλίδα και μόνο καθώς δεν περιλαμβάνει επιπλέον περιεχόμενο (χωρίς ακόλουθο PDU). Καθώς έχει μήκος μόνο 6 οκτάδων καταλαμβάνει μόνο μία μικροσχισμή για τη μετάδοσή του. Τα αντίστοιχα πεδία έχουν τις παρακάτω τιμές:

- **FC**

FC TYPE=11

FC PARM=0001x

(x = 0, minislot request

(x = 1, ATM cell request)

EHDR_ON=0

- **MAC_PARM**

Συνολικός αριθμός μικροσχισμών (minislots) που αιτείται το CM. Πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις αναγκαίες μικροσχισμές που θα επιτρέψουν τη μετάδοση του ή των πακέτων που βρίσκονται σε αναμονή συμπεριλαμβανομένων και των επιπλέον επικεφαλίδων ενθυλάκωσης (PMD overhead).

- **SID**

Service ID υποδεικνύει την συγκεκριμένη ροή για την οποία γίνεται αίτηση (κλάση υπηρεσίας).

- **HCS**

Header Check Sequence

Κεφάλαιο 5 - Βιβλιογραφία/Αναφορές

- [1] Harte Lawrence, Kikta Roman “Delivering xDSL”, McGraw-Hill, 2001
- [2] ANSI T1.601-1992, “Integrated Services Digital Network (ISDN)-Basic Access Interface for Use on Metallic Loops for Application on the Network Side of the NT (Layer 1 Specification).”
- [3] ITU-T Recommendation L.19, Outside plant copper networks for ISDN services, 10/96
- [4] Walter Y. Chen, The Development and Standardization of Asymmetrical Digital Subscriber Line, IEEE Communications Magazine, May 1999
- [5] ANSI T1E1.4 WG on DSL,” A Technical Report on High-bit-rate Digital Subscriber Lines (HDSL),” T1E1.4/96-006, Apr. 22, 1996.
- [6] K. Maxwell, "Asymmetric Digital Subscriber Line : Interim Technology for the next forty years", IEEE Communication magazine, Oct. 1996.
- [7]ANSI T1.413-1995, “Network and Customer Installation Interfaces-Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL) Metallic Interface.”
- [8] J. Cioffi, “Very-high-speed Digital Subscriber Lines System Requirements,” T1E1.4/98-043R5, Sept. 14, 1989.
- [9] ADSL ForumTR-001, ADSL Forum System Reference Model, May 1996
- [10] ETSI TS 101524 v.1.1.1 06/2001
- [11] ITU-T Recommendation G.991.2 02/2001, SHDSL transceivers
- [12] www.broadband-forum.org
- [13] Z. Papir, A. Simmonds "Competing for throughput in the Local Loop", IEEE Communication magazine, May 1999.
- [14] ITU Rec. G.983.1, Study Group 15, “Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks (PON),” Oct. 1998.
- [15] ITU-T Rec. G.983.4, “A Broadband Optical Access System with Increased Service Capability Using Dynamic Bandwidth Assignment,” Geneva, Switzerland, Oct. 15–26, 2001.
- [16] ITU Rec. G.984.3, Study Group 15, “Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission Convergence Layer Specification,” Geneva, Switzerland, Oct. 21–31, 2003.
- [17] ITU-T Rec. G.7041, “Generic Framing Procedure,” Dec. 2001.
- [18] J. Angelopoulos, et Al., “Efficient Transport of Packets with QoS in an FSN-Aligned GPON”, IEEE Communications Magazine, February 2004,
- [19] G. Kramer, G. Pesavento, “Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network”, IEEE Communications Magazine , February 2002
- [20] Ιάκωβος Βενιέρης : Δίκτυα ευρείας ζώνης 2003

- [21] A.Paff, "Hybrid Fiber/Coax in the Public Telecommunications Infrastructure", IEEE Communications Mag. Vol. 33, No.4, April 1995.
- [22] T. G. Orphanoudakis, J. D. Angelopoulos, "Providing Interactivity via CATV Networks", In proceedings of NETIES'97, Ancona, Oct.1997.
- [23] C. A. Eldering, Nageen Himayat, F. M. Gardner, "CATV Return Path Characterization for Reliable Communications", IEEE Communications Mag. Vol. 33, No. 8, August 1995.
- [24] B. Xenakis, B. Carivan, "Considerations in Implementing Upstream Channel Communications in CATV Systems", Electronic Design, November 1994.
- [25] C. Sierens, K. Venken, R. Hoebeke, J. D. Angelopoulos, T. G. Orphanoudakis, M. S. Nunes, "Evaluation of medium access mechanisms in HFC systems with ATM transport", SPIE's International Symposium and Education Program on Voice, Video and Data Communications, Nov. 1997.
- [26] L. Goldberg, "Synchronous CDMA Technology Improves Cable-Modem Performance in Noisy HFC Environments", Electronic Design, Feb. 1997.
- [27] R. Prasad, "CDMA for Wireless Personal Communications", Artech House Publishers, 1996.
- [28] R. Prasad, T. Onjapera, "An Overview of CDMA Evolution Towards Wideband CDMA", IEEE Communication Surveys, Vol. 1, No. 1, 4th Q 1998.
- [29] ATM Forum Technical Committee, Traffic Management Group. "ATM Forum Traffic Management Specification Version 4.0", Doc. 95-013R11, March 1996.
- [30] ITU-T I.371, "Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN", November 1995.
- [31] DAVIC 1.3 Specification Part 8 "Lower Layer Protocols and Physical Interfaces", www.davic.org
- [32] Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Radio Frequency Interface Specification, SP-RFI-I05-991105. (www.cablemodem.com)
- [33] Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Operations Support System Interface Specification, SP-OSSIV1.1-I02-000714. (www.cablemodem.com)