



ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ και ΔΙΟΙΚΗΣΗ των ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες

(ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ)

**Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών
Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος**

ΑΘΗΝΑ 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
1.1 Τηλεπικοινωνίες και επικοινωνίες δεδομένων	6
1.1.1 Επικοινωνίες και Τηλεπικοινωνίες	6
1.1.2 Εξέλιξη Τηλεπικοινωνιών	6
1.1.3 Ανάγκη των δικτύων	10
1.1.4 Η Σύγκλιση των Τηλεπικοινωνιών	13
1.1.5 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ISO ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.	14
1.1.6 Φορείς Τυποποίησης	15
1.1.7 Ελληνική πραγματικότητα	16
1.2 Βασικές έννοιες από τις τηλεπικοινωνίες	17
1.2.1 Το μοντέλο του Τηλεπικοινωνιακού συστήματος	17
1.2.2 Στοιχεία από τη θεωρία Πληροφορίας	18
1.2.3 Στοιχεία από τη θεωρία σήματος	20
1.2.4 Η έννοια της κωδικοποίησης	30
1.3 Τηλεπικοινωνίες και Τεχνολογία	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	33
ΕΝΟΤΗΤΑ 2Η :ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ	33
2.1 Η μετάδοση της πληροφορίας στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα	33
2.1.1 Βασικές έννοιες	33
2.1.2 τοπολογίες δικτύων	34
2.1.3 Συγχρονισμός	37
2.1.4 Τρόποι επικοινωνίας	39
2.1.5 Τρόποι σύνδεσης	40
2.1.6 Πολυπλεξία (Multiplexing)	42
2.1.7 Ρυθμοί μετάδοσης	42
2.2 Μέθοδος αποκατάστασης σύνδεσης – Είδη μεταγωγής	44
2.2.1 Μεταγωγή κυκλώματος	45
2.2.2 Μεταγωγή μηνύματος	45
2.2.3 Μεταγωγή πακέτου	46
2.3 Μέσο μετάδοσης – κανάλι	48
2.3.1 Τύποι καναλιού θεωρητική προσέγγιση	48
2.3.2 Εύρος ζώνης – χωρητικότητα καναλιού	48
2.3.3 Περί Θορύβου	49
2.3.4 Πληροφορία - εύρος ζώνης – Θόρυβος	50
2.4 Φυσικά μέσα μετάδοσης στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα	50
2.4.1 Χαρακτηριστικά των μέσων μετάδοσης	51
2.4.2 Ενσύρματη μετάδοση	51
2.4.3 Οπτικές ίνες	53
2.4.4 Παράγοντες απωλειών και περιορισμού του εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες	55
2.4.5 Είδη οπτικών ινών και οπτικά καλώδια	61

2.4.6	Ασύρματη μετάδοση	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ		69
3.1	ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	70
3.1.1	Ιστορική εξέλιξη	70
3.2	Τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων	73
3.3	ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	74
3.4	ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	75
	Πηγές LED	76
3.4.1	Πηγές laser	77
3.5	ΦΩΤΟΔΕΚΤΕΣ	79
3.6	ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ	81
3.6.1	Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού	81
3.6.2	Οπτικοί ενισχυτές ίνας προσμείξεων	82
3.7	ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΗΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΝΑΛΙΟΥ		84
4.1	Κωδικοποίηση πηγής: εντροπία και συμπίεση	85
4.2	Κωδικοποίηση Καναλιού	88
4.2.1	Βασικές έννοιες	88
4.2.2	Μη δυαδικές περιπτώσεις	92
4.2.3	Γραμμικοί block κώδικες	93
4.2.4	Κυκλικοί γραμμικοί block κώδικες	94
4.2.5	Κώδικας Reed-Solomon	95
4.2.6	Οι γενικές ιδέες πίσω από την αποκωδικοποίηση	96
4.2.7	Συνελκτικοί κώδικες	97
4.2.8	Φασματικό bit rate και αναλογία ενέργειας bit προς θόρυβο	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ		103
5.1	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΒΑΣΙΚΗ ΖΩΝΗ	103
5.1.1	Διαμόρφωση Πλάτους Παλμών (PAM)	103
5.1.2	Παλμοκωδική Διαμόρφωση (PCM)	104
5.1.3	Εφαρμογές PCM – Ψηφιακή Τηλεφωνία	106
5.1.4	Πλεονεκτήματα PCM έναντι PAM	107
5.2	ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΖΩΝΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ	108
5.2.1	Αναλογική Διαμόρφωση	108
5.2.2	Ψηφιακή Διαμόρφωση	113
5.2.3	Εφαρμογές των διαφόρων τύπων ψηφιακής διαμόρφωσης	121
Πίνακας 3 Απόδοση φάσματος των διαφόρων τύπων ψηφιακής διαμόρφωσης		121
5.3	Ορθογωνική Πολυπλεξία Συχνότητας (Orthogonal Frequency	122

5.3.1	Division Multiplexing – OFDM	122
5.4	Επαναχρησιμοποίηση φάσματος	127
5.5	Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης	128
5.5.1	FDMA	128
5.5.2	TDMA	129
5.5.3	CDMA	130
5.6	Τεχνικές ευρέος φάσματος (Spread Spectrum Techniques)	131
5.6.1	Direct Sequence	132
5.6.2	Frequency Hopping	136
5.6.3	Πλεονεκτήματα από τη χρήση Spread Spectrum Τεχνικών	136
5.6.4	Σύγκριση DSSS-FHSS	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	138
6.1	Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά συστήματα	138
6.1.1	Fixed wireless	139
6.1.2	Είδη FIXED WIRELESS Δικτύων	140
6.1.3	Μετάδοση φωνής και μηνυμάτων	143
6.1.4	Φορητές και άλλες Internet-enabled συσκευές	143
6.1.5	Δικτύωση δεδομένων	144
6.1.6	Τεχνολογίες LMDS και MMDS: Fixed Wireless Options in Telecom	146
6.2	Ευρυζωνικές Τεχνολογίες	151
6.2.1	Ψηφιακή ραδιομετάδοση	151
6.2.2	High Definition Television	153
6.3	Ασύρματες Ευρυζωνικές Τεχνολογίες	154
6.3.1	Wi-Fi	154
6.3.2	WiMAX	157
6.3.3	3G/UMTS	159
6.4	Δορυφορικές ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	163
6.4.1	Η εξέλιξη των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας	163
6.4.2	Το δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας	165
6.4.3	Δορυφορικός σταθμός Διαστήματος	165
6.4.4	Τροchioθέτηση δορυφόρων και είδη τροχιών	166
6.4.5	Τα μέρη του τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου	169
6.4.6	Δορυφορικός σταθμός εδάφους	172
6.4.7	Δορυφορικές μπάντες συχνοτήτων	174
6.4.8	Ισολογισμός ισχύος μιας δορυφορικής ζεύξης	175
6.4.9	Τεχνικές μετάδοσης	176
6.4.10	Υπηρεσίες που παρέχονται από ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα	177
6.4.11	Οι δορυφορικές υπηρεσίες στην Ελλάδα	179
6.5	Οπτικά Τηλεπικοινωνιακά συστήματα	180
6.5.1	Η εξέλιξη των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας	180
6.5.2	Το οπτικό σύστημα επικοινωνίας	183
6.5.3	Τεχνικές μετάδοσης και λήψης οπτικού σήματος	186
6.5.4	Μέθοδοι διαμόρφωσης	188
6.5.5	Τεχνικές φώρασης	192

6.5.6	Ευαισθησία ψηφιακού δέκτη και BER	194
6.5.7	Μεθοδοί πολυπλεξίας στα οπτικά συστήματα	197
6.5.8	Φαινόμενα που επηρεάζουν την Απόδοση των συστημάτων DWDM	202
6.5.9	Σχεδίαση ενός οπτικού συστήματος επικοινωνιών	202
6.5.10	οπτικά ΔΙΚΤΥΑ	204
6.5.11	Σύγχρονα δίκτυα μεταγωγής	205
6.5.12	Πρότυπα οπτικών δικτύων	207
6.5.13	Το πρότυπο FDDI	207
6.5.14	Πρότυπο SONET/SDH Λειτουργία και ρυθμοί μετάδοσης	208
6.5.15	Αρχιτεκτονικές δικτύων SONET/SDH	209
6.5.16	Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων	211
6.5.17	Δίκτυα Long-Haul	211
6.5.18	Δίκτυα πρόσβασης (Access Networks)	212
6.5.19	Μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Networks)	212

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ενότητα 1η : Το περιβάλλον των Τηλεπικοινωνιών –Βασικές έννοιες

1.1 Τηλεπικοινωνίες και επικοινωνίες δεδομένων

Ξεκινώντας την περιήγησή μας στο χώρο των τηλεπικοινωνιών αξίζει να σχολιάσουμε ότι στόχος των επικοινωνιών γενικά είναι η αποστολή ενός μηνύματος από ένα σημείο σε ένα άλλο καθώς και η επιβεβαίωση της πλήρους, ορθής και κατανοητής λήψης του από έναν παραλήπτη. Παρά την απλή αυτή αναφορά, πίσω από τις επικοινωνίες κρύβεται πλήθος από θεωρίες και τεχνικές που ασχολούνται με την αποστολή του παραπάνω μηνύματος.

1.1.1 Επικοινωνίες και Τηλεπικοινωνίες

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διάκριση μεταξύ των όρων **Επικοινωνία** και **Τηλεπικοινωνία**. Η ετυμολογία του όρου καθορίζει και την ορθή χρήση του. Συγκεκριμένα, όταν έχουμε Επικοινωνίες μακρινής απόστασης (από το αρχαίο ελληνικό τηλε), τότε χρησιμοποιούμε τον όρο Τηλεπικοινωνίες. Οι επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις, μας υποχρεώνουν λόγω ανεπάρκειας του μέσου μετάδοσης να αλλάζουμε την μορφή της πληροφορίας προκειμένου να την μεταδώσουμε. Επομένως όταν η πληροφορία δεν αλλάζει μορφή προκειμένου να μεταφερθεί σε μικρές αποστάσεις μιλάμε απλώς για Επικοινωνία, ενώ όταν αλλάζει μορφή για να μεταδοθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις μιλάμε για Τηλεπικοινωνία.

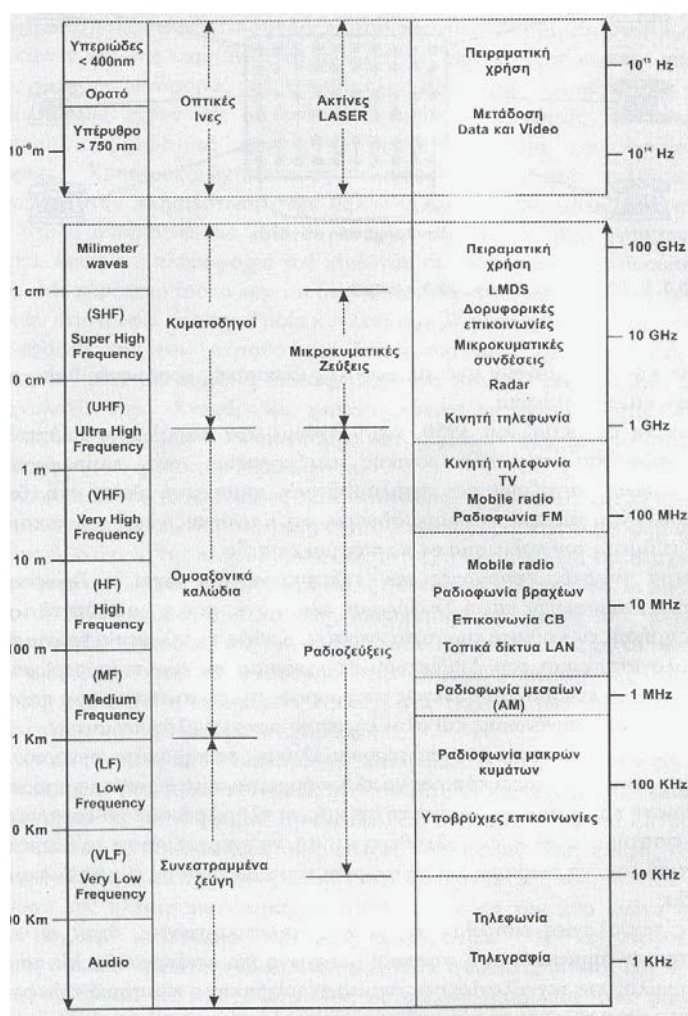
1.1.2 Εξέλιξη Τηλεπικοινωνιών

Από την αρχή της ανθρώπινης ύπαρξης αναπτύχθηκαν διάφορες μορφές τηλεπικοινωνιών καθώς ήταν απαραίτητη από τότε η ανάγκη για επικοινωνία από πολύ μακριά και στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Κάθε εποχή χαρακτηρίστηκε από τους τρόπους που συντελούνταν οι τηλεπικοινωνίες. Τα σήματα καπνού, οι ήχοι των τυμπάνων και της καμπάνας και το άναμμα φωτιάς ήταν μερικοί από τους βασικούς τρόπους μεταφοράς της πληροφορίας σε κάποιες εποχές από τα προϊστορικά χρόνια μέχρι το 18^ο αιώνα μ.Χ. με μικρές διαφορές και φυσικά κάθε φορά πιο εξελιγμένοι από τις προηγούμενες ανάλογα την εποχή, το λαό, τα μέσα τις ανάγκες και τους σκοπούς. Για

παράδειγμα στην αρχαία Ελλάδα υπήρχαν πύργοι, που ονομάζονταν φρυκτωρίες, χτισμένοι σε στρατηγικά σημεία και εκεί άναβαν φωτιές. Με το άναμμα της φωτιάς από φρυκτωρία σε φρυκτωρία, έφθανε η πληροφορία στον προορισμό της. Ο στρατός του Ναπολέοντα είχε προς χρήση κινητούς πύργους οπτικής επικοινωνίας μέσω κωδικοποιημένων σημάτων που του έδιναν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των αντιπάλων. Οι τρόποι αυτοί της επικοινωνίας όμως δεν ήταν ακριβείς ούτε ήταν βέβαιη η επιτυχία τους. Επιπρόσθετα η ταχύτητα μεταφοράς της πληροφορίας ήταν μικρή, ο όγκος της πληροφορίας ελάχιστος και η ασφάλειά της ελάχιστη.

Αυτές οι μορφές επικοινωνίας διατηρήθηκαν μέχρι την εμφάνιση του ηλεκτρισμού. Τότε έγιναν τα πρώτα σοβαρά βήματα με το τηλέφωνο και τον τηλεγράφο, για να φθάσουμε στην σημερινή μορφή της ψηφιακής τεχνολογίας, οπότε και η καθημερινή εξέλιξη στις τεχνικές των τηλεπικοινωνιών είναι αλματώδης και απρόβλεπτη.

Ο Samuel Morse το 1854 με τον τηλεγράφο και ο Graham Bell το 1876 με το τηλέφωνο ουσιαστικά έθεσαν τα θεμέλια των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών. Η χρήση της



σχήμα-1 Κατανομή των εφαρμογών στο φάσμα των συχνοτήτων (Πηγή: Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών 6^η έκδοση 2003)

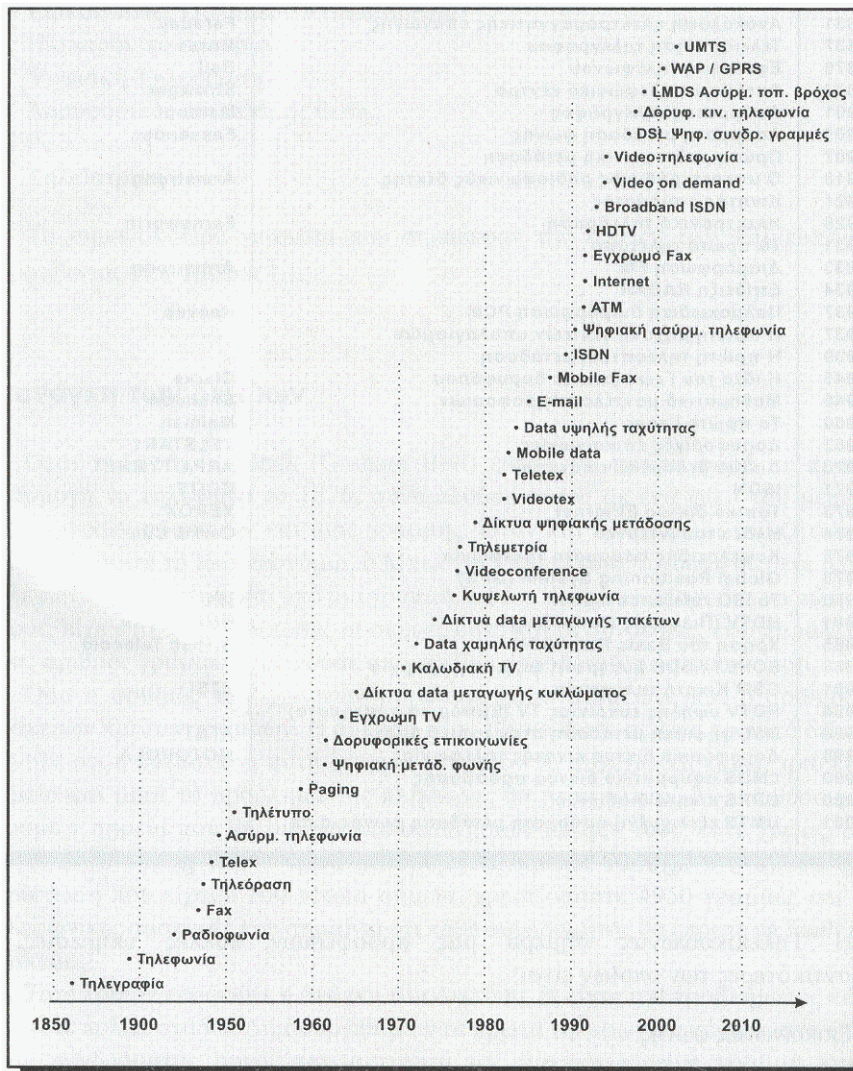
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τον 20^ο αιώνα ήταν ο κινητήριος μοχλός ανάπτυξης. Η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό και κάθε εφαρμογή συνδέεται με τη χρήση ενός ορισμένου τμήματος από το φάσμα συχνοτήτων (σχήμα-1).

Η είσοδος της μικροηλεκτρονικής άλλαξε το πρόσωπο των τηλεπικοινωνιών και μετά τη δεκαετία του 1950, όπου έχουμε την παράλληλη ανάπτυξη των υπολογιστών και της ηλεκτρονικής επεξεργασίας των πληροφοριών, άρχισαν να καταλαμβάνουν σημαντική θέση στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου μέχρι το σημείο να επηρεάζουν άμεσα τον πολιτισμό σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σήμερα γνωστές εφαρμογές των τηλεπικοινωνιών είναι η **Τηλεφωνία**, το **Διαδίκτυο (internet)**, η **Ραδιοφωνία** και η **Τηλεόραση**, εφαρμογές που η μαζικότητά τους από πλευράς χρήσης τις καθιστά ευρύτατα γνωστές. Καθώς τα τελευταία χρόνια η χρήση των υπολογιστών και του Διαδικτύου επεκτείνεται σε ευρύτερα στρώματα του πληθυσμού, αναπτύσσονται συνεχώς νέες μορφές τηλεπικοινωνιών και παράλληλα υπάρχει μια τάση συνένωσης και ολοκλήρωσης των τεχνολογιών αυτών .

Η ψηφιακή μετάδοση των σημάτων και η ψηφιακή μεταγωγή και επεξεργασία είναι κάποιες από τις νέες τεχνολογίες που εισήλθαν στις τηλεπικοινωνίες και με αυτό τον τρόπο οι αναλογικές τεχνολογίες στις οποίες στηρίχθηκαν η κλασική τηλεφωνία, το ραδιόφωνο και η τηλεόραση αντικαθίστανται σταδιακά από την ψηφιακή τεχνολογία που αναπτύχθηκε κυρίως από τις επικοινωνίες data. Παράλληλα ήρθε η βελτίωση των μέσων μετάδοσης, της υποδομής (οπτικές ίνες, δορυφορικές ζεύξεις, κλπ.), των τεχνικών μετάδοσης (multiplexing, compression, κωδικοποιήσεις, διαμορφώσεις κλπ.). Σήμερα βρισκόμαστε στο αναπτυξιακό στάδιο ενός νέου επιστημονικού κλάδου που καλείται Τηλεπληροφορική (από τους όρους Τηλεπικοινωνίες και Πληροφορική. Με τη βοήθεια αυτού του κλάδου της τεχνολογίας έχουμε πλέον ευρύτερες δυνατότητες επικοινωνιών στην εξυπηρέτηση φωνής αλλά και άλλων μορφών πληροφορίας όπως είναι το κείμενο, τα δεδομένα (data), η εικόνα κλπ. που η ολοκλήρωσή τους βοηθείται από τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας.

Η ιστορική εξέλιξη των Τηλεπικοινωνιών μετά το 1850 φαίνεται στο σχήμα-2



Σχήμα-2: Εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών

(Πηγή: Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών⁶¹ έκδοση 2003)

ενώ στο σχήμα-3 παρουσιάζονται μερικές βασικές χρονολογίες από το 1800-2000.

- 1809 Πειραματική επίδειξη ηλεκτροχημικού τηλεγράφου VanSoemmerring
- 1820 Δημιουργία μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρ. ρεύμα Oersted
- 1831 Ανακάλυψη ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής Faraday
- 1837 Τελειοποίηση τηλεγράφου Morse
- 1876 Εφεύρεση τηλεφώνου Bell
- 1897 Αυτόματο τηλεφωνικό κέντρο Strowger
- 1901 Ασύρματος τηλεγράφος Marconi
- 1905 Ασύρματη μετάδοση φωνής Fessenden
- 1907 Πρώτη ραδιοφωνική μετάδοση
- 1921 Κινητός ασύρματος
- 1928 Ηλεκτρονική τηλεόραση Farnsworth
- 1931 Το πρώτο τηλέτυπο
- 1933 Διαμόρφωση FM Armstrong
- 1934 Επίδειξη RADAR
- 1937 Παλμοκωδική διαμόρφωση PCM Reeves
- 1937 Η πρώτη μηχανή γενικών υπολογισμών

1939 Η πρώτη τηλεοπτική μετάδοση
1945 Η ιδέα του Γεωστατικού δορυφόρου Clarke
1948 Μαθηματικό μοντέλο πληροφοριών Shannon
1962 Δορυφορικές επικοινωνίες
1970 Δίκτυα δεδομένων πακέτων
1971 ISDN
1973 Τοπικό δίκτυο Ethernet
1974 Η ιδέα του Ιντερνετ
1978 Κυψελοειδής ασύρματη τηλεφωνία
1978 Global Positioning System (GPS)
1986 SONET / SDH Σύγχρονη ψηφιακή ιεραρχία
1991 GSM Κινητή τηλεφωνία
1996 DSL ψηφιακή μετάδοση στον τοπικό βρόχο
1998 Δορυφορικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας
1999 LMDS ασυρματικό δίκτυο πρόσβασης
2000 GPRS κινητό διαδίκτυο
2001 UMTS εξελιγμένη ασύρματη μετάδοση φωνής-data

Σχήμα-3: Σημαντικές χρονολογίες στην ιστορία των τηλεπικοινωνιών

Η Τηλεπικοινωνίες σήμερα προσφέρουν πολλές υπηρεσίες, οι σημαντικότερες των οποίων είναι: Επικοινωνίες φωνής, Επικοινωνίες δεδομένων (Data communications), Παγκόσμιος ιστός (WWW -World Wide Web), Teletex, Τηλεομοιοτυπία (Telefax), Οπτική Τηλεδιάσκεψη (Videoconference), Ασύρματες κινητές επικοινωνίες (Mobile communication), ISDN (Integrated Services Digital Network), Τηλεμετρία και έλεγχος εκ του μακρόθεν, Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (Electronic mail), Τηλεειδοποίηση (Paging), Videotelephony (Εικονοτηλέφωνο), Επικοινωνίες Πολυμέσων (multimedia), Ηλεκτρονικό εμπόριο, Ψηφιακή Τηλεόραση, Δορυφορικός εντοπισμός θέσης, Ραδιόφωνο, Τηλεϊατρική.

1.1.3 Ανάγκη των δικτύων

Όταν άρχισε η πρακτική εφαρμογή του τηλεφώνου ήταν απαραίτητα δυο τηλεφωνικές συσκευές και μια γραμμή. Στην περίπτωση που κάποιος ήθελε να επικοινωνεί με δύο διαφορετικά μέρη, έπρεπε να έχει δύο τηλέφωνα και δυο τηλεφωνικές γραμμές και αν ήθελε και με έναν τρίτο χρειαζόταν επιπλέον τηλεφωνική συσκευή και γραμμή σύνδεσης. Δηλαδή κάποιος θα έπρεπε να είχε στο σπίτι του τόσες συσκευές όσες και οι συνδέσεις.

Όσο ο αριθμός των χρηστών μεγάλωνε τόσο μεγάλωνε και ο αριθμός των συσκευών και των γραμμών. Η αύξηση ήταν τέτοια ώστε σε λίγο χρονικό διάστημα η κατάσταση αυτή δεν μπορούσε να συνεχιστεί γιατί το πρόβλημα της πληθώρας ήταν άλυτο. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε n σημεία που θέλουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, τότε

χρειαζόμαστε $n(n-1)/2$ συνδέσεις και ο κάθε συνδρομητής πρέπει να έχει $n-1$ συσκευές. Σε περίπτωση που έχουμε 100 τέτοια σημεία, χρειαζόμαστε 4950 γραμμές και 9900 τηλεφωνικές συσκευές που σημαίνει ότι κάθε συνδρομητής θα πρέπει να διαθέτει 99 συσκευές. Τότε προέκυψε η ανάγκη του Δικτύου. Η λύση του προβλήματος πέρασε από πολλά στάδια. Δημιουργήθηκαν τα πρώτα τηλεφωνικά κέντρα, στα οποία ο κάθε συνδρομητής συνδεόταν ακτινωτά με μια αφιερωμένη γραμμή και μια συσκευή. Την εποχή εκείνη οι τηλεφωνητές χειριστές των κέντρων, συνέδεαν τη γραμμή του καλούντος συνδρομητή με αυτή του καλούμενου με την βοήθεια βυσμάτων. Ειδικές γεννήτριες ρεύματος ενσωματωμένες στις τηλεφωνικές συσκευές επέτρεπαν τις κλήσεις προς το κέντρο καθώς δεν υπήρχε η επιλογή αριθμού. Αυτή ήταν και η πρώτη μορφή δικτύου επικοινωνιών φωνής. Στη συνέχεια η τεχνολογία των τηλεφωνικών κέντρων προόδευσε με την ανάπτυξη των ηλεκτρομηχανικών τηλεφωνικών κέντρων και τη χρήση της αυτόματης επιλογής. Ακολούθησε η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών κέντρων, για να καταλήξουμε στη σημερινή χρήση υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών τεχνικών επιλογής και μετάδοσης. Παρόμοια σχεδόν ιστορία ακολουθείται και στα δίκτυα Data. Στην αρχή ένας Τερματικός σταθμός (Data Terminal Equipment) συνδέεται με έναν άλλο τέτοιο σταθμό χρησιμοποιώντας το κοινό τηλεφωνικό δίκτυο ή τις μόνιμες αφιερωμένες (dedicated) γραμμές. Στη συνέχεια η ανάγκη πολλαπλών συνδέσεων των τερματικών σταθμών, οδήγησε στη δημιουργία και εκμετάλλευση ποικίλων δικτύων data. Τα σύγχρονα δίκτυα είναι τέτοια που δεν χρειάζονται πολλαπλές αφιερωμένες συνδέσεις μεταξύ των συνδρομητών. Ο κάθε συνδρομητής μπορεί να συνδέεται μόνο με μια γραμμή με το πλησιέστερο τηλεπικοινωνιακό κέντρο. Προς αυτή την κατεύθυνση δημιουργήθηκαν ιδιωτικά και δημόσια δίκτυα όπως το τηλεφωνικό, το δίκτυο telex, τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το ISDN, το Ίντερνετ και άλλα.

1.1.3.1 Δίκτυα τηλεπικοινωνιών

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν δομή *ιεραρχική*. Αποτελούνται από κέντρα που ονομάζονται *αστικά ή τοπικά τερματικά κέντρα*, συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν το *αστικό δίκτυο (συνδρομητικό δίκτυο ή συνδρομητικός βρόχος)*. Όλα τα αστικά κέντρα πόλης ή περιοχής συνδέονται στο λεγόμενο *κομβικό κέντρο*. Για να είναι δυνατή η επικοινωνία με μια απομακρυσμένη περιοχή υπάρχει το *υπεραστικό δίκτυο* που συνδέει όλα τα κομβικά κέντρα. Αυτά συνδέονται μέσω των *Κύριων Κέντρων* που αποτελούν μέρος του κορμού ενός εθνικού υπεραστικού δικτύου. Ουσιαστικά τα Κύρια Κέντρα και τα κομβικά αποτελούν το υπεραστικό δίκτυο και λέγονται *διαβιβαστικά*

κέντρα, διότι δεν συνδέονται με συνδρομητές αλλά διεκπεραιώνουν την κίνηση στο δίκτυο.

Σήμερα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα εκπληρώνουν ανάγκες μετάδοσης φωνής, data, εικόνας κλπ. και ολοκληρώνονται μέσω ψηφιακών δικτύων υψηλών ταχυτήτων που χρησιμοποιούν τεχνολογίες bandwidth on demand, για βέλτιστη εκμετάλλευση της χωρητικότητας των καναλιών και των επικοινωνιακών κόμβων με την χρήση τεχνικών όπως η ATM (Asynchronous Transfer Mode). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στα μέσα μετάδοσης (οπτικές ίνες), σε τεχνικές μεταγωγής και κόμβους υψηλών ταχυτήτων, συμβάλλουν στη δημιουργούνται νέων δικτύων και υπηρεσιών όπως video on demand, βιντεοτηλεφωνία, επικοινωνίες πολυμέσων κλπ. Τέλος η επανάσταση στα δίκτυα, είναι η επέκταση των ψηφιακών ασύρματων επικοινωνιών υψηλών ταχυτήτων που επιτρέπουν την πρόσβαση σε φορητά τερματικά πολυμέσων, που αλλάζει τη μορφή των δικτύων καθώς τα σύγχρονα τερματικά σημεία του δικτύου θα έχουν ελευθερία κίνησης λόγω ασύρματης επικοινωνίας.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία σήμερα μας επιτρέπει να έχουμε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα καλωδιακής μορφής (απλά καλώδια, οπτικές ίνες), ασύρματα, κυψελωτά και δορυφορικά.

1.1.3.2 Επικοινωνίες δεδομένων

Με τον όρο **Επικοινωνίες Δεδομένων** εννοούμε την ανταλλαγή πληροφοριών με μορφή data μεταξύ υπολογιστικών και τερματικών σταθμών. Οι πληροφορίες αυτές είναι δεδομένα (data) που μπορεί να κωδικοποιούν χαρακτήρες όπως είναι τα γράμματα της αλφαβήτου, οι αριθμοί, τα σημεία στίξης και διάφορα άλλα σύμβολα.

Η διάκριση μεταξύ των επικοινωνιών data και των άλλων μορφών , δηλαδή φωνής, εικόνας κλπ. είναι το τι μεταφέρεται και όχι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται. Ο ψηφιακός τρόπος μετάδοσης που χρησιμοποιούταν σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα για την μεταφορά data, σήμερα χρησιμοποιείται και για μεταφορά φωνής και εικόνας.

Ας δούμε τώρα τους βασικούς όρους πληροφορία data, μετάδοση, επικοινωνία. Με τον όρο **πληροφορία** στις επικοινωνίες ερμηνεύουμε κάθε οργανωμένο σήμα, ενώ με τη λέξη **δεδομένα ή data** εννοούμε το συμβολισμό που αναπαριστά την κωδικοποιημένη μορφή της πληροφορίας με τη μορφή γραμμάτων ή συμβόλων. Η κωδικοποίηση γίνεται ψηφιακά με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστήσει την πληροφορία κατάλληλη για επεξεργασία, αποθήκευση ή μετάδοση. Με την έννοια **μετάδοση**

δεδομένων (data transmission) προσδιορίζουμε την μετακίνηση της πληροφορίας μέσα από φυσικά κανάλια μετάδοσης.

Η **Επικοινωνία Δεδομένων** είναι ευρύτερη έννοια από αυτήν της μετάδοσης, αφού εκτός από τη λειτουργία της εκπομπής και της κωδικοποίησης της πληροφορίας, περιέχει τον έλεγχο της μετάδοσης ως προς τη φορά, την ορθότητά αλλά και τους κανόνες που πρέπει να διέπουν συστήματα ανταλλαγής πληροφοριών. Δηλαδή περιέχει τα φυσικά κυκλώματα μετάδοσης, τον απαιτούμενο εξοπλισμό και το λογισμικό, διαδικασίες αναγνώρισης και διόρθωσης των σφαλμάτων μετάδοσης, έλεγχο της ροής των δεδομένων και συνολικά κανόνες για την εξασφάλιση της επικοινωνίας δύο ή περισσότερων υπολογιστικών σταθμών.

1.1.4 Η Σύγκλιση των Τηλεπικοινωνιών

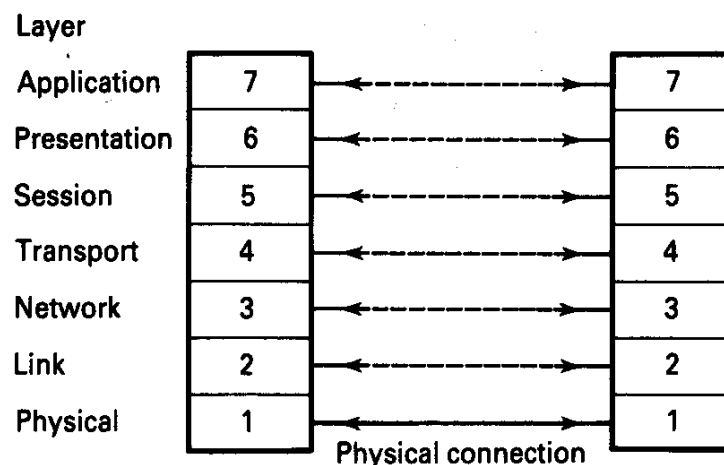
Η ευρύτητα των τηλεπικοινωνιών στην εποχή μας έχει δημιουργήσει παράλληλα με τα θετικά στοιχεία και μια χασοκή κατάσταση αναφορικά με τη δικτύωση και τις υπηρεσίες. Έτσι εμφανίστηκε στο προσκήνιο ο όρος σύγκλιση (convergence) που σχετίζεται με τη συνένωση υπηρεσιών και υποδομών για τεχνολογικούς, οργανωσιακούς και οικονομικούς λόγους κυρίως. Το περιεχόμενό του όμως ποικίλει καθώς μέχρι στιγμής υπάρχουν διαφορετικών ειδών συγκλίσεις με μερικά παραδείγματα τα εξής:

- 1) Σύγκλιση φωνής - δεδομένων σε κοινά δίκτυα και υποδομές: Παλαιότερα οι δύο αυτές έννοιες εξυπηρετούντο από διαφορετικό εξοπλισμό και υποδομές ενώ σήμερα υπάρχει ορατή η τάση ενοποίησής τους.
- 2) Σύγκλιση σταθερής - κινητής τηλεφωνίας, όπου διακρίνεται η τάση ενοποίησης υποδομών και υπηρεσιών με μοναδικούς αριθμούς χρήστη, ενιαίους αυτόματους τηλεφωνητές, κοινούς τρόπους χειρισμού κλπ.
- 3) Σύγκλιση τηλεόρασης - τηλεπικοινωνιών, όπου ο χρήστης τηλεπικοινωνιακού δικτύου έχει τη δυνατότητα να βλέπει τηλεοπτικό πρόγραμμα της αρεσκείας του, ενώ ο χρήστης τηλεόρασης μπορεί να χρησιμοποιήσει τη συσκευή του για σύνδεση στο Ίντερνετ.
- 4) Σύγκλιση περιεχομένου, όπου οποιαδήποτε μορφή πληροφορίας (φωνή - δεδομένα - εικόνα) συνυπάρχει π.χ. στο εμπόριο και τη ψυχαγωγία μέσω των Τηλεπικοινωνιών .

1.1.5 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ISO ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ορθή μετάδοση των δεδομένων διαμέσου ενός δικτύου, πρέπει να καθιερωθούν κατάλληλες διαδικασίες λειτουργίας. Αυτές πρέπει να καθοριστούν λεπτομερώς και να ακολουθηθούν αυστηρά από τον τερματικό εξοπλισμό λήψης και εκπομπής καθώς και από τα ενδιάμεσα κέντρα μεταγωγής. Οι διαδικασίες αυτές ονομάζονται πρωτόκολλα. Πολλά τοπικά δίκτυα δεδομένων (LANs) διασυνδέουν τερματικά δεδομένων του ίδιου κατασκευαστή και λειτουργούν χρησιμοποιώντας ιδιωτικά πρωτόκολλα. Ωστόσο, η ανάπτυξη στις επικοινωνίες δεδομένων δημιούργησε την ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστών και τερματικών διαφορετικών κατασκευαστών. Η ανάγκη αυτή, οδήγησε στη σύλληψη της διασύνδεσης ανοικτών συστημάτων (Open System Interconnection, OSI), έτσι ώστε τα δίκτυα να είναι ανεξάρτητα του εξοπλισμού.

Την ανάπτυξη των αναγκαίων προδιαγραφών και πρωτοκόλλων για το OSI, ανέλαβε ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Standards Organisation ISO). Τα πρότυπα του ISO βασίζονται σε ένα πρωτόκολλο επτά στρωμάτων γνωστό ως ISO Μοντέλο Αναφοράς για τη διασύνδεση ανοικτών συστημάτων. Η αρχή του μοντέλου αυτού [8] παρουσιάζεται στο σχήμα 1.8. Κάθε στρώμα αποτελεί ένα χρήστη υπηρεσίας για το αμέσως κατώτερο στρώμα και ένας παροχέας υπηρεσίας για το αμέσως ανώτερο στρώμα. Κάθε στρώμα επίσης προδιαγράφεται ανεξάρτητα από τα άλλα στρώματα, ωστόσο έχει μία καθορισμένη διεπαφή με το ανώτερο και κατώτερο στρώμα.



Σχήμα 1.8 Το μοντέλο OSI επτά στρωμάτων για τη διασύνδεση ανοικτών συστημάτων.

Έτσι όσον αφορά τους χρήστες, η επικοινωνία φαίνεται να γίνεται διαμέσου κάθε στρώματος, όπως δείχνουν οι διακεκομμένες γραμμές του σχήματος 1.8. Στην πραγματικότητα όμως, κάθε ανταλλαγή δεδομένων κινείται από το ανώτερο προς τα κατώτερα στρώματα φτάνοντας στο χαμηλότερο στρώμα (φυσικό επίπεδο) του τερματικού του αποστολέα, διασχίζει το δίκτυο προς το τερματικό του παραλήπτη όπου εκεί κινείται αντίστροφα, από το κατώτερο προς τα ανώτερα στρώματα.

Τα στρώματα του OSI είναι :

Στρώμα 1 : Το φυσικό στρώμα (physical layer). Καθορίζει μία διεπαφή όπου αφορά τις συνδέσεις, τα επίπεδα τάσης και τον ρυθμό δεδομένων, με σκοπό να μεταδοθούν τα σήματα bit προς bit.

Στρώμα 2 : Το στρώμα σύνδεσης (link layer). Παρέχει ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων σε μία σύνδεση, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η ανταλλαγή δεδομένων είναι αξιόπιστη. Μπορεί να απαιτεί τη διαίρεση της ροής των δεδομένων σε τμήματα (blocks), που ονομάζονται πακέτα με σκοπό την εισαγωγή bits ελέγχου ή το

συγχρονισμό. Εντούτοις, διατηρείται η διαφάνεια για τα bits των δεδομένων στα τμήματα αυτά.

Στρώμα 3 : Το στρώμα δικτύου (network layer). Σχετίζεται με τη λειτουργία του δικτύου μεταξύ των τερματικών. Είναι επίσης υπεύθυνο για την εγκαθίδρυση των σωστών συνδέσεων μεταξύ των κατάλληλων κόμβων του δικτύου.

Στρώμα 4 : Το στρώμα μεταφοράς (transport layer). Είναι υπεύθυνο για την εξασφάλιση ενός δρόμου επικοινωνίας, ανεξαρτήτως δικτύου, κατάλληλο για τον τερματικό εξοπλισμό. Για παράδειγμα, παρέχει τον κατάλληλο ρυθμό δεδομένων καθώς και τον έλεγχο σφαλμάτων από άκρο σε άκρο.

Στρώμα 5 : Το στρώμα συνόδου (session layer). Είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες εγκατάστασης και συντήρησης μιας σύνδεσης μεταξύ δύο τερματικών. Για παράδειγμα, θέτοντας το 'on' στην αρχή μιας διεργασίας και το 'off' στο τέλος της.

Στρώμα 6 : Το στρώμα παρουσίασης (presentation layer). Ασχολείται με τη μορφή παρουσίασης των δεδομένων, προσπαθώντας να ξεπεράσει τις διαφορές που εντοπίζονται στην παρουσίαση της πληροφορίας, μεταξύ του τερματικού του αποστολέα και του παραλήπτη. Σκοπός του είναι να καταστήσει την επικοινωνία μέσω δικτύου ανεξάρτητη από τις τερματικές συσκευές.

Στρώμα 7 : Το στρώμα εφαρμογών (application layer). Καθορίζει τη φύση της εργασίας που εκτελείται. Εφοδιάζει το χρήστη με τα αναγκαία προγράμματα εφαρμογών, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, την επεξεργασία κειμένου, τις τραπεζικές συναλλαγές και άλλα.

Είναι χρήσιμο να αναλύουμε τα συστήματα επικοινωνιών στα πλαίσια του μοντέλου του OSI. [9-11] Σήμερα τα συστήματα καθορίζονται και σχεδιάζονται με διαστρωμένα πρωτόκολλα προσαρμοσμένα στο μοντέλο του OSI. Ένα παράδειγμα είναι το CCITT No.7 σύστημα σηματοδότησης.

Ο σχεδιασμός των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ασχολείται κυρίως με τα τρία κατώτερα στρώματα. Τα ανώτερα στρώματα αφορούν την ανάπτυξη λογισμικού για συγκεκριμένες εφαρμογές του δικτύου. Στην περίπτωση της τηλεφωνίας, το στρώμα δικτύου απαιτεί μόνο, κλήση και καθαρισμό σημάτων (σύνδεση και αποσύνδεση), κουδουνισμό, τόνους και διευθυνσιοδότηση (πληκτρολόγηση αριθμού). Τα πρωτόκολλα των ανώτερων στρωμάτων μπορούν να αναπτυχθούν από τους χρήστες καθώς συνεχίζουν τη συνομιλία τους. Αντίθετα στην επικοινωνία μηχανών, όλα αυτά θα πρέπει να υπολογιστούν λεπτομερώς και να προγραμματιστούν προκαταβολικά.

1.1.6 Φορείς Τυποποίησης

Από τη στιγμή που οι τηλεπικοινωνίες μπήκαν στη ζωή των ανθρώπων με τη σύγχρονη μορφή τους, δημιουργήθηκε μια χαστική κατάσταση εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου δομής και λειτουργίας των παρόχων υπηρεσιών σε χώρες (π.χ. Η.Π.Α., Ιαπωνία) ή ευρύτερες γεωγραφικές περιοχές (π.χ. Ευρώπη). Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη της συμβατότητας σε παγκόσμια κλίμακα, κάτι που είχε γίνει αντιληπτό ήδη από το 1865, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν οι λεγόμενοι **Φορείς Τυποποίησης**.

Η **Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU)** είναι ένας από τους πιο σημαντικούς. Ιδρύθηκε το 1865 με την ονομασία Διεθνής Τηλεγραφική Ένωση, ενώ το 1932 μετονομάστηκε σε Ένωση Τηλεπικοινωνιών.

Τμήματά της είναι η CCIR (Consultative Committee on International Radio) και η CCITT (Consultative Committee on International telephone and Telegraph).

Ο **Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (International Standards Organization - ISO)** ιδρύθηκε το 1946 και ουσιαστικά είναι μια παγκόσμια ομοσπονδία με μέλη 89 επιτροπές τυποποίησης κρατών. Ο ISO δίνει πρότυπα για έναν τεράστιο αριθμό θεμάτων (τρόφιμα, εργαλεία κ.τ.λ.) και ο χρόνος διάρκειας μιας τυποποίησης είναι 2 ή 3 χρόνια.

Άλλοι φορείς τυποποίησης είναι οι:

American National Standards Institute - ANSI, Electronic Industries Association - EIA, Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE, National Institute Of Standards and Technology - NIST, Conference Europeen des Administration des Postes et des Telecommunications - CEPT και European Telecommunications Standards Institute -ETSI. Στην Ελλάδα δραστηριοποιείται ο **Ελληνικός Οργανισμός Τυποποιήσεων - ΕΛΟΤ** που είναι και μέλος του ISO.

1.1.7 Ελληνική πραγματικότητα

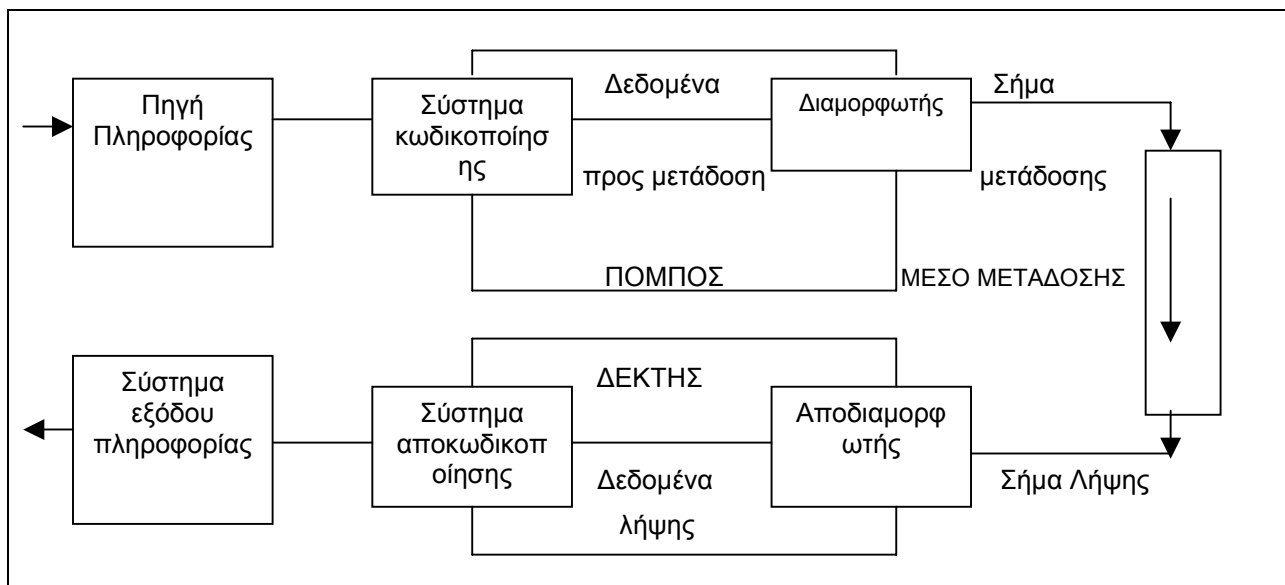
Στην Ελλάδα μέχρι το 1949 υπήρχαν διάφορες, κυρίως ξένες, εταιρείες τηλεπικοινωνιών. Ο Ο.Τ.Ε. ιδρύθηκε το 1949 και του παραχωρήθηκε το προνόμιο του μονοπωλίου των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Το πρώτο βήμα για τον περιορισμό του μονοπωλίου του Ο.Τ.Ε. έγινε το 1990 με διάταξη που επέτρεπε την εκμετάλλευση της κινητής τηλεφωνίας από ιδιωτικούς φορείς και το 1993 εισήλθαν επίσημα οι εταιρείες TIM και Vodafone. Το 1998 ακολούθησε η Cosmote και το 2001 η Q-Telecom. Από το 2001 ισχύει και η πλήρης απελευθέρωση στις τηλεπικοινωνίες με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων εταιρειών παροχής υπηρεσιών ή τη διεύρυνση των υπηρεσιών παλαιότερων εταιρειών (π.χ. Tellas, Forthnet, Teledome, Vivodi, Cosmoline κ.τ.λ).

Στο ρυθμιστικό τομέα η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων - ΕΕΤΤ είναι η Εθνική Ρυθμιστική Αρχή που επιβλέπει και ρυθμίζει την τηλεπικοινωνιακή αγορά και την αγορά των ταχυδρομικών υπηρεσιών. Ιδρύθηκε το 1992 με την επωνυμία Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (ΕΕΤ) και οι αρμοδιότητές της επικεντρώνονταν στην εποπτεία της απελευθερωμένης αγοράς των τηλεπικοινωνιών. Η λειτουργία της όμως ξεκίνησε το 1995. Το 1998 ορόλος της επεκτάθηκε και στον τομέα των ταχυδρομικών υπηρεσιών. Το 2000 ενισχύθηκε ο εποπτικός, ελεγκτικός και ρυθμιστικός της ρόλος. Έτσι έχει ως στόχο την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και της ανάπτυξης των τηλεπικοινωνιών.

1.2 Βασικές έννοιες από τις τηλεπικοινωνίες

1.2.1 Το μοντέλο του Τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Τα βασικά στοιχεία ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι ο πομπός, το μέσο μετάδοσης και ο δέκτης. Το ακόλουθο σχήμα μας δίνει μια εικόνα αυτού και περιγράφει τα διάφορα στάδια από τα οποία περνάει ένα μήνυμα προς αποστολή:



Σχήμα-4: Το τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

Η πηγή πληροφορίας αποτελεί το χώρο δημιουργίας του μηνύματος που είναι να αποσταλεί.

Ο πομπός αποτελείται από το σύστημα κωδικοποίησης και το διαμορφωτή. Το σύστημα κωδικοποίησης λαμβάνει το μήνυμα και το κωδικοποιεί με σκοπό τον περιορισμό των σφαλμάτων κατά τη μετάδοσή του ενώ ο διαμορφωτής το μετατρέπει στην κατάλληλη, προς μετάδοση, μορφή ώστε να μεταδοθεί από το μέσο με τον καλύτερο τρόπο.

Το μέσο μετάδοσης είναι το φυσικό κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Μπορεί να είναι απλό καλώδιο, οπτική ίνα ή ακόμα και ο ελεύθερος χώρος.

Ο δέκτης αποτελείται από τον αποδιαμορφωτή και τον αποκωδικοποιητή και κάνει ακριβώς τις αντίστροφες διαδικασίες του πομπού. Συγκεκριμένο ο αποδιαμορφωτής λαμβάνει το σήμα μέσω του φυσικού καναλιού και το μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή και μετά ο αποκωδικοποιητής το αποκωδικοποιεί για να είναι δυνατή η κατανόηση του σταλμένου μηνύματος. Το σήμα που λαμβάνεται δεν είναι το ίδιο με αυτό που εκπέμπεται λόγω θορύβου.

1.2.2 Στοιχεία από τη θεωρία Πληροφορίας

1.2.2.1 Έννοια Πληροφορίας

Αναφέραμε παραπάνω ότι στις επικοινωνίες εκπέμπονται μηνύματα από πομπούς και καταλήγουν σε δέκτες. Η λέξη μήνυμα φανερώνει το σύνολο της πληροφορίας που λαμβάνει κάποιος. Αυτή μπορεί να είναι κείμενο, ήχος, εικόνα ή συνδυασμοί αυτών. Δηλαδή η συνολική αυτή πληροφορία αποτελείται από άλλες μικρότερες με συνέπεια το μήνυμα να αποτελείται από μια ακολουθία μονοσήμαντα διακριτών συμβόλων διαφορετικών μεταξύ τους. Είναι λοιπόν πολύ σημαντική η έννοια της πληροφορίας. Είναι φανερό από αυτά ότι, για να περιέχει ένα μήνυμα πληροφορία, θα πρέπει η εμφάνιση των συμβόλων να είναι αποτέλεσμα επιλογής από πολλά δυνατά σύμβολα. Όσο δύσκολος είναι ένας συνδυασμός τους, τόσο περισσότερες πληροφορίες φέρνει μαζί του και αντίστροφα. Ο ορισμός της πληροφορίας χρησιμοποιεί την πιθανότητα γιατί η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός γεγονότος συνδέεται άμεσα με την πληροφορία που είναι σχετική με το γεγονός αυτό. Αν η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί ένα γεγονός είναι μεγάλη, τότε η πληροφορία που φέρει το γεγονός αυτό είναι μικρή και αντίστροφα.

1.2.2.2 Μέτρο Πληροφορίας

Αν συμβολίσουμε με I την πληροφορία ενός μηνύματος m και υποθέσουμε ότι μια πηγή εκπέμπει μηνύματα με πιθανότητα p_k , $k=1,2,\dots,q$ έχουμε τις εξής συνθήκες:

$$\begin{aligned}\sum_{k=1}^q p_k &= 1 \\ I(m_i) > I(m_j) &\Leftrightarrow p_i < p_j \\ I(m_i) \rightarrow 0 &\Leftrightarrow p_i \rightarrow 1 \\ I(m_i) \geq 0 &\Leftrightarrow 0 \leq p_i \leq 1 \\ I(m_i \wedge m_j) &= I(m_i) + I(m_j), \quad m_i \text{ και } m_j \text{ ανεξάρτητα}\end{aligned}$$

Η σχέση που δίνει την πληροφορία I είναι

$$I = \log_{\alpha} \left(\frac{1}{p_k} \right), \text{ όπου } \alpha \text{ η βάση του λογαρίθμου}$$

Για τον ορισμό της απλούστερης μονάδας πληροφορίας θεωρούμε ότι έχουμε μόνο δύο δυνατά σύμβολα, αφού με ένα δεν γίνεται μήνυμα, με πιθανότητα εμφάνισης

του καθενός $p = \frac{1}{2}$. Τότε έχουμε $I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{2}} = \log_2 2 = 1$. Επομένως, όταν χρησιμοποιείται

ως βάση το δυαδικό σύστημα, η μονάδα πληροφορίας είναι 1, ονομάζεται **bit** (από το **binary digit**), αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ποσότητα πληροφορίας οποιουδήποτε συστήματος επικοινωνίας και χρησιμοποιείται ως βάση μέτρησης και αξιολόγησης της παροχής πληροφορίας των συστημάτων .

1.2.2.3 Μέση Πληροφορία

Θεωρούμε ένα μήνυμα που αποτελείται από N σύμβολα. Ονομάζουμε την πληροφορία H που περιέχει ανά σύμβολο **μέση πληροφορία ή εντροπία** και δίνεται από τον τύπο:

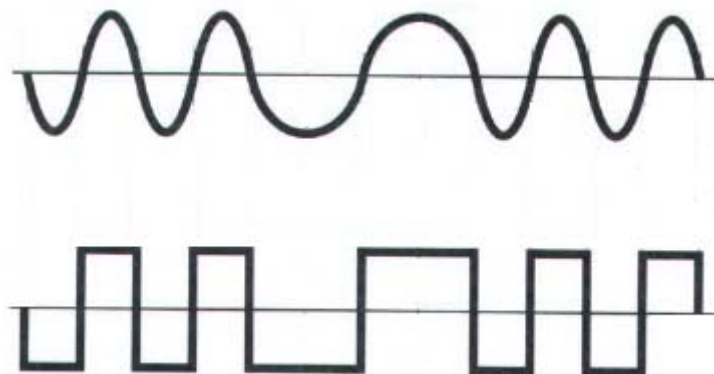
$$H = \frac{I_{\text{ολική}}}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^q N p_t \log_2 \left(\frac{1}{p_t} \right) = \sum_{t=1}^q p_t \log_2 \left(\frac{1}{p_t} \right) \quad \frac{\text{bits}}{\text{σύμβολο}}$$

Παρατηρούμε ότι:

$$H_{\text{max}} = \log_2 q \quad \frac{\text{bits}}{\text{σύμβολο}}$$

1.2.2.4 Τηλεπικοινωνιακή κίνηση

Η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το σήμα που εκπέμπεται μπορεί να είναι αναλογικό, δηλαδή να μεταβάλλεται με το χρόνο παίρνοντας συνεχείς τιμές, ή ψηφιακό, δηλαδή παίρνει τις συγκεκριμένες διακριτές τιμές 0 και 1. Για όλα αυτά θα γίνει παρακάτω λεπτομερής αναφορά (§ 2.3).



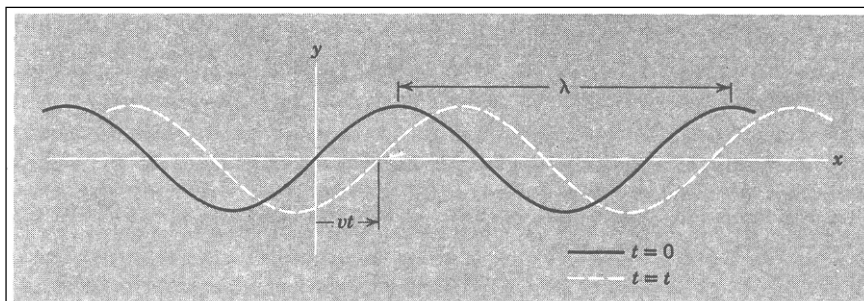
Σχήμα :Αναλογικό και ψηφιακό σήμα

1.2.3 Στοιχεία από τη θεωρία σήματος

1.2.3.1 Ορισμοί

Μια **κίνηση** που επαναλαμβάνεται σε ίσους χρόνους με τον ίδιο τρόπο ονομάζεται **περιοδική**. Μια τέτοια κίνηση όταν γίνεται παλινδρομικά γύρω από ένα σημείο ισορροπίας λέγεται **ταλάντωση**.

Κύμα ονομάζεται κάθε διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια και ορμή με ορισμένη ταχύτητα. Για την παραγωγή ενός κύματος χρειάζεται μια πηγή που να εκτελεί ταλαντώσεις. Τα κύματα που μας ενδιαφέρουν είναι τα **αρμονικά** δηλαδή αυτά που η απόσταση της πηγής από τη θέση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση $y = y_0 \eta\mu(\omega t)$ όπου y_0 είναι το πλάτος της ταλάντωσης, ωt η φάση με $\omega = 2\pi\nu$ την κυκλική συχνότητα και τα **εγκάρσια**, δηλαδή αυτά που οι κινήσεις των σωματιδίων που τα μεταφέρουν είναι κάθετες της διεύθυνσης διάδοσης. Η παράσταση ενός κύματος φαίνεται στο σχήμα-6 σημειώνοντας παράλληλα πως η ταχύτητά συνδέεται με τη συχνότητα ν και το μήκος κύματος λ με τη σχέση: $u = \lambda \cdot \nu$, όπου το λ είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σημεία του που έχουν την ίδια φάση.



Σχήμα-6: Παράσταση κύματος τις χρονικές στιγμές $t=0$, t .

(Πηγή: Haliday D., Resnick R., Φυσική εκδόσεις Γ.Α. Πνευματικός 2^η έκδοση)

Η εξίσωση του κύματος αυτού είναι:

$$y = y_0 \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \Rightarrow y = y_0 \eta\mu 2\pi (ut - x)$$

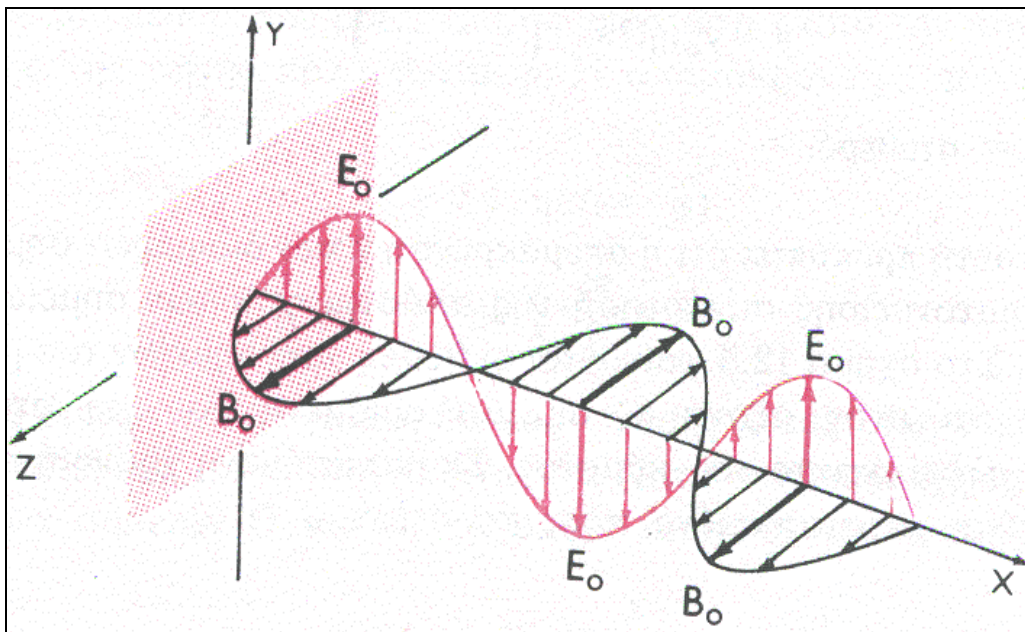
Μία κατηγορία τέτοιων εγκάρσιων αρμονικών κυμάτων είναι τα ηλεκτρομαγνητικά. **Ηλεκτρομαγνητικό κύμα** ονομάζουμε το σύστημα δύο κυμάτων, ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού, που διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός σαν ένα αλλά σε κάθετα επίπεδα. Το ηλεκτρικό κύμα είναι η διάδοση ενός ηλεκτρικού πεδίου ενώ το μαγνητικό

κύμα η διάδοση ενός μαγνητικού πεδίου στο χώρο. Άρα το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με την ταχύτητα του φωτός.

Το ηλεκτρικό πεδίο χαρακτηρίζεται από την ένταση E και το μαγνητικό πεδίο από την ένταση B . Εφαρμόζοντας την εξίσωση κύματος για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό κύμα έχουμε:

$$E = E_0 \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \text{ και } B = B_0 \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

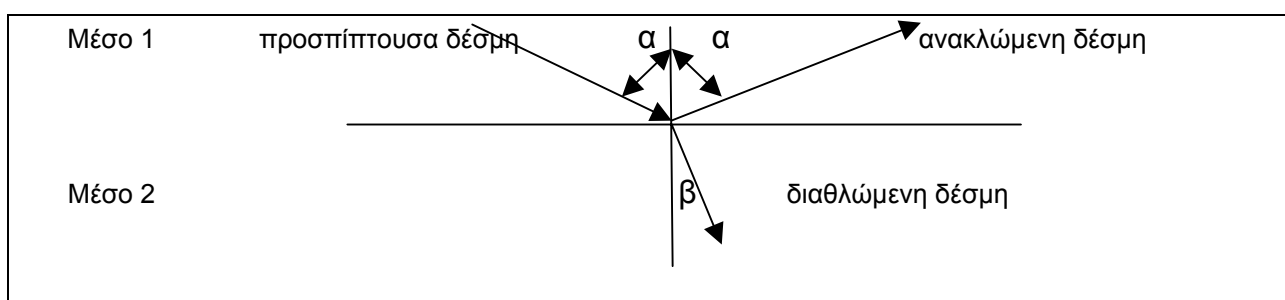
όπου E_0, B_0 τα πλάτη των αντίστοιχων εντάσεων E και B .



Σχήμα-7: Παράσταση ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ισχύει η σχέση $c = \lambda \cdot \nu$ με c την ταχύτητα του φωτός ενώ επίσης ανακλώνται, διαθλώνται και δημιουργούν φαινόμενα συμβολής και περίθλασης.

Περιληπτικά αναφέρουμε ότι όταν μια δέσμη φωτός προσπέφτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων κατά το ένα μέρος ανακλάται (δεν αλλάζει μέσο) και κατά το άλλο διαθλάται (αλλάζει μέσο) (σχήμα-8).



Σχήμα-8: Ανάκλαση και διάθλαση

Για την ανάκλαση ισχύουν: α) Το επίπεδο ανάκλασης είναι κάθετο στην ανακλώσα επιφάνεια και β) η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Τα α), β) αποτελούν τους νόμους της ανάκλασης.

Για τη διάθλαση ισχύουν: α) Το επίπεδο διάθλασης είναι κάθετο στη διαθλώσα επιφάνεια και β) $\frac{\eta_{\mu\alpha}}{\eta_{\mu\beta}} = \text{σταθερό} = \frac{c_1}{c_2} = n$ όπου c_1, c_2 οι ταχύτητες του φωτός στα μέσα 1, 2. Το n ονομάζεται δείκτης διάθλασης. Τα α), β) αποτελούν τους νόμους της διάθλασης.

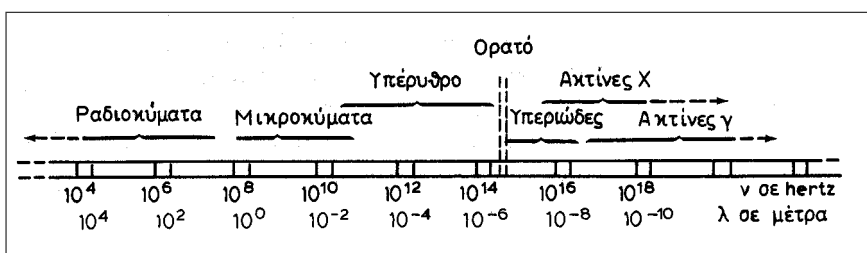
Συμβολή κυμάτων είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα κύματα συντίθενται και δημιουργούν φαινομενικά ένα κύμα με διαφορετικά ενδεχομένως βασικά χαρακτηριστικά από τα αντίστοιχα των επιμέρους κυμάτων (συχνότητα, μήκος, πλάτος κύματος).

Περίθλαση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται απόκλιση της πορείας των φωτεινών ακτίνων από το νόμο της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός.

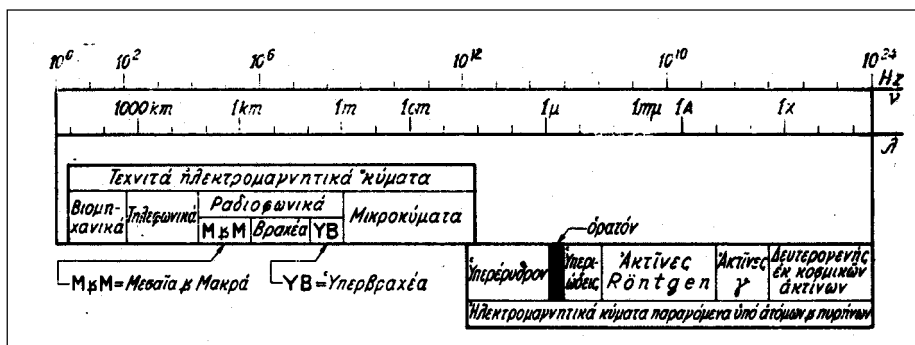
Αυτά τα στοιχεία οπτικής είναι στοιχειώδη. Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα αυτά είναι πολύ πιο σύνθετα και υπάρχουν πολλές διαφορετικές υποπεριπτώσεις για το κάθε ένα από αυτά.

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ονομάζεται η ακτινοβολία που μεταφέρει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα** είναι μία συνεχής περιοχή τέτοιας ακτινοβολίας, που εκτείνεται από τις ακτίνες γάμα ως τα ραδιοφωνικά κύματα. Τα ονόματα που περιγράφουν τα διάφορα τμήματα του φάσματος έχουν ιστορική προέλευση, αλληλεπικαλύπτονται και παρέχουν κατάλληλη κατάταξη με βάση την πιο συνηθισμένη πηγή ακτινοβολίας: ραδιοκύματα και μικροκύματα από ηλεκτρόνια που κινούνται σε αγωγούς, υπέρυθρο από θερμά αντικείμενα, ορατό φως από πολύ θερμά αντικείμενα, υπεριώδες από ηλεκτρικά τόξα και εκκενώσεις αερίων, ακτίνες X από ηλεκτρόνια που κτυπούν ένα στόχο, ακτίνες γάμα από πυρήνες ραδιενεργών ατόμων. Όλα τα κύματα αυτά είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, έχουν την ίδια ταχύτητα $c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$, ενώ η μόνη διαφορά είναι στο μήκος κύματος, άρα και στη συχνότητα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα δεν έχει ορισμένο κάτω και άνω φράγμα, θεωρητικά όμως αναφερόμαστε στην περιοχή συχνοτήτων από $0 - 10^{24}$ Hz. Τα ακόλουθα σχήματα 5, 6 δίνουν μια εικόνα του φάσματος και περιλαμβάνουν συχνότητες και μήκη κυμάτων.



Σχήμα-5: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
(Πηγή: Haliday D., Resnick R., Φυσική εκδόσεις Γ.Α. Πνευματικός 2^η έκδοση)



Σχήμα-6: Το συνολικό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
(Πηγή: Αλεξόπουλος Κ.Δ., Μαρίνος Δ.Ι., Γενική Φυσική-Ηλεκτρισμός εκδόσεις Παπαζήση 1^η έκδοση 1993)

Οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που παράγονται με κυκλώματα έχουν συχνότητες $0 - 10^{12}$ Hz και διαδίδονται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ονομάζουμε ερτζιανά ενώ αυτές με συχνότητα $10^{13} - 10^{24}$ Hz παράγονται από άτομα και μόρια της ύλης που βρίσκονται σε κατάσταση διέγερσης.

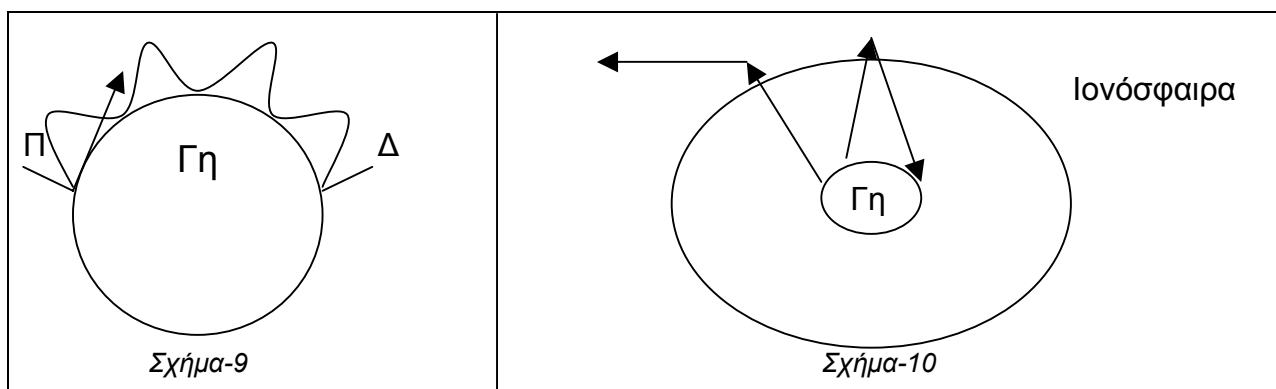
Τα ερτζιανά κύματα χρησιμοποιούνται πάρα πολύ στις ραδιοτηλεπικοινωνίες (τηλεγραφία, τηλεφωνία, ραδιοφωνία, τηλεόραση, ραντάρ). Η ραδιοτηλεπικοινωνία με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδει ενέργεια σε μεγάλη απόσταση την οποία εκπέμπει ο πομπός. Μέρος αυτής της ενέργειας λαμβάνεται από το δέκτη. Ταυτόχρονα τα ερτζιανά κύματα μεταφέρουν και στοιχεία που αντιστοιχούν σε μουσικά σήματα, ήχους ή εικόνες. Θα εξετάσουμε πολύ γενικά την εφαρμογή των ερτζιανών κυμάτων.

Φέρον κύμα: Ο πομπός ερτζιανών κυμάτων αποτελείται από ένα κύκλωμα ταλαντώσεων όπου παράγονται αμείωτες ηλεκτρικές ταλαντώσεις μεγάλης συχνότητας που ονομάζεται φέρουσα συχνότητα. Το κύκλωμα αυτό συνδέεται με την κεραία όπου παράγονται ηλεκτρικές ταλαντώσεις ίδιας συχνότητας. Η κεραία τότε εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα σταθερής συχνότητας και ονομάζεται **φέρων κύμα**.

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων: Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπονται από την κεραία επηρεάζεται κυρίως από δύο παράγοντες: από το έδαφος και από ένα στρώμα της ατμόσφαιρας σε ύψος από 100 ως 350 Km περίπου που ονομάζεται ιονόσφαιρα. Έτσι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από

την κεραία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) στα κύματα επιφάνειας και β) τα κύματα χώρου.

Θεωρούμε στην επιφάνεια της Γης έναν πομπό Π και ένα δέκτη Δ (σχήμα-9). Τα κύματα επιφάνειας θα νόμιζε κάποιος ότι ακολουθούν τη διεύθυνση της εφαπτόμενης στη θέση του πομπού Π. Τότε όμως δεν θα έφτανε ισχύς στο δέκτη ή αν έφτανε θα ήταν πολύ ασθενής. Στην πραγματικότητα, λόγω του εδάφους τα κύματα ακολουθούν καμπύλη τροχιά κατά μήκος της επιφάνειας. Όσο το κύμα επιφάνειας απομακρύνεται από τον πομπό, τόσο ελαττώνεται η ένταση της ακτινοβολίας, γιατί η ενέργεια του κύματος κατανέμεται σε μεγαλύτερο χώρο και ένα μέρος της



απορροφάται από τη Γη. Μάλιστα όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η επικοινωνία με τα κύματα επιφάνειας. Τα κύματα χώρου αποτελούνται από το τμήμα της ακτινοβολίας, το οποίο εκπεμπόμενο προς τα πάνω ανακλάται στην ιονόσφαιρα. Μετά την ανάκλαση τους επιστρέφουν στο έδαφος και φθάνουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς η έντασή τους να έχει ελαττωθεί τόσο, όσο εκείνη των κυμάτων επιφανείας. Όπως φαίνεται στο σχήμα-10, τα κύματα χώρου ανακλώνται μόνον όταν δεν πέφτουν κάθετα στην ιονόσφαιρα, ενώ όταν πέφτουν σχεδόν κάθετα, ανάλογα με το μήκος κύματος είτε ανακλώνται είτε τη διαπερνούν. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον δεν είναι δυνατή η λήψη βραχέων κυμάτων χώρου σε μικρές αποστάσεις. Αντίθετα, τα μικροκύματα δεν ανακλώνται, περνούν την ιονόσφαιρα και φτάνουν στους τεχνητούς δορυφόρους.

Είναι δυνατό λοιπόν, σε ένα σημείο της επιφάνειας της Γης να καταφθάσουν δύο κύματα ένα κύμα επιφάνειας και ένα χώρου. Τότε το σήμα στο δέκτη προέρχεται από τη συμβολή των δύο αυτών κυμάτων και εξαιτίας της, άλλοτε έχουμε ενίσχυση και άλλοτε εξασθένηση του σήματος (διαλείψεις). Επίσης, οι ραδιοφωνικοί δέκτες έχουν επαρκή ενίσχυση ώστε να είναι δυνατή η λήψη και ασθενών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όμως, η λήψη ενός προγράμματος δεν είναι ασφαλής όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ασθενή γιατί εκτός από τα κύματα επιφανείας και χώρου, ο δέκτης λαμβάνει και τα λεγόμενα “παράσιτα”, δηλαδή ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές

διαταραχές, που προέρχονται είτε από ηλεκτρικές διαταραχές της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρικά παράσιτα), είτε από διάφορες ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν (βιομηχανικά παράσιτα). Η εκπομπή των βιομηχανικών παρασίτων μπορεί να ελαττωθεί με κατάλληλες αντιπαρασιτικές διατάξεις που εφαρμόζονται στις συσκευές που τα παράγουν. Επιπλέον, επειδή τα κύματα επιφανείας εισχωρούν μέσα στη Γη, είναι δυνατή η λήψη τους και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε ξηρό έδαφος η λήψη είναι δυνατή σε βάθος 100 m και πάνω, ενώ μέσα στη θάλασσα περιορίζεται σε βάθος 1 m (για μήκος κύματος 300 m).

Εμβέλεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων: Οι συνθήκες μεταδόσεως μιας ραδιοφωνικής εκπομπής εξαρτώνται πολύ από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος επομένως τα κύματα που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνία χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

α) Τα μακρά κύματα ($\lambda > 600$ m) παρουσιάζουν μικρή απορρόφηση ως κύματα επιφανείας και είναι κατάλληλα για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις.

β) Τα μεσαία κύματα ($100 \text{ m} < \lambda < 600 \text{ m}$) ($\lambda = 200-600 \text{ m}$ ή $\nu = 1,5-0,5 \text{ MHz}$) παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση ως κύματα επιφανείας αλλά ως κύματα χώρου ανακλώνται στην ιονόσφαιρα και φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις από τον πομπό. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετάδοση ραδιοφωνικών προγραμμάτων για σχετικά μικρές αποστάσεις όπως για παράδειγμα μέσα σε μια επικράτεια και αυτό λόγω της εξασθένησής τους. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις επέρχονται διαλείψεις λόγω συμβολής με κύματα χώρου.

γ) Τα βραχεία κύματα ($10 \text{ m} < \lambda < 100 \text{ m}$) ($\lambda = 18-50 \text{ m}$ $\nu = 6-16 \text{ MHz}$) παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απορρόφηση ως κύματα επιφανείας ώστε να εκλείψουν τελείως μέσα σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα αλλά ως κύματα χώρου μπορούν να πάθουν διαδοχικές ανακλάσεις πάνω στην ιονόσφαιρα και στο έδαφος και να φτάσουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς αισθητή εξασθένηση.

δ) Τα υπερβραχεία κύματα ($1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$) ($\lambda < 10 \text{ m}$ ή $\nu > 30 \text{ MHz}$) δεν ανακλώνται στην ιονόσφαιρα αλλά περνούν μέσα από αυτή και βγαίνουν στο αστρικό διάστημα. Οπότε για τη μετάδοση χρησιμοποιούμε μόνο τα κύματα επιφανείας που έχουν πολύ μικρή εμβέλεια. Δια δίδονται ευθύγραμμα, όπως το φως, και για αυτό ο δέκτης πρέπει να βρίσκεται στον οπτικό ορίζοντα του πομπού. Η εμβέλειά τους εξαρτάται από το ύψος στο οποίο βρίσκεται η κεραία πάνω από το έδαφος (60 Km για ύψος 100 m). Χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων στις περιοχές VHF (Very High Frequency) σε διαύλους 47-68 MHz και 174-230 MHz. Άλλοι σταθμοί εκπέμπουν σε ακόμη υψηλότερες τις UHF (Ultra High Frequency) από 470-960 MHz.

Για αστική χρήση (C.B. = Citizen's Band) διατίθεται η ζώνη συχνοτήτων άνω των 27 MHz, ενώ για τη ναυτιλία, την αστυνομία, την αεροπλοΐα και το στρατό, ειδικές ζώνες.

ε) Τα μικροκύματα ($0,1 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ m}$) $\nu > 300 \text{ MHz}$ περνούν από την ιονόσφαιρα και βγαίνουν στο αστρικό διάστημα. Μπορούν να αποτελέσουν κατευθυνόμενη δέσμη όπως οι φωτεινές ακτίνες. Χρησιμοποιούνται στα ραντάρ και τη ραδιοτηλεφωνία.

Όνομα	Μεσαία	Βραχεία	Υπερβραχεία		Μικροκύματα
Μήκος κύματος λ	εκατοντάδες μέτρα	δεκάδες μέτρα	μέτρα	δεκατόμετρα	εκατοστόμετρα
Συχνότητα ν	500-1500 KHz	6-25 MHz	VHF 30-300 MHz	UHF 470-960 MHz	UHF 4-6 GHz
Χρήση	Ραδιοφωνία AM	Διηπειρωτική Ραδιοφωνία AM	<ul style="list-style-type: none"> Ραδιοφωνία AM (Ζώνη II) Τηλεόραση Δίαυλοι 5-11 (Ζώνη III) 	Τηλεόραση Δίαυλοι 21-60 (Ζώνη IV&V)	Υπεραστική τηλεφωνία και δορυφορικές επικοινωνίες

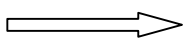
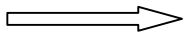
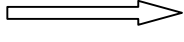
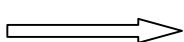
Σχήμα-11: Περιοχές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και χρήσεις τους.

Αναμετάδοση των κυμάτων και διαστημικές τηλεπικοινωνίες: Επειδή τα υπερβραχεία και τα μικροκύματα διαδίδονται ευθύγραμμα και εμποδίζονται από τα βουνά και την καμπυλότητα της Γης για να φτάσουν σε μεγάλες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται σταθμοί αναμετάδοσης με τέτοιο τρόπο ώστε ο ένας σταθμός να αντικρύζει τον άλλο. Κάθε τέτοιος σταθμός έχει δέκτη, ενισχυτή και πομπό που τα ξαναεκπέμπει προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Τα ερτζιανά κύματα με μικρό μήκος κύματος μεταδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια ειδικών τεχνητών δορυφόρων, των τηλεπικοινωνιακών, που περιφέρονται γύρω από τη Γη σε ύψη που κυμαίνονται από 10.000- 36.000 Km. Έχουν δέκτη, ενισχυτή και πομπό και λειτουργούν με συσσωρευτές που φορτίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από πολλές φωτοστήλες οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα ερτζιανά κύματα που εκπέμπονται από την επιφάνεια της Γης ξαναγυρίζουν αφού έχουν διανύσει μεγάλες αποστάσεις έξω από την ατμόσφαιρα στο αστρικό διάστημα (διαστημικές τηλεπικοινωνίες).

1.2.3.2 Αναλογικό - Ψηφιακό σήμα

Τα σήματα πληροφορίας διακρίνονται σε αναλογικά και ψηφιακά. Οποιοδήποτε σήμα δεν είναι δυνατόν να διαδοθεί από οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας γιατί πρέπει το

μέσο να είναι προσαρμοσμένο, στις χρονικές μεταβολές του. Έτσι, το σήμα πρέπει να αλλάξει χαρακτηριστικά (είδος, πλάτος, συχνότητα, κ.λ.π.), κάθε φορά που θα μεταδοθεί από διαφορετικό μέσο. Η διαδικασία επεξεργασίας του σήματος της πληροφορίας που το καθιστά ικανό να μεταδοθεί ονομάζεται **διαμόρφωση**. Το **διαμορφωμένο σήμα** είναι αυτό που τελικά μεταδίδεται και έχει αναλογική **φορέας (carrier)** ή ψηφιακή μορφή. Γενικά έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

- αναλογικό σήμα  αναλογική μετάδοση (αναλογικός φορέας)
- ψηφιακό σήμα  αναλογική μετάδοση (αναλογικός φορέας)
- ψηφιακό σήμα  ψηφιακή μετάδοση και
- αναλογικό σήμα  ψηφιακή μετάδοση

1) Το αναλογικό σήμα πληροφορίας διαμορφώνεται και μετατρέπεται στον φορέα που δίνεται από σχέση της μορφής

$$S(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

όπου A: το πλάτος

$\omega = 2\pi f$ με f τη συχνότητα του S(t) και

φ : η φάση,

Όταν ο φορέας φτάσει στον προορισμό του αποδιαμορφώνεται στο αρχικό σήμα πληροφορίας.

Έχουμε έτσι μια από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Διαμόρφωση πλάτους (AM- Amplitude Modulation)
- Διαμόρφωση συχνότητας (FM-Frequency Modulation) ή
- Διαμόρφωση φάσης (PM-Phase Modulation)

2) Τα ψηφιακά σήματα διαμορφώνονται με αντίστοιχες τεχνικές:

- Ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους (ASK- Amplitude Shift Keying)
- Ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (FSK-Frequency Shift Keying) ή την FSK με συνέχεια φάσης (CPFSK- CONTINUOUS Phase FSK)
- Ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (PSK-Phase Shift Keying) ή την BPSK-Binary PSK ή την PSK 4αρων φάσεων (QPSK-Quad PSK) ή την PSK 8 φάσεων (8PSK) ή την διαφορική διαμόρφωση φάσης (DPSK-Differential PSK)
- QAM-Quadrature Amplitude Modulation
- TCM-Trellis Code Modulation

3) Και για αυτή την περίπτωση υπάρχουν πολλές μέθοδοι διαμόρφωσης όπως η Non Return to Zero (NRZ) και η Return to Zero (RZ).

4) Για να, θα πρέπει να μετατραπεί σε σήμα διακριτό ως προς το χρόνο. Η ψηφιακή μετάδοση είναι ουσιαστικά η μεταφορά ψηφιακών παλμών. Ως διαμόρφωση παλμών ονομάζουμε τη διαμόρφωση, όπου το σήμα φορέας είναι ακολουθία παλμών και το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει κάποιο από τα χαρακτηριστικά των παλμών όπως το πλάτος, τη διάρκεια, τη θέση. Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες διαμόρφωσης παλμών:

- Διαμόρφωση διάρκειας παλμών PWM-Pulse Width Modulation/PDM-Pulse Duration Modulation/PLM- Pulse Length Modulation
- Διαμόρφωση θέσης παλμών PPM-Pulse Position Modulation
- Διαμόρφωση εύρους παλμών PAM-Pulse Amplitude Modulation
- Παλμοκωδική διαμόρφωση PCM-Pulse Code Modulation
- Διαμόρφωση δέλτα Delta Modulation

Η μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό πραγματοποιείται με τη διαδικασία της δειγματοληψίας (sampling) κατά την οποία από ένα αναλογικό σήμα λαμβάνεται ένας πεπερασμένος αριθμός τιμών του (δείγματα).

Θεώρημα δειγματοληψίας (Nyquist): *Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα αναλογικό σήμα πληροφορίας $S(t)$ περιορισμένης ζώνης συχνοτήτων και ότι f_{max} είναι η μεγαλύτερη συχνότητα που περιέχει. Αν πάρουμε δείγματα του πλάτους του σήματος σε κανονικά χρονικά διαστήματα με ρυθμό δειγματοληψίας μεγαλύτερο από $2f_{max}$, τα δείγματα αυτά περιέχουν όλη την πληροφορία του αρχικού αναλογικού σήματος $S(t)$.*

Έτσι κάθε αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και με κατάλληλη επεξεργασία των δειγμάτων ξαναδημιουργείται το αρχικό σήμα.

1.2.3.3 Χαρακτηριστικά

Τα αναλογικά σήματα έχουν πολλές συνιστώσες συχνότητας, τις οποίες το κανάλι δε μεταδίδει ομοιόμορφα, με αποτέλεσμα το σήμα να παραμορφώνεται. Επίσης σε κάθε κανάλι το αναλογικό σήμα εξασθενεί καθώς ταξιδεύει και συμπαρασύρει ανεπιθύμητα σήματα (θόρυβος). Όσο μεγαλώνει η απόσταση, τόσο μεγαλώνει και ο θόρυβος.

Οι ψηφιακές επικοινωνίες επιτυγχάνουν την αποκατάσταση του εξασθενημένου και παραμορφωμένου σήματος απορρίπτοντας ταυτόχρονα το θόρυβο και την παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στο ότι στην ψηφιακή κωδικοποίηση υπάρχει ένα

περιορισμένο και καλά καθορισμένο σύνολο χαρακτήρων (συνήθως δύο μόνο, το 0 και 1). Έτσι, μπορούμε να ανιχνεύσουμε ένα ισχυρά παραμορφωμένο σήμα, αρκεί να μπορούμε να αναγνωρίσουμε εάν έχει σταλεί 0 ή 1.

1.2.3.4 Σύγκριση

Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά επιτρέπουν στα αναλογικά σήματα να εκφραστούν σαν ακολουθίες αριθμών, δηλαδή ψηφιακά σήματα που μπορούν να μεταδοθούν αποφεύγοντας την υποβάθμιση που υφίστανται τα αναλογικά σήματα. Επιπλέον η ψηφιακή μετάδοση είναι φθηνότερη, διότι είναι εύκολο να κατασκευαστούν διατάξεις οι οποίες πρέπει να αποφασίζουν για δύο καταστάσεις παρά διατάξεις ακριβείας που χειρίζονται σήματα με μεγάλο εύρος τιμών. Όμως, η ψηφιακή μετάδοση απαιτεί κανάλια επικοινωνίας μεγαλύτερου εύρους ζώνης σε σχέση με ένα αναλογικό σήμα. Επίσης, επιβαρύνονται ο πομπός και ο δέκτης για τις μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό και από ψηφιακό σε αναλογικό. Τα αναλογικά σήματα επηρεάζονται από κάθε θόρυβο που μεταβάλλει το πλάτος, τη συχνότητα ή τη φάση τους σε αντίθεση με τα ψηφιακά συστήματα που η ευαισθησία είναι μικρή. Τέλος σημαντική είναι η ευκολία επεξεργασίας των ψηφιακών σημάτων με τη σημερινή τεχνολογία. Ανεξάρτητα με τα επιμέρους αρνητικά και θετικά κυριαρχεί η τάση μετατροπής όλων των σημάτων σε ψηφιακά γιατί αποτελούν την καλύτερη λύση.

1.2.3.5 Μετασχηματισμός Fourier

Είναι πειραματικό δοσμένο ότι για πολλά είδη κυμάτων δύο ή περισσότερα μπορούν να διαδοθούν στον ίδιο χώρο ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι η απομάκρυνση σε δοσμένο χρόνο είναι το άθροισμα των απομακρύνσεων που θα προκαλούσαν τα ξεχωριστά κύματα από μόνα τους. Η διαδικασία αυτή λέγεται επαλληλία. Για παράδειγμα, μέσα από μια κεραία ραδιοφώνου περνούν ραδιοκύματα πολλών συχνοτήτων και τα ηλεκτρικά ρεύματα που δημιουργεί στην κεραία η δράση όλων αυτών των κυμάτων είναι πολύ πολύπλοκα. Όμως μπορούμε να πιάσουμε ένα συγκεκριμένο σταθμό και μάλιστα το σήμα είναι το ίδιο με εκείνο που θα παίρναμε αν όλοι οι άλλοι σταθμοί σταματούσαν να εκπέμπουν. Όμοια μπορούμε να ακούμε νότες που προέρχονται από διαφορετικά μουσικά όργανα μιας ορχήστρας παρά το γεγονός ότι το ηχητικό κύμα που καταλήγει στα αυτιά μας από όλη την ορχήστρα είναι σύνθετο. Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα η αρχή της επαλληλίας ισχύει γιατί οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι γραμμικές. Η φυσική σημασία

της αρχής της επαλληλίας είναι η δυνατότητα να αναλύσουμε μια σύνθετη κυματική κίνηση σε άθροισμα απλών κυμάτων. Ο Γάλλος μαθηματικός Fourier (1768-1830), έδειξε ότι για να δημιουργήσουμε τη γενική μορφή ενός περιοδικού κύματος χρειαζόμαστε απλά αρμονικά κύματα. Έτσι αν $y(t)$ είναι η κίνηση μιας πηγής κυμάτων περιόδου T , μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

$$y(t) = A_0 + A_1 \eta\mu(\omega t) + A_2 \eta\mu(\omega t) + A_3 \eta\mu(\omega t) + \dots + B_1 \sigma\upsilon\nu(\omega t) + B_2 \sigma\upsilon\nu(\omega t) + B_3 \sigma\upsilon\nu(\omega t) + \dots$$

Το άθροισμα αυτό λέγεται σειρά Fourier. Τα A και B είναι σταθερές με ορισμένες τιμές για οποιαδήποτε συγκεκριμένη περιοδική κίνηση $y(t)$. Αν η κίνηση δεν είναι περιοδική, όπως ο παλμός, το άθροισμα αντικαθίσταται από ένα ολοκλήρωμα που λέγεται ολοκλήρωμα Fourier.

1.2.4 Η έννοια της κωδικοποίησης

Η κωδικοποίηση είναι μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες, προκειμένου αναλογικά σήματα να μετατραπούν σε ψηφιακά και τα ψηφιακά να μετατραπούν σε κατάλληλη μορφή μετάδοσης μέσα από τα διάφορα φυσικά μέσα. Έχουμε δύο βασικά είδη κωδικοποίησης, την κωδικοποίηση πηγής και την κωδικοποίηση καναλιού.

1.2.4.1 Κωδικοποίηση πηγής

Οι Η/Υ αναγνωρίζουν μόνο ψηφιακά σήματα και για να διαχειριστούν τα αναλογικά σήματα πρέπει να αναπαρασταθούν με ψηφιακό τρόπο.

Κωδικοποίηση πηγής είναι η διαδικασία κατά την οποία σε κάθε σύμβολο, γράμμα ή αριθμό αντιστοιχίζεται κατά μοναδικό τρόπο μία συγκεκριμένη δυαδική λέξη και επιτυγχάνεται με τη χρήση πινάκων αντιστοιχίας των διαφόρων χαρακτήρων με σειρές από bit που περιγράφουν τους **κώδικες**.

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε κώδικα είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιεί για να παραστήσει το κάθε σύμβολο. Αν ένας κώδικας χρησιμοποιεί μ αριθμό bits, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών δηλαδή των συμβόλων που μπορεί να περιγράψει με αυτά θα είναι ίσος με 2^μ . Αν ένας κώδικας έχει ως στόχο την κωδικοποίηση N διαφορετικών συμβόλων, τότε ο αριθμός μ των bits που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει θα δίνεται από τη σχέση:

$$2^{\mu-1} < N \leq 2^\mu$$

Όσο λιγότερα bits χρησιμοποιεί ένας κώδικας, τόσο καλύτερα είναι ως προς την ταχύτητα μετάδοσης συμβόλων.

Από τους πιο γνωστούς κώδικες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ο **ASCII - American Standard Code for Information Interchange**. Χρησιμοποιεί 7 bits και έχει δυνατότητα για κωδικοποίηση 128 χαρακτήρων. Ένας άλλος κώδικας είναι ο **ΕΛΟΤ 928**, που ονομάστηκε έτσι από τον **Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης** και αποτελεί επέκταση του ASCII με τα ελληνικά κεφαλαία και μικρά γράμματα και ειδικούς χαρακτήρες της ελληνικής γλώσσας. Χρησιμοποιεί 8 bits, δηλαδή έχει 256 δυνατούς συνδυασμούς και έχει υιοθετηθεί και από τον ISO (International Standardization Organization). Τέλος άλλος γνωστός κώδικας είναι ο **EBCDIC-Extended Binary Coded Decimal Interchange Code**. Είναι κώδικας 8 bit με 256 διαφορετικούς συνδυασμούς και περιλαμβάνει γραφικά σύμβολα, χαρακτήρες ελέγχου και χαρακτήρες άλλων γλωσσών. Όμως υστερεί σε επικοινωνίες data γιατί δεν περιέχει parity bit που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σφαλμάτων με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείτε μόνο σε περιπτώσεις άλλης εφαρμογής άλλης μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων.

1.2.4.2 Κωδικοποίηση καναλιού

Ο πιο απλός τρόπος για να παρουσιάσει κανείς δυαδική πληροφορία είναι να χρησιμοποιήσει μία συγκεκριμένη τάση για να απεικονίσει το 1 και τη μηδενική τάση για να απεικονίσει το 0. Η μορφή αυτή ονομάζεται **απλή δυαδική (pure binary)** κωδικοποίηση και είναι απόλυτα ικανοποιητική, όταν χρησιμοποιείται σε τερματικές συσκευές ή άλλα συστήματα. Παρουσιάζει προβλήματα όταν χρησιμοποιείται για τη μετάδοση της πληροφορίας σε απόσταση που ξεπερνά τις μερικές δεκάδες μέτρα. Το κενό αυτό καλύπτεται από ένα μεγάλο αριθμό κωδίκων καναλιού. **Κώδικας καναλιού** ή **κώδικες γραμμής (line code)** είναι κάθε μέθοδο κωδικοποίησης ψηφιακής πληροφορίας που διευκολύνει τη μετάδοσή της μέσα από αναλογικά και ψηφιακά μέσα μετάδοσης. Οι λόγοι που κάνουν απαραίτητη την ύπαρξη των κωδίκων καναλιού είναι οι παρακάτω:

- Είναι απαραίτητο να αφαιρείται από το αποστελλόμενο σήμα η συνεχής συνιστώσα τάσης που μπορεί αυτό να έχει, λόγω του ότι το μέσο μετάδοσης δεν μπορεί να τη μεταδώσει.
- Η ανάγκη να είναι ενήμερος ο δέκτης για τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η μετάδοση και τη διάρκειά της.
- Η ανάγκη βέλτιστης χρήσης του εύρους ζώνης του συγκεκριμένου καναλιού επικοινωνίας.

- Η ανάγκη ύπαρξης τρόπου εντοπισμού και διόρθωσης λαθών (error detection and error correction) που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση της πληροφορίας.
- Η ανάγκη μείωσης της παραμόρφωσης και
- Η μείωση της πιθανότητας παρουσίασης διαφωνίας (crosstalk).

Τόσο η παραμόρφωση όσο και η διαφωνία σχετίζονται με το εύρος ζώνης συχνοτήτων του μεταδιδόμενου σήματος (§ 4.2). Έτσι οι κώδικες γραμμής περιορίζουν το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων από το μεταδιδόμενο σήμα

1.3 Τηλεπικοινωνίες και Τεχνολογία

Η εξέλιξη των επικοινωνιών υπήρξε θεαματική ιδιαίτερα από το Β' Παγκόσμιο πόλεμο και μετά και ο λόγος ήταν η εξέλιξη της Ηλεκτρονικής η οποία σήμερα έχει αλλάξει τελείως φυσιογνωμία σε σχέση με 50 χρόνια πριν. Από τα φαινόμενα αγωγιμότητας στο κενό, στα αέρια ή στους ημιαγωγούς φτάσαμε σε τεχνικές που χρησιμοποιούν μεταβολές φυσικών μεγεθών για να διαβιβάσουν, να λάβουν, και να επεξεργαστούν μια πληροφορία (ηλεκτρομαγνητικά πεδία, φωτεινά σήματα (φωτόνια), ηλεκτρικό ρεύμα). Όλα τα επιτεύγματα τελευταίας τεχνολογίας βασίζονται σε:

- Ολοκληρωμένα κυκλώματα ημιαγωγών
- Μικροκυματικές διατάξεις
- Οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις

Στην 3^η Ενότητα θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα εξής ζητήματα:

- ✓ Ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογία Si
- ✓ Μικροκυματικά κυκλώματα
- ✓ Οπτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα – Οπτικοηλεκτρονική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ενότητα 2η :Βασικές έννοιες στη μετάδοση πληροφορίας

2.1 Η μετάδοση της πληροφορίας στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

2.1.1 Βασικές έννοιες

Στις επόμενες υποπαραγράφους θα ασχοληθούμε αναλυτικά με τα βασικά στοιχεία μετάδοσης δεδομένων (data). Συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στους τύπους προώθησης τους και τις μορφές μετάδοσης, τους τρόπους επικοινωνίας και σύνδεσης καθώς και σε βασικά στοιχεία για το μέσο μετάδοσης, δηλαδή το κανάλι επικοινωνίας.

Αρχικά όμως θα γίνει μια μικρή αναφορά στις αρχιτεκτονικές των δικτύων

Από πλευράς γεωγραφικής διάταξης των τερματικών τους, μπορούμε να διαχωρίσουμε τα δίκτυα σε τρεις κύριες κατηγορίες: ευρείας περιοχής, τοπικά και αστικά.

2.1.1.1 Δίκτυα Ευρείας Περιοχής - Wide Area Network - WAN

Τα δίκτυα της κατηγορίας αυτής καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις ξεφεύγοντας από τα στενά όρια μιας πόλης, επεκτείνονται σε ολόκληρη την έκταση μιας χώρας και πολλές φορές καλύπτουν και μεγάλο αριθμό διαφορετικών χωρών. Πρόκειται στην πράξη για την παλαιότερη μορφή δικτύων. Χαρακτηριστικό τους είναι οι χαμηλοί ρυθμοί διάδοσης.

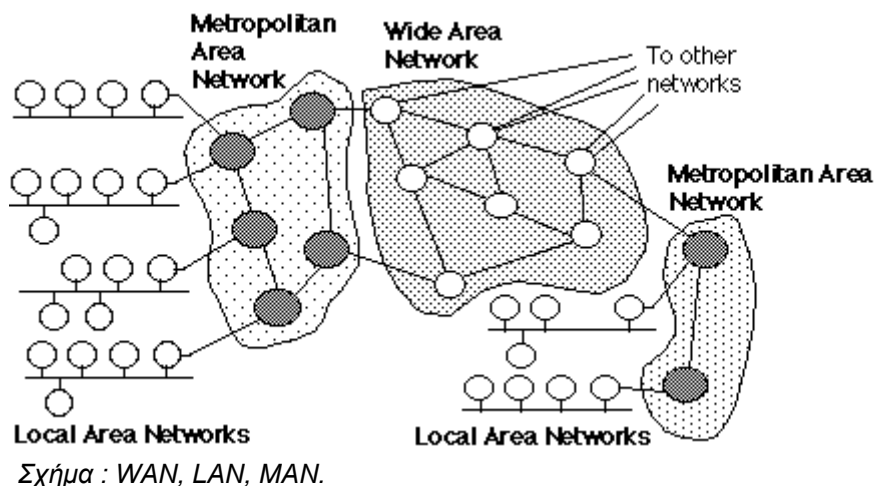
2.1.1.2 Τοπικά Δίκτυα - Local Area Network - LAN

Είναι τα δίκτυα που το σύνολο των στοιχείων που τα απαρτίζουν βρίσκονται στον ίδιο χώρο, όμως η έκταση που καταλαμβάνουν μπορεί να φτάνει μερικά χιλιόμετρα. Είναι υψηλής ταχύτητας και γνωρίζουν αλματώδη ανάπτυξη εξαιτίας των διευκολύνσεων που παρέχουν για παράδειγμα στα γραφεία μιας μεγάλης εταιρείας ή στους χώρους ενός πανεπιστημίου.

2.1.1.3 Αστικά Δίκτυα - Metropolitan Area Network - MAN

Είναι νέα κατηγορία δικτύων που εμφανίστηκε από το 1990 και δεν ξεπερνούν γεωγραφικά το μέγεθος μιας πόλης. Καλύπτουν τις αυξημένες τηλεπικοινωνιακές

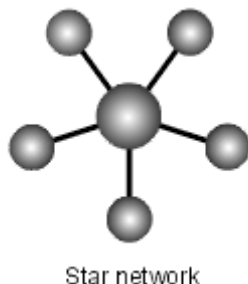
ανάγκες μέσα σε μία πόλη, χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές και μέσα και επιτυγχάνουν την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων από τα τοπικά δίκτυα και με μεγαλύτερες ταχύτητες.



2.1.2 τοπολογίες δικτύων

2.1.2.1 Τοπολογία Αστέρα - Star

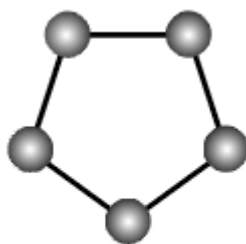
Είναι ένα δίκτυο όπου όλες οι τερματικές συσκευές συνδέονται ακτινωτά με έναν κεντρικό Η/Υ. Γενικά δίκτυα σε μορφή αστέρα χρησιμοποιούνται σε μικρές και μεσαίες εφαρμογές.



Σχήμα : Τοπολογία Αστέρα – Star.

2.1.2.2 Τοπολογία Δακτυλίου - Ring

Είναι ένα δίκτυο όπου οι διάφοροι τερματικοί σταθμοί συνδέονται σε ένα κλειστό δακτύλιο μέσω κάποιου φυσικού μέσου. Η σύνδεση γίνεται με ένα τέτοιο τρόπο, που όλα τα δεδομένα ταξιδεύουν σειριακά πάνω στο δακτύλιο περνώντας διαδοχικά από όλους τους σταθμούς. Σε αυτή την περίπτωση ο κάθε τερματικός σταθμός λειτουργεί ως επαναλήπτης (repeater) με τη λογική ότι δέχεται κάποια δεδομένα, τα οποία αν δεν τον αφορούν, τα επανεκπέμπει προς τον επόμενο σταθμό στη σειρά.

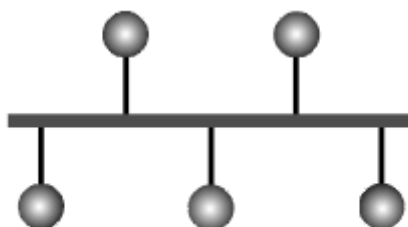


Ring network

Σχήμα :Τοπολογία Δακτυλίου – Ring.

2.1.2.3 Τοπολογία Αρτηρίας - Bus

Είναι ένα δίκτυο που χρησιμοποιούν οι τερματικοί σταθμοί συνδέονται πάνω σε ένα κοινό καλώδιο το οποίο αποτελεί τη σπονδυλική στήλη του δικτύου και επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλων ταχυτήτων διάδοσης των δεδομένων. Οι σταθμοί εκμεταλλεύονται τον κοινό δρόμο και εισάγουν δεδομένα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

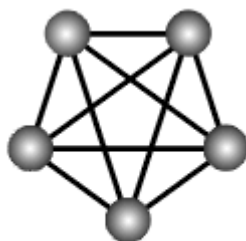


Bus network

Σχήμα :Τοπολογία αρτηρίας-bus.

2.1.2.4 Τοπολογία Mesh - Βρόχου

Σε ένα τέτοιο δίκτυο το κάθε τερματικό είναι συνδεδεμένο με τα άλλα με δύο τουλάχιστον δρόμους και με τέτοιον τρόπο, ώστε να δημιουργούνται βρόχοι. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία περισσότερων από ένα δρόμους για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο σημείων σχηματίζοντας έτσι ένα πλέγμα μεταξύ των κόμβων του δικτύου.



Mesh network

Σχήμα :Τοπολογία mesh-βρόχου.

2.1.2.5 Τύποι μετάδοσης

Ανάλογα με την τεχνική μεταβίβασης της πληροφορίας από ένα τερματικό σημείο προς ένα άλλο έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

- **Broadcast (ακρόαση):** Δίκτυα με κοινό μέσο επικοινωνίας, στα οποία ένας σταθμός εκπέμπει και όλοι οι τερματικοί σταθμοί λαμβάνουν το ίδιο σήμα. Τέτοια δίκτυα είναι τα ραδιοτηλεοπτικά, τα δορυφορικά και τα τοπικά (LAN).
- **Switched (μεταγωγή):** Δίκτυα που αποτελούνται από συνδεδεμένους κόμβους οι οποίοι λαμβάνουν δεδομένα εισερχόμενα στο δίκτυο από έναν τερματικό σημείο, μεταφέρονται από κόμβο σε κόμβο μέχρι το τελικό τερματικό σημείο. Υπάρχουν κόμβοι που δεν συνδέονται με τερματικό σημείο και απλά παίζουν το ρόλο του διεκπεραιωτή των δεδομένων. Υπάρχουν τρία είδη μεταγωγής: μεταγωγή κυκλώματος, μηνύματος και πακέτου που θα δούμε παρακάτω. Τέτοια δίκτυα έχουν οι τηλεπικοινωνιακές εταιρείες.
- **Networked (δικτύωση):** Δίκτυα τα οποία μεταφέρουν δεδομένα που αντιστοιχούν σε μια διεύθυνση μεταφέρονται προς μία άλλη μέσα από ένα πολύπλοκο σύστημα επιμέρους δικτύων. Ουσιαστικά συντελείται η αποκατάσταση επικοινωνίας μεταξύ δύο ακραίων τερματικών σημείων ενός μεγάλου δικτύου. Οι διαδρομές που ακολουθούνται περιλαμβάνουν φυσικές συνδέσεις και ζεύξεις δεδομένων. Παράδειγμα τέτοιου δικτύου είναι το Internet.

2.1.2.6 Μορφές μετάδοσης

Οι μορφές μετάδοσης των δεδομένων είναι οι εξής:

- **Σειριακή:** Σε αυτή τα bit των χαρακτήρων στέλνονται το ένα μετά το άλλο μέσα από , ένα απλό φυσικό κανάλι μετάδοσης. Τις πιο πολλές φορές μεταδίδεται πρώτο το λιγότερο σημαντικό bit (LSB - Least Significant Bit) του χαρακτήρα και μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις μεταδίδεται πρώτο το πιο σημαντικό bit (MSB - Most Significant Bit). Η σειριακή μετάδοση παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιείται σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων μέσω modem, η τυποποίηση και η ευρεία διάδοση της έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται και σε συνδέσεις μικρών αποστάσεων.
- **Παράλληλη:** Σε αυτή, όλα τα bit του χαρακτήρα στέλλονται ταυτόχρονα. Αυτό γίνεται με τη χρήση πολλαπλών καναλιών μετάδοσης τόσων όσα και τα bit του χαρακτήρα. Επιπρόσθετα, υπάρχουν και άλλα κανάλια για μεταφορά σημάτων

ελέγχου επιτυχούς μετάδοσης. Τα πολλά κανάλια είναι ο λόγος που η μετάδοση αυτή χρησιμοποιείται για μικρές αποστάσεις.

2.1.2.7 Σύγκριση σειριακής και παράλληλης μετάδοσης

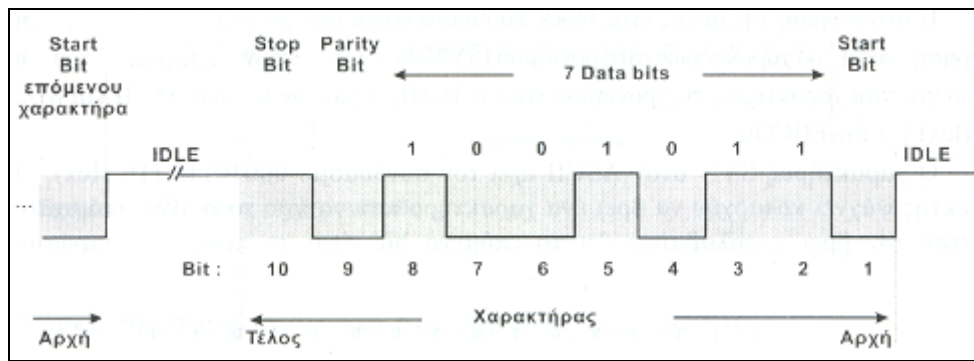
Η σειριακή μετάδοση είναι δημοφιλέστερη παρά τη μεγαλύτερη ταχύτητα της παράλληλης η οποία είναι πολύπλοκη και παρουσιάζει σοβαρά τεχνικά προβλήματα. Η πρώτη χρησιμοποιείται και για μικρές και για μεγάλες αποστάσεις παρά το ότι στη δεύτερη με μεθόδους πολυπλεξίας μπορούμε να περάσουμε παράλληλα πολλά κανάλια από ένα μόνο φυσικό μέσο, για παράδειγμα μια τηλεφωνική γραμμή.

2.1.3 Συγχρονισμός

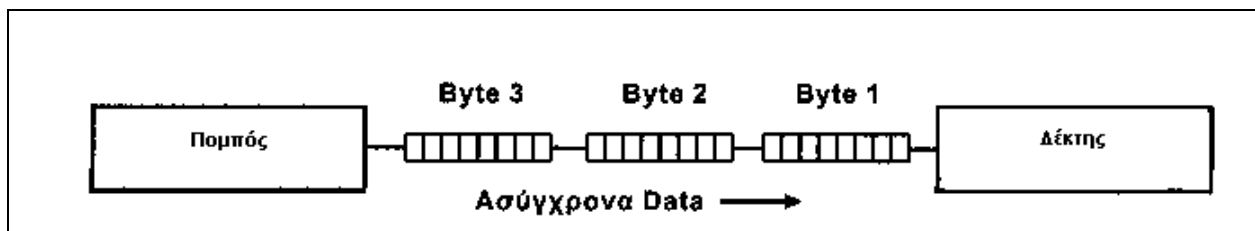
Μια μετάδοση δεδομένων για να γίνει με επιτυχία είναι πολύ βασικό στοιχείο ο πομπός να είναι συγχρονισμένος με το δέκτη. Αυτό προϋποθέτει σωστή ρύθμιση του δέκτη ώστε να ξέρει το ρυθμό μετάδοσης και τις στιγμές άφιξης των δεδομένων. Στην πραγματικότητα διαφέρουν κατά λίγο οπότε χρειάζονται κατάλληλες τεχνικές οι οποίες σχετίζονται με τον τρόπο μετάδοσης για τη διατήρηση του συγχρονισμού τους.

2.1.3.1 Ασύγχρονη μετάδοση

Τα δεδομένα στέλνονται με τη μορφή χαρακτήρων, αυτοί μεταδίδονται ένας-ένας εκ των οποίων κάθε ένας μεταδίδεται με μικρή χρονική απόσταση από τον επόμενο για να μπορεί ο δέκτης να τους διακρίνει. Ο δέκτης διακρίνει ένα διακριτικό start bit που υπάρχει πριν από κάθε χαρακτήρα και έχει τιμή 0 και καταλαβαίνει ότι ακολουθούν τα άλλα data bit του χαρακτήρα οπότε περιμένει να τα διαβάσει. Πριν φτάσει το start bit η γραμμή διατηρείται μόνιμα σε λογική τιμή 1 (idle). Τα bit του χαρακτήρα ακολουθούν το start bit, με πρώτο χρονικά το λιγότερο σημαντικό ψηφίο του (LSB) και τελευταίο το bit ισοτιμίας (parity) εάν υπάρχει και σχετίζεται με τον έλεγχο σφαλμάτων. Ο αριθμός των bit ανά χαρακτήρα είναι από την αρχή προσυμφωνημένος μεταξύ πομπού και δέκτη. Μετά την μετάδοση κάθε χαρακτήρα η γραμμή επανέρχεται υποχρεωτικά στην κατάσταση της λογικής τιμής 1 (idle) για χρονικό διάστημα τουλάχιστον ενός bit που καλείται stop bit και η διάρκειά του ανάλογα με τον κώδικα και την ταχύτητα μετάδοσης είναι 1,5 ή 2 bit. Η γραμμή εξακολουθεί μετά το stop bit να παραμένει σε κατάσταση idle μέχρι την εμφάνιση του start bit του χαρακτήρα που έπεται. Η ασύγχρονη μετάδοση χρησιμοποιείται σε συνδέσεις απλών τερματικών με Η/Υ , PC με PC, στο δίκτυο telex, στη σειριακή σύνδεση υπολογιστών με εκτυπωτές και αλλού.



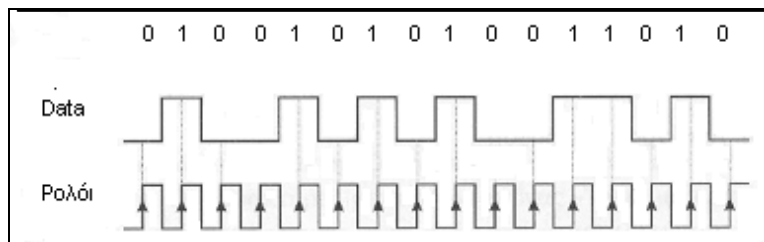
Σχήμα- : Ασύγχρονη μετάδοση



Σχήμα- : Διαδικασία ασύγχρονης μετάδοσης

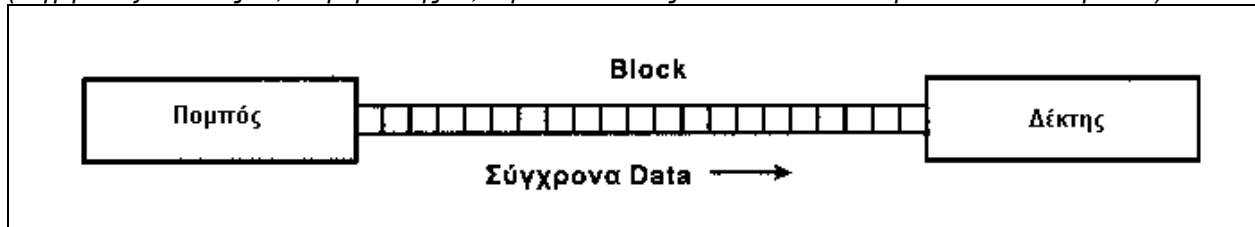
2.1.3.2 Σύγχρονη μετάδοση

Τα δεδομένα στέλνονται με τη μορφή χαρακτήρων οι οποίοι ομαδοποιούνται σε block και συνοδεύονται από ένα σήμα χρονισμού που είναι μια τετραγωνική κυματομορφή με συχνότητα ίση του ρυθμού μετάδοσης και ονομάζεται ρολόι (clock). Επίσης υπάρχει ένα ανεξάρτητο σήμα χρονισμού για την εκπομπή και ένα για τη λήψη. Τα data εκπομπής φεύγουν από τον πομπό συνοδευόμενα από το σήμα χρονισμού και φτάνουν στο δέκτη μαζί με αυτό. Κενός (idle) χρόνος ανάμεσα στο τελευταίο bit ενός χαρακτήρα και το πρώτο του επόμενου δεν υπάρχει. Είναι αναγκαία η ύπαρξη συγχρονισμού και για τη σωστή αναγνώριση των bit κατά τη μετάδοση τους από το φυσικό κανάλι αλλά και για το διαχωρισμό των χαρακτήρων μεταξύ τους. Ο δέκτης πρέπει πρώτα να αναγνωρίζει την αρχή και το τέλος κάθε block χαρακτήρων. Όταν το block αποτελείται από χαρακτήρες η αναγνώριση της αρχής του γίνεται με τη χρήση ενός ή δύο χαρακτήρων συγχρονισμού που τοποθετούνται στην αρχή του και η αναγνώριση του τέλους του από έναν χαρακτήρα που τοποθετείται στο τέλος του που λέγεται pad. Με την αναγνώριση του pad ο δέκτης αποσυγχρονίζεται μέχρι τους επόμενους χαρακτήρες συγχρονισμού οπότε και πάλι συγχρονίζεται. Στα block που αποτελούνται από bit ο συγχρονισμός γίνεται με έναν ειδικό χαρακτήρα που τοποθετείται στην αρχή κάθε block και ονομάζεται flag και είναι ο (01111110) και παρόμοια άλλων έναν στο τέλος του.



Σχήμα- : Διαδικασία σύγχρονης μετάδοσης

(Πηγή: Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών⁶ έκδοση 2003)



Σχήμα- : Διαδικασία ασύγχρονης μετάδοσης

2.1.3.3 Σύγκριση των τεχνικών μετάδοσης

Η ασύγχρονη μετάδοση δεν έχει μεγάλη απόδοση γιατί εκτός από τα data bit στέλνονται επιπλέον μη πληροφοριακά bit, όπως τα start, stop και bit ισοτιμίας, έχει όμως το θετικό ότι πραγματοποιείται εύκολα με συσκευές χαμηλού κόστους, για παράδειγμα προσωπικοί υπολογιστές (PC).

Η σύγχρονη μετάδοση έχει υψηλότερη απόδοση αφού ο συγχρονισμός και ο αποσυγχρονισμός γίνεται μια φορά κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του block και διαθέτει επιπλέον, αποδοτικότερους μηχανισμούς ελέγχου σφαλμάτων.

2.1.4 Τρόποι επικοινωνίας

Οι παρακάτω περιπτώσεις μας δείχνουν τους τρόπους που χρησιμοποιείται ένα μέσο μετάδοσης σχετικά με την κατεύθυνση της πληροφορίας.

2.1.4.1 Simplex (απλής κατεύθυνσης)

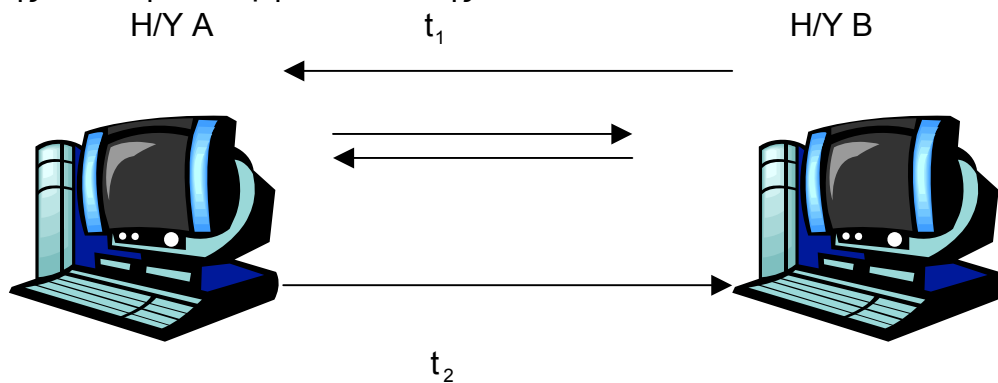
Είναι η απλούστερη μορφή κίνησης πληροφορίας όπου υπάρχει ένα κανάλι επικοινωνίας, στη μία πλευρά του οποίου ένα τερματικό σημείο αποκλειστικά εκπέμπει την πληροφορία και στην άλλη πλευρά του ένα άλλο τερματικό αποκλειστικά τη λαμβάνει. Τέτοια περίπτωση είναι τα ραδιοτηλεοπτικά προγράμματα.



Σχήμα- : Παράδειγμα επικοινωνίας simplex: Αποστολή data από Η/Υ σε εκτυπωτή.

2.1.4.2 Half Duplex (μη ταυτόχρονης αμφίδρομης κατεύθυνσης (HDX))

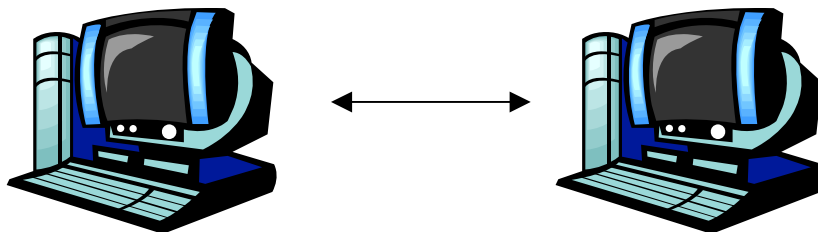
Η επικοινωνία διεξάγεται είτε προς τη μια κατεύθυνση είτε προς την άλλη αλλά όχι ταυτόχρονα. Η ροή των δεδομένων στο κανάλι επικοινωνίας αλλάζει κατεύθυνση ανάλογα με το ποιος είναι κάθε φορά ο πομπός και ποιος ο δέκτης. Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται εναλλαγή στην πληροφορία. Γενικά είναι διαδεδομένη στο χώρο των data communication. Επιτυγχάνεται με τη χρήση γραμμών δύο ή τεσσάρων συρμάτων. Ειδικά στις δισύρματες γραμμές παρατηρείται χρόνος καθυστέρησης κατά την αλλαγή κατεύθυνσης.



Σχήμα- : Παράδειγμα επικοινωνίας Half duplex

Στο σχήμα- η πληροφορία μεταφέρεται από το τερματικό A στο B σε χρόνο t_1 , ενώ από το τερματικό B στο A σε χρόνο $t_2 \neq t_1$.

2.1.4.3 Full Duplex (Ταυτόχρονης αμφίδρομης κατεύθυνσης (FDX))



Η επικοινωνία διεξάγεται και προς τις δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Οι πομποί και οι δέκτες στις δύο

Σχήμα- : Παράδειγμα επικοινωνίας Full duplex

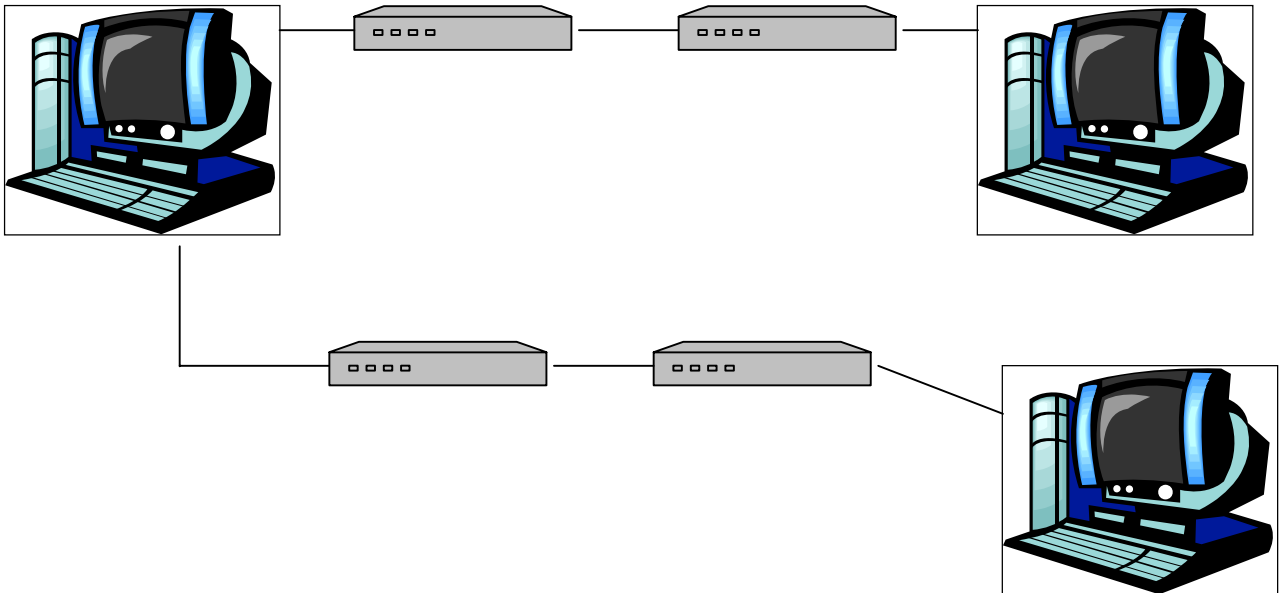
πλευρές του καναλιού επικοινωνίας λειτουργούν παράλληλα και για την υλοποίησή της ενώ χρειάζονται γραμμές τεσσάρων συρμάτων, νέες τεχνικές επιτρέπουν και δισύρματες γραμμές. Επίσης, χρόνος καθυστέρησης δεν υπάρχει.

2.1.5 Τρόποι σύνδεσης

Η σύνδεση, από τεχνικής πλευράς, ανάμεσα σε δύο τερματικά σημεία μπορεί να είναι:

2.1.5.1 Point to Point

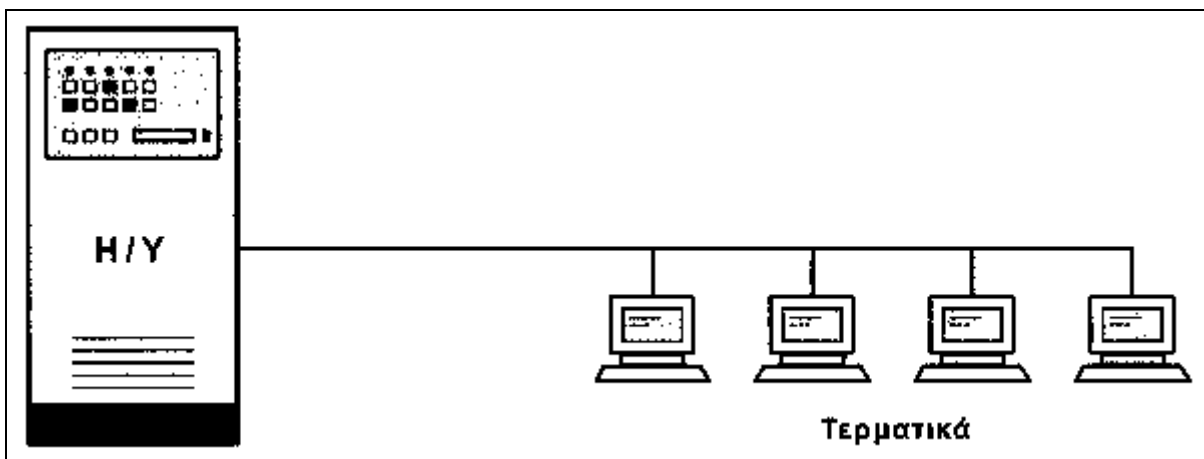
Αποτελεί την πρώτη μέθοδο που εφαρμόστηκε. Είναι η απλούστερη απευθείας σύνδεση μεταξύ δύο τερματικών σημείων και επιτυγχάνεται με δισύρματες ή τετρασύρματες γραμμές, ενώ η επικοινωνία μπορεί να είναι είτε half είτε full duplex. Με τον τρόπο αυτό γίνεται πλήρως εκμεταλλεύσιμη η χωρητικότητα του καναλιού.



Σχήμα- :Point to Point συνδέσεις

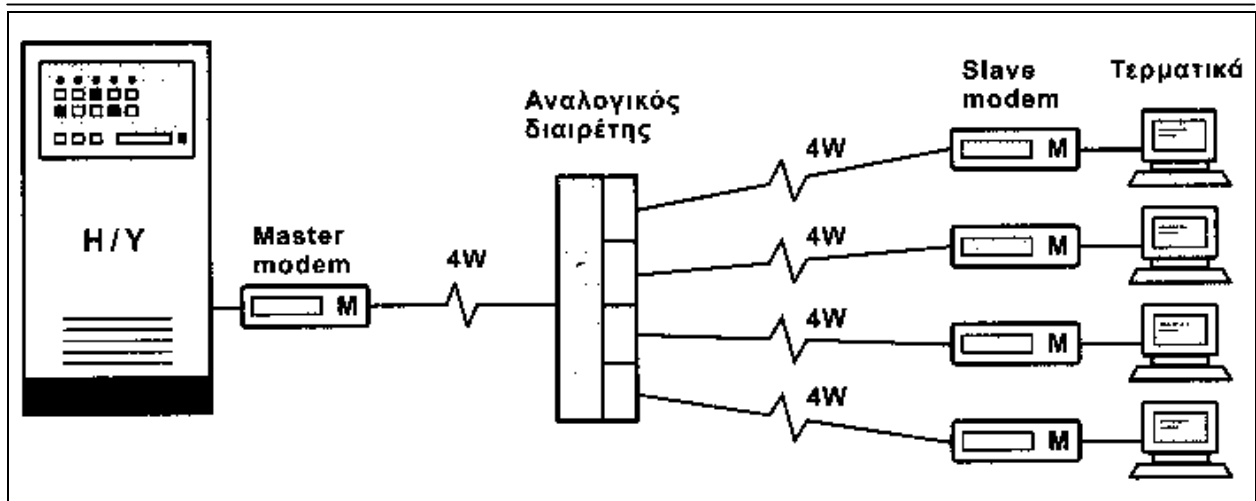
2.1.5.2 Point to Multipoint

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για να συνδέσει ένα τερματικό με πολλά άλλα χωρίς να χρειάζεται να κάνουμε πολλαπλές point to point συνδέσεις. Και απαιτούνται ειδικά πρωτόκολλα και έξυπνα τερματικά. Στην πράξη η point to multipoint σύνδεση μπορεί να γίνει είτε στο αναλογικό, είτε στο ψηφιακό τμήμα της γραμμής και επιτυγχάνεται με αναλογικό ή ψηφιακό διαιρέτη αντίστοιχα (σχήματα).

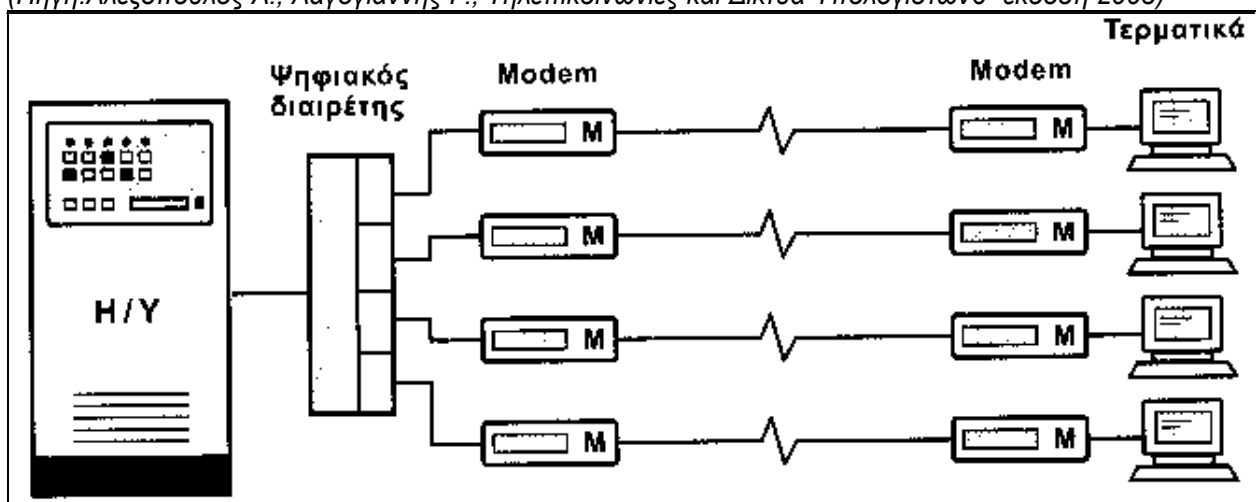


Σχήμα- : Point to Multipoint σύνδεση

(Πηγή:Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών 6^η έκδοση 2003)



Σχήμα- : Point to Multipoint σύνδεση-αναλογική διακλάδωση
(Πηγή:Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ., Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών⁶ έκδοση 2003)



Σχήμα- : Point to Multipoint σύνδεση-ψηφιακή διακλάδωση

2.1.6 Πολυπλεξία (Multiplexing)

Η τεχνική αυτή μας επιτρέπει να έχουμε πολλά σήματα σε μια γραμμή. Τα είδη πολυπλεξίας είναι:

- ❖ πολυπλεξία κώδικα - CDM (Code Division Multiplexing)
- ❖ πολυπλεξία μήκους κύματος - WDM (Wavelength Division Multiplexing)
- ❖ πολυπλεξία χρόνου -TDM (Time Division Multiplexing)
- ❖ πολυπλεξία συχνότητας - FDM (Frequency Division Multiplexing)

Για τη πολυπλεξία θα αναφερθούμε σε άλλη παράγραφο παρακάτω.

2.1.7 Ρυθμοί μετάδοσης

Ο όρος ρυθμός μετάδοσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό εκπομπής bit από τον πομπό. Έτσι έχουμε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (bit rate), ρυθμό μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος (baud rate), ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας (infonnation rate) και αυτά σχετίζονται με τη λεγόμενη χωρητικότητα καναλιού (channel capacity).

2.1.7.1 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (bit rate)

Είναι ο ρυθμός μετάδοσης bit δεδομένων από τον πομπό και εκφράζεται σε bit ανά μονάδα χρόνου, συγκεκριμένα bit per second (bps).

Στην περίπτωση σειριακής μετάδοσης ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{1}{T} \log_2 M$$

όπου S ο ρυθμός μετάδοσης bps, T η διάρκεια ενός bit του αποστελλομένου σήματος σε sec και M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του σήματος. Για τις ψηφιακές μεταδόσεις που το σήμα έχει δύο καταστάσεις 0 και 1, $M = 2$ οπότε ο τύπος γίνεται:

$$S = \frac{1}{T}$$

Στην περίπτωση παράλληλης μετάδοσης όπου χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα κανάλια μετάδοσης, ο ρυθμός δίνεται από του τύπο:

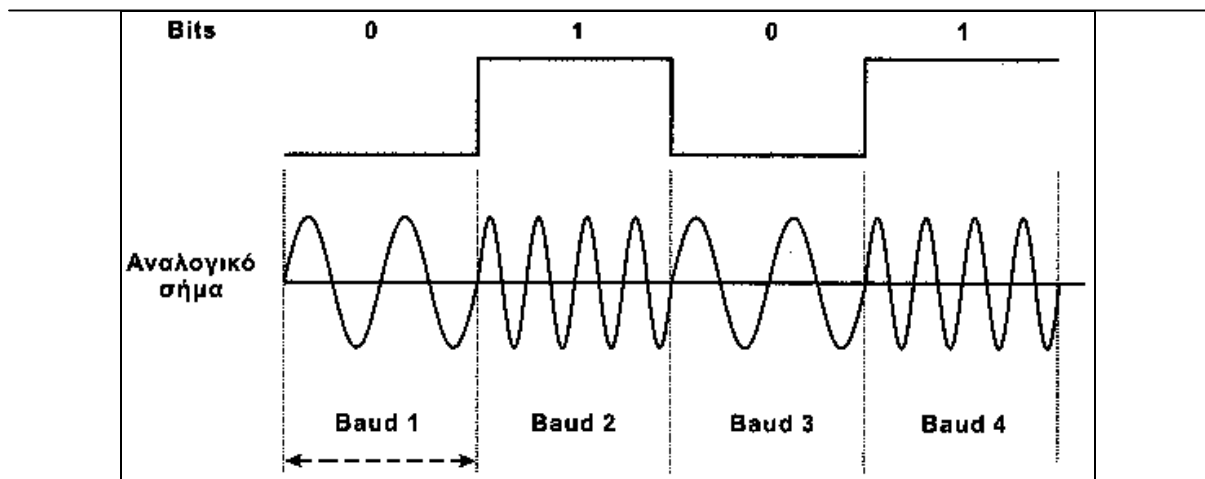
$$S = \frac{K}{T} \log_2 M$$

όπου K ο αριθμός των καναλιών που χρησιμοποιούνται, T η διάρκεια της μονάδας του διαμορφωμένου σήματος σε sec και M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του διαμορφωμένου σήματος.

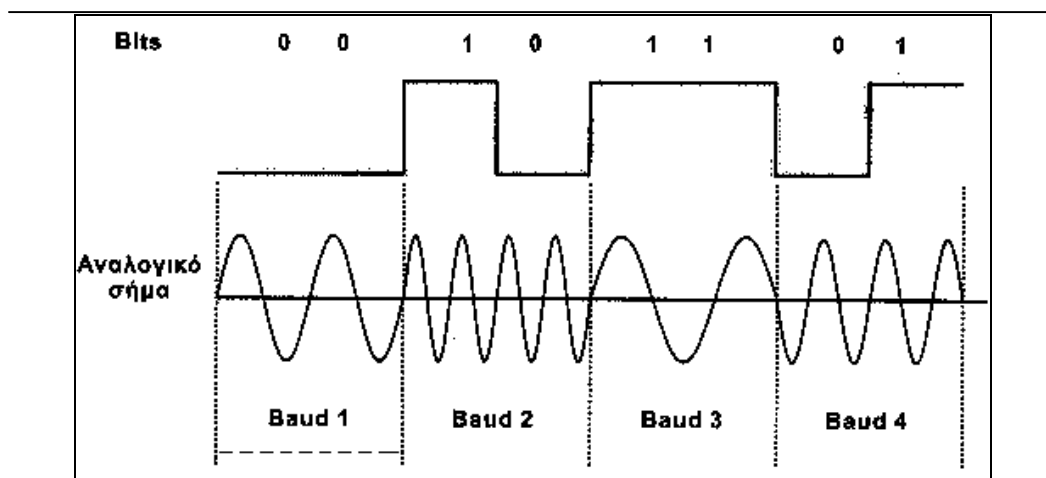
Για λόγους τυποποίησης οι τιμές ρυθμών μετάδοσης είναι 50, 75, 1200, 2400, 800, 7200, 9600, 12000, 14400, 16800, 19200, 24000, 28800, 33600, 38400 bps, 48 Kbps, 56, 64, 128 Kbps.

2.1.7.2 Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος (Baud rate)

Εκφράζει τον αριθμό των μεταβολών του διαμορφωμένου σήματος που έγιναν στη μονάδα του χρόνου και μετριέται σε baud χρησιμοποιούμενος κυρίως για μεταδόσεις μέσω modem. Ο ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος δεν ταυτίζεται με το bit rate εκτός αν η τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται αντιστοιχεί ένα bit σε κάθε μεταβολή διαμορφωμένου σήματος. Συνήθως όμως το bit rate είναι μεγαλύτερο του baud rate.



Σχήμα- :baud rate και bit rate



Σχήμα- :baud rate και bit rate

2.1.7.3 Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας (Information rate)

Είναι η ταχύτητα μετάδοσης της καθαρής πληροφορίας μετρούμενη bps και αποτελεί πολύ βασική γνώση γιατί είναι αυτό που ενδιαφέρει είναι η πληροφορία χωρίς πρόσθετους συνοδευτικούς χαρακτήρες.

2.2 Μέθοδος αποκατάστασης σύνδεσης – Είδη μεταγωγής

Αναφέραμε στην 4.1.1 ότι τα δίκτυα μεταγωγής αποτελούνται από συνδεδεμένους κόμβους που εξετάζουν τον προορισμό των δεδομένων και βρίσκουν το συντομότερο διαθέσιμο δρόμο προς το δέκτη. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι αποκατάστασης σύνδεσης δύο τερματικών σταθμών στα δίκτυα μεταγωγής:

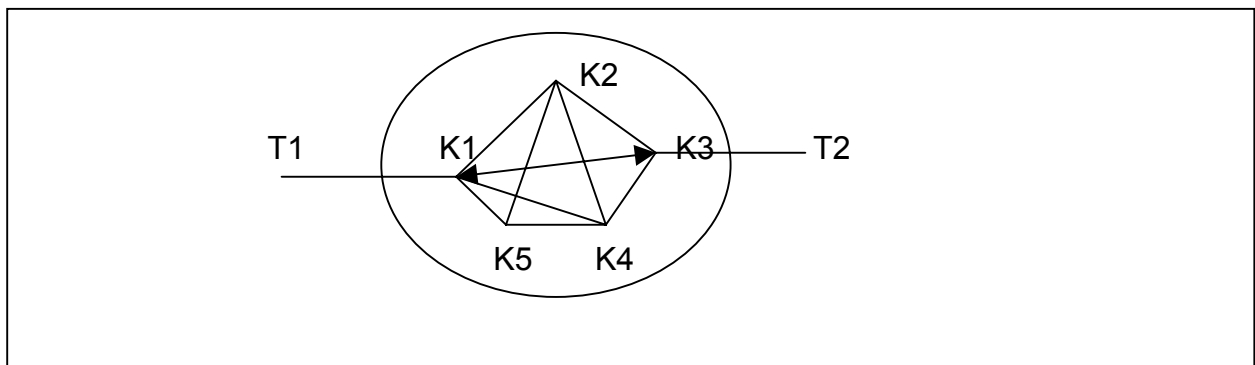
- Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching)
- Μεταγωγή μηνύματος (Message switching)

- Μεταγωγή πακέτου (Packet switching).

2.2.1 Μεταγωγή κυκλώματος

Με τη μέθοδο αυτή δημιουργείται μια φυσική σύνδεση μεταξύ δύο τερματικών σημείων, από τμήματα των γραμμών που συνδέουν τους κόμβους και δεσμεύονται αποκλειστικά για όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας τους.

Έστω ένα δίκτυο 5 κόμβων (K1, K2, K3, K4, K5) όπου το τερματικό σημείο T1 θέλει να επικοινωνήσει με το T2.



Σχήμα: Μεταγωγή κυκλώματος

Το T1 στέλνει αίτηση στον K1 για σύνδεση με το T2. Ο K1 ξεκινά αναζήτηση για την επιλογή δρόμου επιλέγει τον κόμβο K3 ο οποίος μεταφέρει την απαίτηση για σύνδεση με το T2 και αποκαθιστά το κύκλωμα αν το T2 είναι διαθέσιμο. Έτσι το T1 επικοινωνεί με το T2. Στο τέλος της επικοινωνίας η σύνδεση τερματίζεται, αφού ειδοποιηθούν και οι κόμβοι K1, K3, να διακόψουν την κατάληψη των καναλιών σύνδεσης.

Με τη μεταγωγή κυκλώματος γίνεται χρήση όλου του διαθέσιμου εύρους ζώνης της γραμμής έχοντας ως συνέπεια καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Όμως το ότι την ώρα αποστολής πρέπει να είναι διαθέσιμα και τα δύο άκρα επικοινωνίας και ότι οι γραμμές είναι κατειλημμένες από τους τερματικούς σταθμούς είτε επικοινωνούν είτε όχι, δηλαδή παρουσιάζονται κενά διαστήματα χρόνου, είναι ουσιώδη μειονεκτήματα.

2.2.2 Μεταγωγή μηνύματος

Εδώ ο αποστολέας οργανώνει την πληροφορία σε μήνυμα που το δίνει στο δίκτυο που προωθεί το μήνυμα από κόμβο σε κόμβο, μέχρι τον τελικό παραλήπτη. Το δίκτυο εκμεταλλεύεται τις γραμμές επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων για την αποστολή μηνυμάτων όλων των σταθμών. Σε κάθε μήνυμα είναι σημειωμένη στην αρχή η διεύθυνση του παραλήπτη, ώστε ο κάθε κόμβος να το προωθεί στον πλησιέστερο όταν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι. Στους κόμβους αποθηκεύονται τα μηνύματα, εξετάζεται ο

προορισμός τους και προωθούνται σε επόμενο κόμβο ή στους παραλήπτες και γι' αυτό σημειώνεται καθυστέρηση κάτι που έχει ως συνέπεια η μέθοδος αυτή να μην ενδείκνυται για μετάδοση εικόνας και ομιλίας.

Φυσικά υπάρχουν και θετικά όπως ότι δεν ενδιαφέρει αν την ώρα που ο αποστολέας στέλνει το μήνυμα, ο αποδέκτης είναι σε θέση να το δεχτεί γιατί το μήνυμα φυλάσσεται και στέλνεται αργότερα. Η εκμετάλλευση των γραμμών είναι πολύ καλύτερη, αφού ένα κανάλι μπορεί να διεκπεραιώσει μηνύματα πολλών χρηστών και παρέχει τη δυνατότητα πολλαπλής αποστολής του ίδιου μηνύματος σε πολλούς χρήστες και ο έλεγχος σφαλμάτων γίνεται από το δίκτυο. Οι δύο τερματικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν μηνύματα γραμμένα σε διαφορετικό κώδικα και με διαφορετική ταχύτητα και οι ακραίοι κόμβοι κάνουν τη μετατροπή.

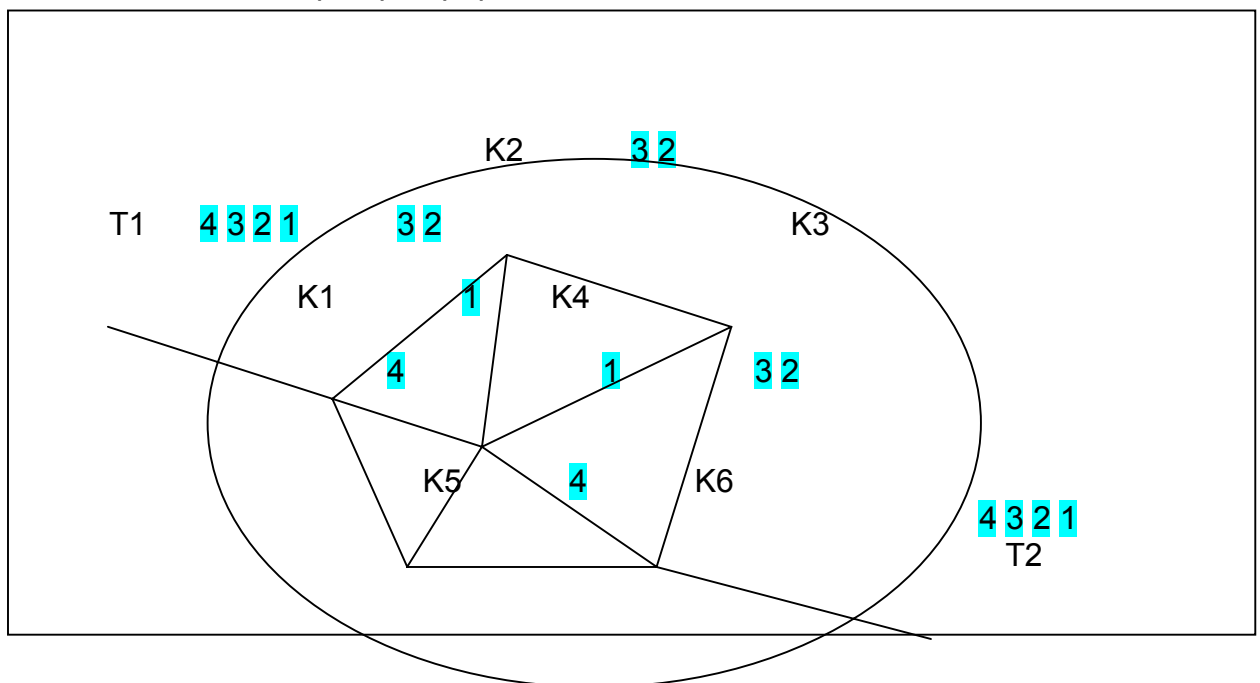
2.2.3 Μεταγωγή πακέτου

Στη μέθοδο αυτή γίνεται συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των δύο προηγούμενων με παράλληλη ελαχιστοποίηση των μειονεκτημάτων τους. Κάθε μήνυμα, πριν μεταφερθεί τεμαχίζεται σε πακέτα. Για την προώθηση αυτών εφαρμόζονται δύο τρόποι:

- Datagram (διάγραμμα)
- Virtual circuit (εικονικό κύκλωμα)

2.2.3.1 Datagram

Τα πακέτα ενός μηνύματος μπορούν να φτάσουν στον παραλήπτη χρησιμοποιώντας το καθένα το δικό του συντομότερο δρόμο.



Σχήμα : Μεταγωγή πακέτου με τη χρήση της τεχνικής datagram.

Το T1 θέλει να στείλει μήνυμα που χωρίζεται σε 4 πακέτα, στο T2. Στέλνει τα πακέτα 1, 2, 3, 4, με τη σειρά στον Κ1 ο οποίος για κάθε πακέτο επιλέγει τον πιο σύντομο δρόμο. Π.χ το πακέτο 1 ακολουθεί τη διαδρομή Κ1-Κ4-Κ6-Τ2, τα πακέτα 2, 3 τη διαδρομή Κ1-Κ2-Κ3-Κ6-Τ2 ενώ το πακέτο 4 την Κ1-Κ5-Κ6-Τ2. Τα πακέτα μπορεί να φθάσουν με διαφορετική σειρά από αυτή που ξεκίνησαν, οπότε ο T2 πρέπει να τα τοποθετήσει στη σωστή σειρά. Τα δίκτυα με datagrams δεν διατηρούν πληροφορίες για την κατάσταση της κάθε σύνδεση γι' αυτό και η τεχνική αυτή ονομάζεται και connectionless (υπηρεσία χωρίς σύνδεση).

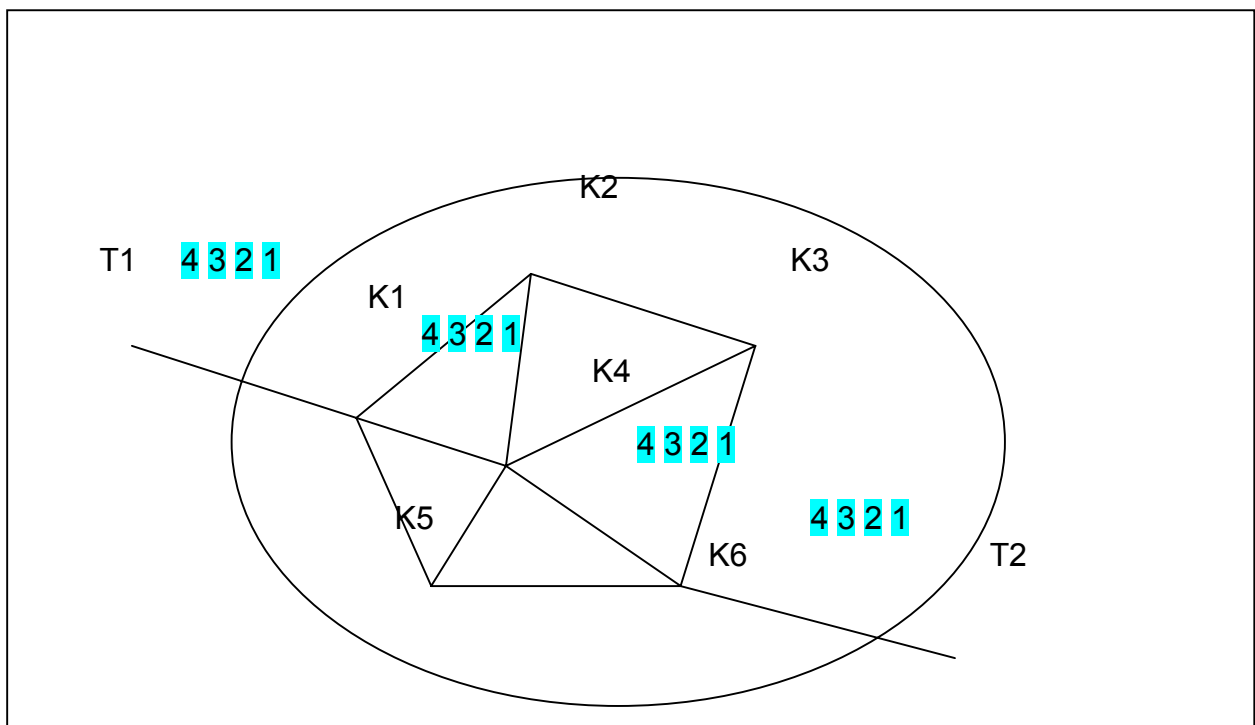
2.2.3.2 Virtual circuit

Πριν ξεκινήσει η αποστολή πακέτων, δημιουργείται μία σταθερή νοητή σύνδεση μεταξύ των δύο τερματικών σταθμών από την οποία θα περάσουν γι' αυτό και η τεχνική αυτή ονομάζεται και connection oriented (υπηρεσία με σύνδεση).

Τα πλεονεκτήματα της μεταγωγής πακέτων μέσω νοητού κυκλώματος είναι τα εξής:

- Έλεγχος ορθότητας της σειράς λήψης των πακέτων.
- Επιβεβαίωση του ότι όλα τα πακέτα παραλήφθηκαν σωστά.
- Μικρές μεταβολές του χρόνου μετάδοσης λόγω της σταθερής διαδρομής.
- Μικρότερα πακέτα καθώς δεν απαιτείται η πλήρης διεύθυνση του παραλήπτη σε κάθε πακέτο.

Δυνατότητα αμφίδρομης μετάδοσης εικόνας και ήχου



Σχήμα : Μεταγωγή πακέτου με τη χρήση της τεχνικής virtual circuit.

Το T1 θέλει να στείλει στο T2 ένα μήνυμα 4 πακέτων. Το T1 και το T2 δημιουργούν νοητή σύνδεση και επικοινωνούν συνεχώς μέσω αυτής. Κάθε πακέτο ακολουθεί τη διαδρομή T1↔K1↔K4↔K6↔T2. Λόγω της σταθερής διαδρομής παρατηρούνται μικρές μεταβολές του χρόνου απόκρισης.

2.3 Μέσο μετάδοσης – κανάλι

2.3.1 Τύποι καναλιού θεωρητική προσέγγιση

Κανάλι ή αλλιώς μέσο μετάδοσης, είναι η φυσική σύνδεση ανάμεσα σε έναν πομπό και έναν δέκτη σε οποιοδήποτε επικοινωνιακό σύστημα. Διακρίνονται σε ενσύρματα, ασύρματα και οπτικές ίνες (όπως θα δούμε στην §5). Παρουσιάζουν τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

1. Εύρος Ζώνης (bandwidth) (§ 4.2.2)
2. Εξασθένιση: Είναι η απώλεια της ισχύος του σήματος κατά τη διάδοσή του.
3. Διασπορά: Αναφέρεται στην παραμόρφωση του οπτικού παλμού ενός σήματος και οφείλεται στη διαφορετική άφιξη των συνιστωσών ενός σήματος οπτικού, στο δέκτη.
4. Θόρυβο (noise) (§ 4.2.3)
5. Διαφωνία (crosstalk): Είναι η ανεπιθύμητη επίδραση ποσοστού του σήματος μιας γραμμής σε μια άλλη γειτονική σε παράλληλη μετάδοση σήματος. Εκφράζεται με το λόγο: $\frac{\text{κύριο σήμα γραμμής}}{\text{δημιουργημένο σήμα διπλανής γραμμής}}$. Θεωρείται θόρυβος.
6. Ηχώ (echo): Είναι το φαινόμενο που παρατηρούνται ανακλάσεις και επιστροφές του σήματος σε μια τηλεφωνική γραμμή. Δημιουργείται όταν έχουμε ξαφνικές αλλαγές στην αντίσταση γραμμής.

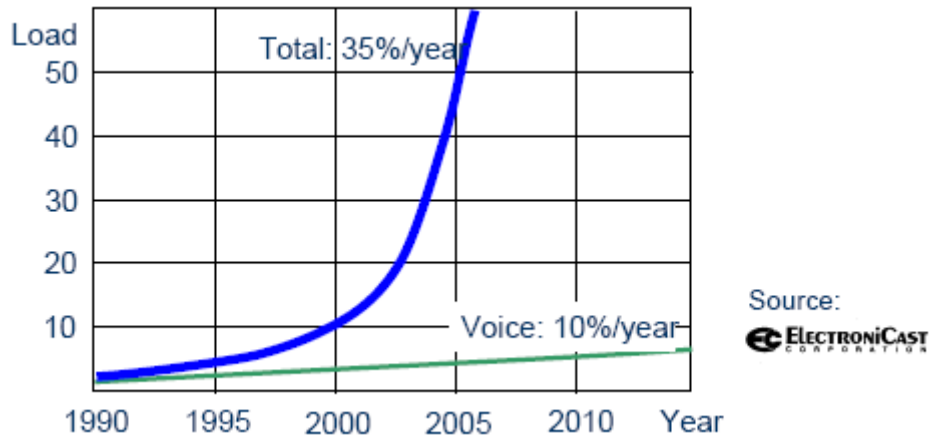
Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση διάδοσης του σήματος.

2.3.2 Εύρος ζώνης – χωρητικότητα καναλιού

Με τον όρο εύρος ζώνης συχνοτήτων (bandwidth) προσδιορίζουμε το φάσμα των συχνοτήτων που μπορούν να περάσουν ανεμπόδιστα από ένα μέσο μετάδοσης

σήματος. Το εύρος ζώνης επηρεάζει το ρυθμό μετάδοσης και άρα τον όγκο της μεταφερόμενης πληροφορίας.

Χωρητικότητα καναλιού (Channel capacity) είναι ο μέγιστος αριθμός συμβόλων που είναι δυνατό να μεταφερθούν μέσα από αυτό στη μονάδα τού χρόνου. Μετριέται σε bit/sec.



Σχήμα : Αυξητικές τάσεις εύρους ζώνης.

Ο λόγος ορισμού της χωρητικότητας καναλιού απορρέει από το παρακάτω θεώρημα του Shannon:

Θεώρημα Shannon: Αν ο ρυθμός πληροφορίας R της πηγής είναι μικρότερος ή ίσος της χωρητικότητας C του καναλιού, δηλαδή $R \leq C$, τότε υπάρχει πάντα μία τεχνική κωδικοποίησης, ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση πληροφορίας μέσα από το κανάλι με οσοδήποτε μικρή πιθανότητα σφάλματος, ανεξάρτητα αν υπάρχει ή όχι θόρυβος στο κανάλι. Αντίθετα, αν $R > C$, τότε δεν είναι δυνατή η μετάδοση μηνυμάτων χωρίς λάθη.

2.3.3 Περί Θορύβου

Θόρυβος είναι κάθε ανεπιθύμητο σήμα που επηρεάζει και παραμορφώνει το χρήσιμο σήμα πληροφορίας.. Οι κυριότερες πηγές θορύβου είναι: από ακτινοβολία άλλων μέσων μετάδοσης, από κεραίες εκπομπής, από οικιακές συσκευές, από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, από παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων καθώς και από άλλες γειτονικές πηγές. Η μέτρηση του θορύβου γίνεται σε dB και έχει αξία να γίνεται στην είσοδο του δέκτη, διότι εκεί μας ενδιαφέρει η επίδραση του στο σήμα πληροφορίας.

Decibel (dB): Στις γραμμές επικοινωνίας παρατηρείται ότι η ισχύς στη λήψη ενός δέκτη διαφέρει από την ισχύ του ιδίου σήματος κατά την εκπομπή του.



Σχήμα : Λήψη και εκπομπή σήματος.

Το decibel (dB) είναι μονάδα μέτρησης του λόγου της ισχύος των σημάτων.

Αν το ληφθέν σήμα έχει ισχύ P_1 και το εκπεμπόμενο P_2 τότε:

$$10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

και είναι σχετική μονάδα μέτρησης. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι όταν $P_2 > P_1$, ο λογάριθμος είναι θετικός εξαγόμενο του τύπου ονομάζεται ενίσχυση, ενώ αν $P_2 < P_1$, ο λογάριθμος είναι αρνητικός και το εξαγόμενο του τύπου ονομάζεται εξασθένηση.

2.3.4 Πληροφορία - εύρος ζώνης – Θόρυβος

Ο Nyquist προσδιόρισε τη χωρητικότητα:

$$C = 2 \cdot B \cdot \log_2 M$$

όπου C η χωρητικότητα του καναλιού σε bps, B το εύρος ζώνης συχνοτήτων σε Hz και M ο αριθμός των διαφορετικών καταστάσεων του σήματος.

Στην πράξη υπάρχει και θόρυβος και οι Shannon, Hartley τον συμπεριέλαβαν μέσω του

λόγου $\frac{\text{σήμα}}{\text{θόρυβος}} = \frac{S}{N}$ (Signal to Noise) στον ακόλουθο τύπο:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

όπου S η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος, N η ισχύς του θορύβου που υπάρχει στο κανάλι και B το εύρος ζώνης συχνοτήτων σε Hz. Παρ' όλα αυτά στην πραγματικότητα υπάρχουν και οι ατέλειες συσκευών και άλλες παραμορφώσεις. Ο λόγος $\frac{S}{N}$ μετριέται σε dB.

2.4 Φυσικά μέσα μετάδοσης στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Σε ένα σύστημα επικοινωνίας, ο πομπός και ο δέκτης συνδέονται με ένα φυσικό μέσο μέσα από το οποίο περνάει το σήμα. Είναι οι λεγόμενες γραμμές ή τα κανάλια επικοινωνίας. Τα μέσα μετάδοσης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ενσύρματα όπου σημαντικότερα είναι τα (συνεστραμμένα) χάλκινα και τα ομοαξονικά καλώδια
- οπτικές ίνες και
- ασύρματα όπου περιλαμβάνονται οι ραδιοεπικοινωνίες και οι μικροκυματικές επίγειες και δορυφορικές ζεύξεις

Τα ενσύρματα και οι οπτικές ίνες ονομάζονται και κατευθυντικά μέσα γιατί το σήμα πηγαίνει προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ τα ασύρματα γενικά είναι μη κατευθυντικά αφού διαχέουν το σήμα προς διάφορες κατευθύνσεις.

2.4.1 Χαρακτηριστικά των μέσων μετάδοσης

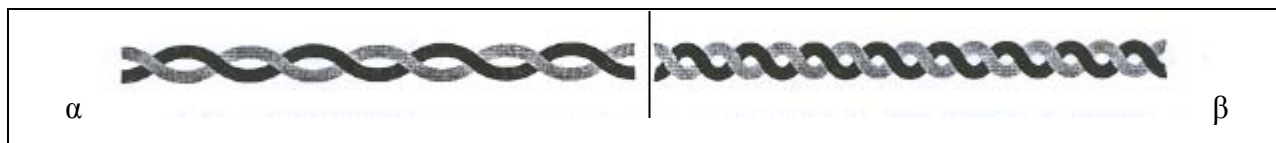
Τα μέσα μετάδοσης έχουν κάποια στοιχεία (όπως είδαμε και στην § 4.2) που τα χαρακτηρίζουν. Αυτά είναι η ασφάλεια από ανεπιθύμητες παρεμβολές και ίσως υποκλοπές, το εύρος ζώνης συχνοτήτων (bandwidth), που φανερώνει το φάσμα των συχνοτήτων που μπορούν να διέλθουν από το μέσον, και επηρεάζει άμεσα το ρυθμός μετάδοσης και τον όγκο της μεταφερόμενης πληροφορίας, το μέγιστο μήκος του μέσου μετάδοσης που εξαρτάται από τις απώλειες των σημάτων επικοινωνίας, η ευαισθησία στο θόρυβο, δηλαδή ο βαθμός επίδρασης του και η ευκολία χρήσης, αναφορικά με την εγκατάσταση, τη διασύνδεση, τον έλεγχο και η συντήρηση του μέσου

2.4.2 Ενσύρματη μετάδοση

2.4.2.1 Δισύρματα καλώδια

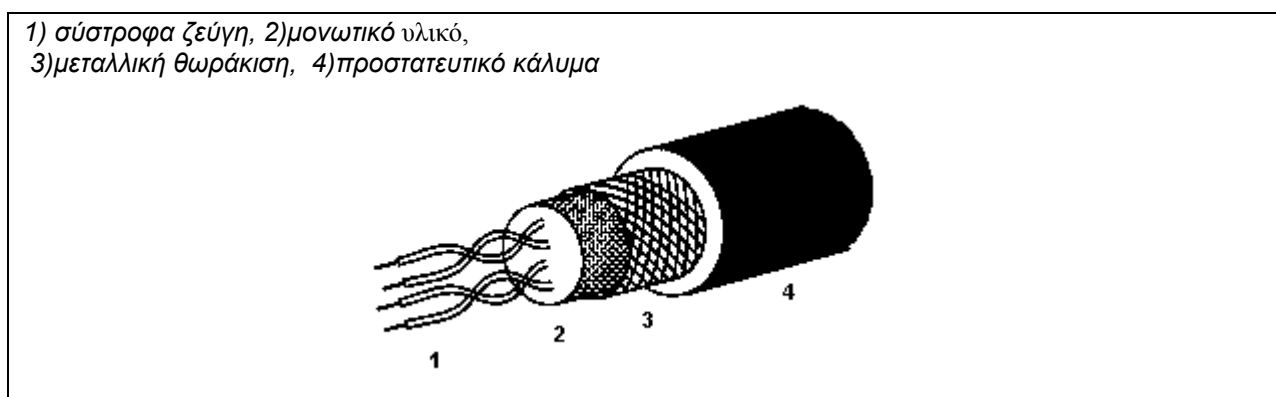
Ένα από τα παλαιότερα μέσα μετάδοσης που παραμένει ακόμα από τα πιο συνηθισμένα. Είναι τα πιο απλά αφού τα συνθέτουν δύο σύρματα μονωμένα μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται για συνδέσεις πολύ κοντινών αποστάσεων όπως υπολογιστών με περιφερειακά, Ενώ δεν είναι κατάλληλα για μακρινές αποστάσεις λόγω μεγάλης ευαισθησίας στο θόρυβο. Εξελιγμένη μορφή αυτών είναι τα συνεστραμμένα ζεύγη (twisted pair), όπου μονωμένα χάλκινα σύρματα πάχους περίπου 1 mm συστρέφονται ελικοειδώς μεταξύ τους για μεγαλύτερη αντίσταση στο θόρυβο αλλά και για τη μείωση της ακτινοβολίας που εκπέμπουν δύο παράλληλα σύρματα, επειδή αποτελούν κεραία. Με αυτά, ένα σήμα μπορεί να διανύσει αποστάσεις χιλιομέτρων και έτσι χρησιμοποιήθηκε στα τηλεφωνικά δίκτυα, αλλά για μεγαλύτερες αποστάσεις χρειάζονται

επαναλήπτες (repeaters). Το εύρος ζώνης συχνοτήτων εξαρτάται από τη διάμετρο και το μήκος και κυμαίνεται από μερικά ΚHz έως εκατοντάδες MHz. Τα σύρματα αυτά λέγονται και αθωράκιστα σύστροφα ζεύγη (UTP-Unshielded Twisted Pair)



Σχήμα- : αθωράκιστα σύστροφα ζεύγη (UTP-Unshielded Twisted Pair) α)κατηγορία 3, β) κατηγορία 5

Τα θωρακισμένα (shielded) συνεστραμμένα καλώδια είναι τα ίδια αλλά μονωμένα με εξωτερικό προστατευτικό κάλυμμα για ακόμα πιο μεγάλη αντίσταση στον θόρυβο.



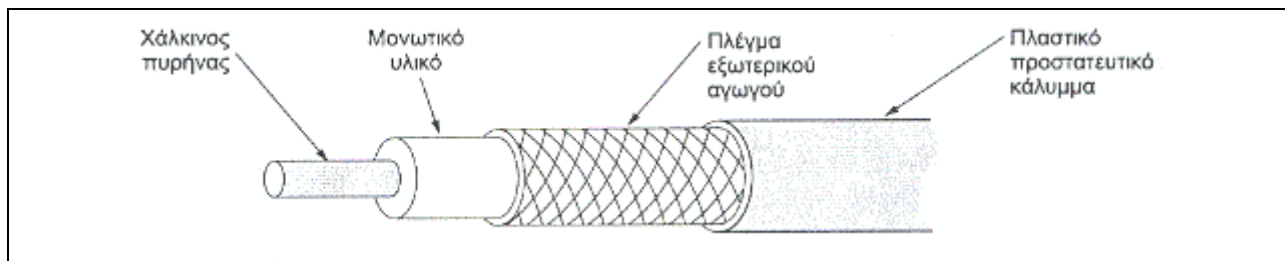
Σχήμα- : θωρακισμένα σύστροφα ζεύγη (STP-Snshielded Twisted Pair)

Μέσω των συνεστραμμένων καλωδίων μεταδίδουμε αναλογικά σήματα όπως και ψηφιακά σήματα αλλά σε μικρές αποστάσεις. Η εξασθένηση του σήματος στα συνεστραμμένα καλώδια είναι της τάξης του 1 dB ανά χιλιόμετρο. Λόγω της επαρκούς απόδοσής, της εύκολης χρήσης και του χαμηλού τους κόστους τα καλώδια σύστροφου ζεύγους χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Υπάρχουν σε πολλές ποικιλίες όπως για παράδειγμα τα καλώδια κατηγορίας 3 που αποτελούνται από δύο μονωμένα σύρματα ελαφρώς συστραμμένα μεταξύ τους εύρος ζώνης 16 MHz. Από το 1988 περίπου εμφανίστηκαν τα καλώδια σύστροφου ζεύγους κατηγορίας 5 παρόμοια με αυτά της κατηγορίας 3 αλλά με περισσότερες στροφές ανά εκατοστό και εύρος ζώνης 100 MHz, γεγονός που οδηγεί σε λιγότερες παρεμβολές και καλύτερη ποιότητα σήματος. Οι ανερχόμενες κατηγορίες 6 και 7 έχουν εύρος ζώνης 250 MHz και 600 MHz αντίστοιχα. Οι τύποι αυτοί ανήκουν στα καλώδια UTP.

Τυποποιήσεις χάλκινων καλωδίων: Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι τα συνεστραμμένα χάλκινα καλώδια χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα. Επειδή υπάρχουν πολλοί τύποι καλωδίων, για να αποφευχθεί η διαφοροποίηση ξεχωριστών τύπων για τον ίδιο σκοπό καθιερώθηκαν τυποποιήσεις κυρίως από την EIA/TIA - Electronic/Telecommunication Industry Association.

2.4.2.2 Ομοαξονικά καλώδια - κυματοδηγοί

Τα ομοαξονικά καλώδια (coaxial cable) που ονομάζονται έτσι λόγω κατασκευής τους, αποτελούν και αυτά συνηθισμένο μέσο μετάδοσης. Χρησιμοποιούνται αντί των συνεστραμμένων για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί με την απόσταση μετάδοσης και την ταχύτητα επικοινωνίας αλλά και γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στην επικοινωνία. Αποτελείται από έναν πυρήνα άκαμπτου χάλκινου καλωδίου, ο οποίος περιβάλλεται από ένα μονωτικό υλικό. Ο μονωτής καλύπτεται από έναν κυλινδρικό αγωγό με μορφή πυκνού δικτυωτού πλέγματος και ο εξωτερικός αγωγός καλύπτεται από πλαστικό προστατευτικό περίβλημα. Έχουν διάμετρο 0,6-2 cm και προσφέρουν υψηλό εύρος ζώνης συχνοτήτων που φτάνει τα 1 GHz. Χρησιμοποιούνται στην καλωδιακή τηλεόραση, σε τοπικά δίκτυα υπολογιστών ή σε κομβικές συνδέσεις του τηλεφωνικού συστήματος. Μεταδίδουν και αναλογικό και ψηφιακό σήμα και για μεγάλες αποστάσεις παρεμβάλλονται αναμεταδότες. Δύο τύποι ομοαξονικού καλωδίου χρησιμοποιούνται ευρέως, το καλώδιο των 50 Ohm συνήθως προορίζεται από την αρχή για ψηφιακή μετάδοση και το καλώδιο των 75 Ohm συνήθως για αναλογική μετάδοση στην καλωδιακή τηλεόραση και για πρόσβαση στο Internet.



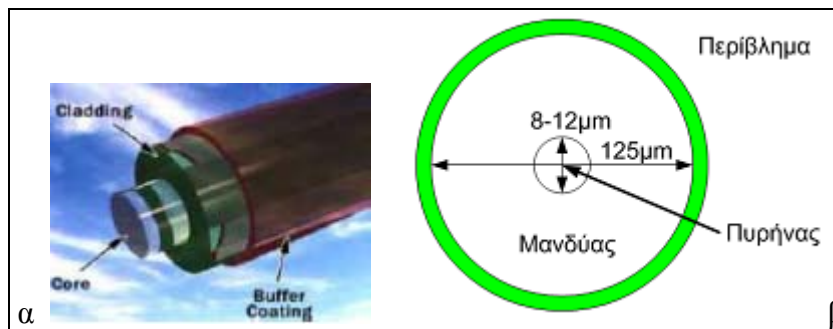
Σχήμα- : Σύνθεση ομοαξονικού καλωδίου

(Πηγή: Tanenbaum A.S. Δίκτυα Υπολογιστών, εκδόσεις Κλειδάριθμος 4^η έκδοση 2003)

2.4.3 Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες (fiber optic) είναι η καλύτερη λύση στα μέσα μετάδοσης όπου το φως είναι ο φορέας της πληροφορίας αντί του ρεύματος ή της τάσης που χρησιμοποιούνται στα ενσύρματα μέσα. Αποτελούνται από τρεις ομόκεντρες κυλινδρικές οντότητες: Στο κέντρο βρίσκεται ένας γυάλινος πυρήνας, η κεντρική ίνα (core) μέσω του οποίου διαδίδεται το φως και έχει περίπου το πάχος μιας ανθρώπινης τρίχας. Ο πυρήνας περικλείεται από μια γυάλινη επικάλυψη, το μανδύα (cladding) και στη συνέχεια υπάρχει ένα λεπτό πλαστικό κάλυμμα (buffer) για προστασία του μανδύα. Οι οπτικές ίνες συνήθως ομαδοποιούνται σε δέσμες οι οποίες προστατεύονται από τα

εξωτερικό περίβλημα. Η φωτεινή δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία, μεταδίδεται μέσω της κεντρικής ίνας (core) και διαδίδεται με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας προς το άλλο άκρο.



Σχήμα- : καλώδιο οπτικής ίνας α) πλάγια όψη, β)σε τομή

Αντίθετα με τα χάλκινα καλώδια, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της ίνας τόσο μεγαλύτερη η απόσταση διάδοσης του σήματος. Στο τέρμα της οπτικής ίνας βρίσκεται ένας φωτοδέκτης που ανιχνεύει την έλευση του φωτός.

Οι οπτικές ίνες διασυνδέονται με τρεις τρόπους: Μπορεί να τερματίζονται με συζευκτήρες και να συνδέονται σε υποδοχές οπτικών ινών ή να συγκολλούνται μηχανικά, δηλαδή τα εξαρτήματα μηχανικής συγκόλλησης τοποθετούν τα δύο προσεκτικά κομμένα άκρα το ένα δίπλα στο άλλο μέσα σε ένα ειδικό κάλυμμα και τα σφίγγουν στη σωστή θέση ή δύο τμήματα οπτικής ίνας μπορούν να τηχθούν έτσι ώστε να σχηματίσουν μια συμπαγή σύνδεση που είναι σχεδόν το ίδιο καλή με μια μονοκόμματη οπτική ίνα.

Στα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι το μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης της τάξης 5 Gbps, είναι ανεπηρέαστες από θόρυβο, ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων (error rate) είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από άλλους αντίστοιχους αγωγούς, είναι αρκετά ασφαλείς και προξενούν μικρότερη εξασθένηση στα σήματα από ότι τα χάλκινα και τα ομοαξονικά καλώδια (επιτυγχάνονται αποστάσεις χωρίς αναμεταδότη, άνω των 300 χιλιομέτρων).

Μειονεκτήματα θεωρούνται η δυσκολία στον τρόπο σύνδεσης σε πομπό και δέκτη και η δυσκολία σύνδεσης πολλών χρηστών πάνω σε ένα καλώδιο.

Τα συστήματα καλωδίωσης με οπτικές χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις μακρινών αποστάσεων, σε βιομηχανικές περιοχές με υψηλό επίπεδο ηλεκτρομαγνητικών θορύβων, σε τοπικά δίκτυα για επικοινωνίες data μεγάλων ταχυτήτων, σε αστικά δίκτυα (Metropolitan Area Network) και για μεταδόσεις υψηλών απαιτήσεων ασφάλειας κρατικών υπηρεσιών.

2.4.4 Παράγοντες απωλειών και περιορισμού του εύρους ζώνης στις οπτικές ίνες

Έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε τους παράγοντες που σχετίζονται με το εύρος ζώνης της οπτικής ίνας και την εξασθένιση που επιφέρει στο οπτικό σήμα. Το εύρος ζώνης συσχετίζεται άμεσα με το ρυθμό πληροφορίας που μπορούμε να μεταδώσουμε μέσω της ίνας, ενώ η εξασθένιση καθορίζει τον αριθμό επαναληπτών-ενισχυτών που θα τοποθετηθούν μεταξύ πομπού και δέκτη σε μια οπτική ζεύξη. Η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των διατάξεων έχει μεγάλη επίδραση στο ολικό κόστος του συστήματος.

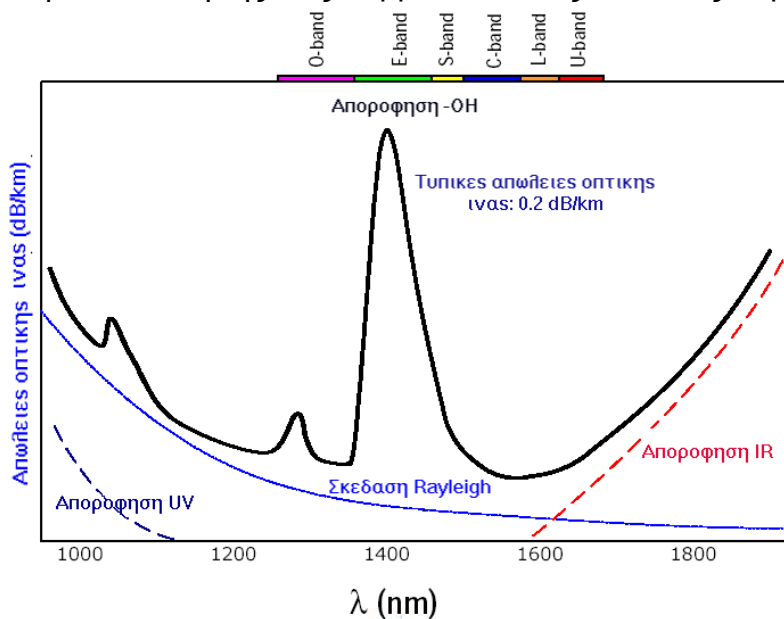
2.4.4.1 Εξασθένιση

Η εξασθένιση σήματος (ή απώλεια σήματος) σε μια οπτική ίνα ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής ισχύος στην έξοδο της σε σχέση με τη ισχύ εισόδου και εκφράζεται σε dB/km. Αν για παράδειγμα μια οπτική ίνα έχει απώλειες 3 dB/km, τότε η ισχύς του σήματος μειώνεται κατά 50% σε απόσταση 1km.

Η εξασθένιση σε μια οπτική ίνα οφείλεται κυρίως σε δύο μηχανισμούς:

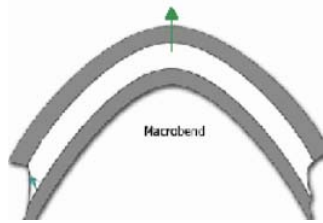
I. Απορρόφηση (absorption). Τα ηλεκτρόνια ξένων προσμείξεων που υπάρχουν στο γυαλί της ίνας απορροφούν μέρος της μεταδιδόμενης οπτικής ισχύος. Ιδιαίτερα τα ιόντα OH^- , ευθύνονται για τις μεγάλες απώλειες των οπτικών ινών. Απώλειες απορρόφησης έχουμε ακόμα στην περιοχή του υπεριώδους λόγω του ίδιου του υλικού της ίνας και στο υπέρυθρο λόγω αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα ταλαντούμενα μόρια του πλέγματος του γυαλιού. Επίσης άλλοι εξωγενείς παράγοντες όπως ξένες προσμίξεις, ανομοιογένειες στη κατασκευή της ίνας συμβάλλουν στις απώλειες λόγω απορρόφησης.

$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10} (P_1 / P_0)$
0 dB = 1
+ 0.1 dB = 1.023
+ 3 dB = 2
+ 5 dB = 3
+ 10 dB = 10
-3 dB = 0.5
-10 dB = 0.1
-20 dB = 0.01
-30 dB = 0.001
$\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10} (P / 1 \text{ mW})$
0 dBm = 1 mW
3 dBm = 2 mW
5 dBm = 3 mW
10 dBm = 10 mW
20 dBm = 100 mW
-3 dBm = 0.5 mW
-10 dBm = 100 μW
-30 dBm = 1 μW
-60 dBm = 1 nW



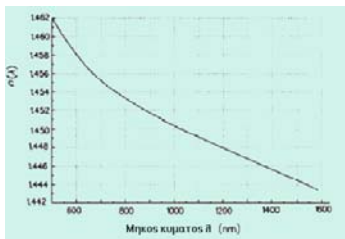
Σχήμα 2.1 Η ολική εξασθένιση σε μια τυπική οπτική ίνα. Διακρίνονται οι κορυφές που οφείλονται στη ύπαρξη των ιόντων OH^- .

II. Σκέδαση (Scattering). Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζουμε τη διάχυση που υφίσταται η φωτεινή ακτινοβολία στο μανδύα καθώς διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας. Οφείλεται σε ανωμαλίες στη σύνθεση του υλικού της ίνας, με μέγεθος μικρότερο από το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος λ . Η προκαλούμενη εξασθένηση είναι ανάλογη του λ^4 , κυριαρχεί στα μικρά μήκη κύματος και είναι γνωστή και ως σκέδαση Rayleigh. Στο βλέπουμε την εξάρτηση των απωλειών μιας τυπικής οπτικής ίνας σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και με τους μηχανισμούς που τις προκαλούν. Φαίνονται οι περιοχές (O-band, S,C,L,U-band) γύρω από τα μήκη κύματος 1.3 μm και 1.5 μm , όπου η οπτική ίνα παρουσιάζει μικρή εξασθένηση. Οι περιοχές αυτές, γνωστές και σαν “φασματικά παράθυρα” των οπτικών επικοινωνιών χρησιμοποιούνται για την οπτική μετάδοση.



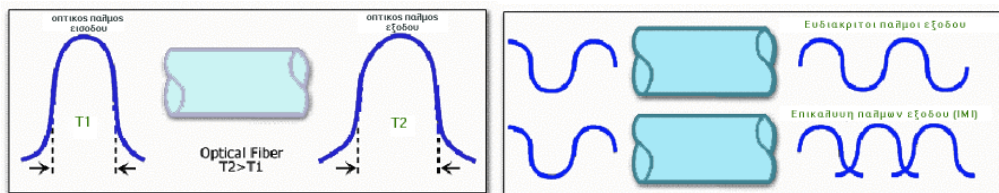
Δεν Διακρίνεται βέβαια το “ιστορικό” παράθυρο των 0.8 μm που χρησιμοποιήθηκε αρχικά. Τα παράθυρα των 1.3 μm με εύρος περίπου 12 THz και των 1.55 μm με εύρος περίπου 15 THz, χρησιμοποιούνται πλέον στα σημερινά συστήματα, αφού η τεχνολογία επέτρεψε την κατασκευή κατάλληλων φωτοπηγών και φωτοφωρατών.

Οι μακροσκοπικές (macro bending) και οι μικροσκοπικές (micro bending) κάμψεις της οπτικής ίνας αποτελούν εξωγενή αίτια απωλειών.



2.4.4.2 Διασπορά και διεύρυνση οπτικών παλμών

Η τιμή του δείκτη διάθλασης μειώνεται όσο το μήκος κύματος αυξάνει. Η ταχύτητα διάδοσης είναι συνάρτηση του δείκτη διάθλασης και επομένως του μήκους κύματος. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται με τον όρο *διασπορά* (dispersion) και έχει σαν αποτέλεσμα τη παραμόρφωση των φωτεινών παλμών που διαδίδονται στην ίνα διότι η οπτική ισχύς κατανέμεται σε μια περιοχή μηκών κύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διαπλάτυνση του οπτικού παλμού και τον περιορισμό του εύρους ζώνης ενός οπτικού συστήματος λόγω αλληλοπαρεμβολής συμβόλων (ISI – Inter Symbol Interference). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα και οφείλεται στους μηχανισμούς που αναλύονται στα επόμενα.



Σχήμα 2.2 Το φαινόμενο της διασποράς στις οπτικές ίνες

2.4.4.3 Διασπορά τρόπων (modal dispersion).

Η ισχύς ενός παλμού, καθώς αυτός κυματοδηγείται σε οπτική ίνα με σταθερούς δείκτες διάθλασης, διαμοιράζεται ανάλογα με τις διαστάσεις του πυρήνα της σε περισσότερους από έναν τρόπους. Η ταχύτητα διάδοσης όμως κάθε τρόπου είναι διαφορετική, με αποτέλεσμα ο φωτεινός παλμός στην έξοδο της ίνας να διαπλάτνεται. Για μια ίνα

μήκους L με σταθερό δείκτη διάθλασης πυρήνα (βηματικού δ.δ. – Step Index) η διαπλάτυση $\Delta\tau_{m(SI)}$ αποδεικνύεται ότι δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{m(SI)} = n_c \frac{L}{c} \Delta \quad (0.1\alpha)$$

Το πρόβλημα μετριάζεται με τη χρήση οπτικής ίνας, στην οποία ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι σταθερός αλλά μειώνεται ακτινικά μέχρι το μανδύα (ίνα διαβαθμισμένου δ.δ. – graded index). Με αυτό τον τρόπο σχεδόν εξισώνεται ο χρόνος διάδοσης των διαφόρων τρόπων. Για μια τέτοια ίνα η διαπλάτυση $\Delta\tau_{m(GI)}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{m(GI)} = n_c^2 \frac{L}{c} \Delta^2$$

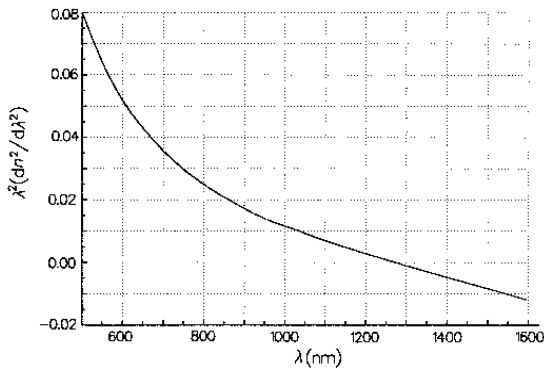
Η διασπορά τρόπων εξαλείφεται πλήρως με τη χρήση οπτικών ινών που μπορούν να διαδώσουν μόνο ένα τρόπο (*μονότροπες ίνες*). Χαρακτηριστικό τους είναι η πολύ μικρή διάμετρος του πυρήνα. Σε αυτή τη περίπτωση η διασπορά τρόπων εξαλείφεται πλήρως με αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους ζώνης. Οι μονότροπες ίνες είναι βέβαια ακριβότερες και εμφανίζουν δυσκολίες στη σύζευξή τους με τις οπτικές πηγές.

2.4.4.4 Χρωματική διασπορά.

Σε μια οπτική ίνα ακόμη και αν χρησιμοποιείται μόνο ο βασικός τρόπος διάδοσης, η ισχύς του οπτικού σήματος κατανέμεται σε μια μικρή περιοχή μηκών κύματος αφενός επειδή η οπτική πηγή δεν είναι μονοχρωματική αφετέρου λόγω της διαδικασίας της διαμόρφωσης. Όμως, διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται στην ίνα με διαφορετικές ταχύτητες. Τα μεγαλύτερα μήκη κύματος κινούνται ταχύτερα από τα μικρότερα με αποτέλεσμα τη διαπλάτυση του διαδιδόμενου σήματος. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί τη *διασπορά υλικού (Material Dispersion)* και είναι ο σημαντικότερος παράγοντας περιορισμού του ρυθμού σηματοδότησης R_b σε μια οπτική ίνα μήκους L , αφού η διεύρυνση των παλμών του σήματος συνεπάγεται αύξηση του ISI και της δυσκολίας στο δέκτη να ξεχωρίσει τους λαμβανόμενους παλμούς. Ένα μέτρο της διαπλάτυσης των παλμών $\Delta\tau_{mat}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{mat} = -\frac{L}{c} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \left(\lambda^2 \frac{d^2 n_c}{d\lambda^2} \right) \quad (0.2)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος εκπομπής και $\Delta\lambda$ το φασματικό εύρος της οπτικής πηγής (ή εύρος γραμμής). Ο όρος μέσα στην παρένθεση είναι η δεύτερη παράγωγος του δείκτη διάθλασης του πυρήνα ως προς το μήκος κύματος και χαρακτηρίζει την διασπορά του υλικού της οπτικής ίνας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση αυτής της παραμέτρου από το μήκος κύματος για μια τυπική ίνα. Υπάρχει μια περιοχή μηκών κύματος γύρω στα 1.3 μm όπου η χρωματική διασπορά μηδενίζεται. Συνεπώς το μήκος



κύματος αυτό, είναι κατάλληλο με χρήση μονότροπης ίνας για τη μετάδοση υψηλών ρυθμών πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις. Για μήκη κύματος μικρότερα από 1.3 μm η διαφορική χρονική καθυστέρηση $\Delta\tau_{mat}$ έχει αρνητικό πρόσημο, που σημαίνει ότι η διεύρυνση των παλμών οφείλεται στο ότι τα μεγαλύτερα μήκη κύματος διαδίδονται πιο

γρήγορα από τα μικρότερα (ομαλή διασπορά). Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1.3 μm το πρόσημο της $\Delta\tau_{mat}$ είναι θετικό, που σημαίνει ότι τώρα τα μικρότερα μήκη κύματος «φαίνεται» να διαδίδονται πιο γρήγορα από τα μεγαλύτερα (ανώμαλη διασπορά).

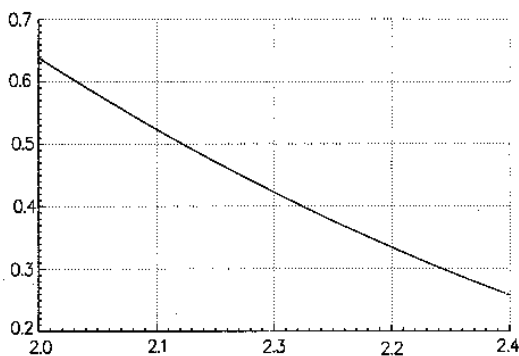
Ακόμη και στην περίπτωση μονότροπης ίνας ο μοναδικός διαδιδόμενος τρόπος συμπεριφέρεται ως εξής: Στα μικρά μήκη κύματος περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό μέσα στον πυρήνα, στα μεσαία μήκη κύματος διαχέεται ελαφρά μέσα στο μανδύα ενώ στα μεγάλα μήκη κύματος διαχέεται σε μεγάλο βαθμό στο μανδύα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου διάδοσης καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται, αφού ο ενεργός δείκτης διάθλασης της ίνας n_{eff} θα μεταβάλλεται αντιστοίχως παίρνοντας τιμές από την n_c του πυρήνα έως την n_g του μανδύα ($n_g < n_{eff} < n_c$). Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως *διασπορά κυματοδηγού*. Εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας και το μήκος κύματος και έχει ως αποτέλεσμα την διαπλάτυνση του διαδιδόμενου σήματος λόγω της διαφορικής χρονικής καθυστέρησης $\Delta\tau_{wg}$ των μηκών κύματος. Ένα μέτρο λοιπόν αυτής της διαπλάτυνσης που οφείλεται στη διασπορά κυματοδηγού, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_{wg} = -n_g \Delta \frac{L \Delta\lambda}{c \lambda} V_D \quad (0.3)$$

Όπου V_D είναι η χαρακτηριστική παράμετρος διασποράς κυματοδηγού. Η εξάρτηση της από την κανονικοποιημένη συχνότητα για οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στην πράξη, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.4

Η *διασπορά κυματοδηγού* συμβάλλει στη χρωματική διασπορά. Καθώς όμως εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας μπορεί να πάρει ελεγχόμενες τιμές με την κατάλληλη σχεδίαση και μπορεί να αντισταθμίσει την χρωματική διασπορά.

Το πρόβλημα της διασποράς εξαλείφεται πλήρως αν χρησιμοποιηθεί οπτική πηγή που να εκπέμπει σε ένα μόνο μήκος κύματος. Αυστηρά μονοχρωματικές πηγές βέβαια δεν υπάρχουν. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτεινές πηγές εκπέμπουν σε ένα *φασματικό εύρος* $\Delta\lambda$ από 1 έως 10 nm. Σήμερα κατασκευάζονται πηγές με ακόμη μικρότερο εύρος και με αμελητέα χρωματική διασπορά, ωστόσο είναι πολύ ακριβές και χρησιμοποιούνται μόνο σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον ακόμη και μονοχρωματική πηγή να υπήρχε μια



Σχήμα 2.3 Η παράμετρος διασποράς κυματοδηγού σε μια τυπική οπτική ίνα

υπάρχουν. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες φωτεινές πηγές εκπέμπουν σε ένα *φασματικό εύρος* $\Delta\lambda$ από 1 έως 10 nm. Σήμερα κατασκευάζονται πηγές με ακόμη μικρότερο εύρος και με αμελητέα χρωματική διασπορά, ωστόσο είναι πολύ ακριβές και χρησιμοποιούνται μόνο σε ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων. Επιπλέον ακόμη και μονοχρωματική πηγή να υπήρχε μια

διεύρυνση του φασματικού εύρους της είναι αναπόφευκτη λόγω της διαμόρφωσης που πρέπει να εφαρμοστεί για την μεταφορά του σήματος πληροφορίας.

Οι κατασκευαστές για να συνδυάσουν τη χαμηλή διασπορά στα 1.3 μm και τη μικρή εξασθένηση στα 1.55 μm έχουν αναπτύξει νέους τύπους οπτικής ίνας. Με προθήκη προσμείξεων στο γυαλί του πυρήνα κατασκευάζονται ίνες που παρουσιάζουν μειωμένη χρωματική διασπορά στο διάστημα μηκών κύματος 1.3 μm – 1.6 μm (ίνες πεπλατυσμένης διασποράς).

Επίσης με ειδική σχεδίαση της κατανομής του δείκτη διάθλασης του πυρήνα έχουν αναπτυχθεί ίνες, των οποίων η χρωματική διασπορά είναι μηδενική στο μήκος κύματος των 1.55 μm (ίνες μετατοπισμένης διασποράς,).

Το ποσοστό διεύρυνσης των οπτικών παλμών εξαρτάται από την αρχική τους χρονική διάρκεια. Παλμοί με μικρή διάρκεια (υψηλός ρυθμός μετάδοσης), έχουν μεγάλο εύρος ζώνης και επομένως η διασπορά θα κάνει πιο έντονη την παρουσία της. Επομένως η σημασία του φαινομένου γίνεται εντονότερη όσο αυξάνει ο ρυθμός του οπτικού σήματος.

Η συνολική διεύρυνση ενός οπτικού παλμού λόγω της χρωματικής και της διασποράς κυματοδηγού $\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$ συνήθως εκφράζεται με τη βοήθεια του *συντελεστή χρωματικής διασποράς* D_λ . Αν $\Delta\lambda$ [nm] το φασματικό εύρος της οπτικής πηγής και L [km] το μήκος της ζεύξης, τότε η διεύρυνση του οπτικού παλμού $\Delta\tau$ [ps] δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau = D_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

Στην περίπτωση που η πηγή είναι σχεδόν μονοχρωματική ($\Delta\lambda \rightarrow 0$) η διεύρυνση του οπτικού παλμού οφείλεται στη διαμόρφωση της πηγής και το $\Delta\tau$ [ps] δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau = \lambda \sqrt{\frac{|D_{chr}| L}{2\pi c}}$$

όπου λ το μήκος κύματος και c ($= 3 \cdot 10^8$ nm/ps) η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Ο συντελεστής διασποράς D_λ εξαρτάται από το μήκος κύματος και τον τύπο της οπτικής ίνας. Τυπικές τιμές για μια συνήθη μονότροπη ίνα (SMF) είναι $D_{chr} = 0$ {ps/nmKkm] για $\lambda=1.3$ μm και $D_\lambda = 17$ [ps/nmkm] για $\lambda = 1.55$ μm.

Από τις πιο πάνω σχέσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο μέγιστος ρυθμός R_{bmax} [bps] που μπορεί να υποστηριχθεί από μια οπτική ζεύξη, με δεδομένο το συντελεστή διασποράς της χρησιμοποιούμενης ίνας. Θεωρώντας ότι για αξιόπιστη μετάδοση, η διαπλάτυνση των παλμών δεν πρέπει να ξεπεράσει ένα ποσοστό ε της περιόδου bit T_b (ή της διάρκεια του bit) της αποσπελλόμενης πληροφορίας, θα ισχύει:

$$\Delta\tau \leq \varepsilon T_b = \varepsilon \frac{1}{R_b}$$

όπου R_b [bps] ο ρυθμός μετάδοσης και $\varepsilon = 0.25$ στην πράξη. Μεγαλύτερες τιμές του ε , σημαίνει ότι για μια ίνα με συγκεκριμένο μήκος και συντελεστή χρωματικής διασποράς

είναι δυνατόν να επιτευχθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί, αρκεί να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής (π.χ. $\epsilon = 0.306$ ή $\epsilon = 0.491^1$).

Παράδειγμα: Δίνεται πολύτροπη ίνα με συντελεστή διασποράς $D_\lambda = -15 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ και δείκτη διάθλασης $n_c = 1.48$ και $n_g = 1.47$. Να βρεθεί το μέγιστο μήκος ζεύξης για μετάδοση $R_b = 100 \text{ Mb/s}$. Δίνεται το φασματικό εύρος της πηγής $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$. Να εξεταστούν και οι δύο περιπτώσεις του προφίλ του δείκτη διάθλασης. Θεωρήστε ότι στη ζεύξη με το μεγαλύτερο μήκος η ίνα αντικαθίσταται από μονότροπη με $D_\lambda = -20 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ ζεύξη και η πηγή εκπομπής με μονοχρωματικό laser ($\Delta\lambda \approx 0 \text{ nm}$) στα 1550 nm . Ποιος θα είναι ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής R_b αν υποθεθεί διαμόρφωση με εύρος ζώνης $BW = 2R_b$

Έστω $\Delta\tau_L$ η διαπλάτυνση των παλμών ανά km. Στη πρώτη περίπτωση που χρησιμοποιείται πολύτροπη ίνα η διαπλάτυνση οφείλεται και στη διασπορά πολλών τρόπων αλλά και στη χρωματική διασπορά και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\tau_L = \sqrt{\left(\frac{\Delta\tau_m}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau}{L}\right)^2}$$

Η σχέση αυτή για step index πολύτροπη ίνα (SI) με τη βοήθεια των (2.7α) και (2.10β) γράφεται:

$$\Delta\tau_L = \sqrt{\left(\frac{n_c \Delta}{c}\right)^2 + (D_\lambda \Delta\lambda)^2}$$

επειδή $\Delta\tau_{L(SI)} = \frac{n_c \Delta}{c} = 33.3 \cdot 10^3 \text{ ps/km}$ και $D_\lambda \Delta\lambda = 150 \text{ ps/km}$ η επίδραση της χρωματικής διασποράς αγνοείται. Δηλαδή $\Delta\tau_L = \Delta\tau_{L(SI)}$, οπότε από τη σχέση (2.11) προκύπτει ότι για τη step index ίνα το μέγιστο μήκος ζεύξης για ρυθμό R_b θα είναι:

$$L = \frac{0.25}{R_b \Delta\tau_L}$$

για $R_b = 100 \text{ Mbps}$ θα είναι $L = \frac{0.25}{100 \cdot 10^6 \cdot 33.3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12}} \text{ km}$ ή $L = 0.075 \text{ km}$

Από τη σχέση (2.7β) επειδή $\Delta\tau_{L(GI)} = \frac{n_c^2 \Delta^2}{2c} = 166.5 \text{ ps/km}$ για τη graded index ίνα η επίδραση της χρωματικής διασποράς είναι συγκρίσιμη με αυτή της διασποράς τρόπων και λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με τη σχέση (2.12). Συνεπώς $\Delta\tau_L = 224 \text{ ps/km}$ και για αυτήν την ίνα η μέγιστη απόσταση θα είναι $L = 11.2 \text{ km}$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μονότροπη ίνα και μονοχρωματική πηγή θα υπολόγιζε κανείς ρυθμό μετάδοσης άπειρο όπως προκύπτει με εφαρμογή της σχέσης (2.10α) για οποιοδήποτε L . Θεωρούμε πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η πηγή παρότι είναι μονοχρωματική «αποκτά» τελικά φασματικό εύρος $\Delta\lambda$ που οφείλεται στη διαμόρφωση. Επειδή ισχύει:

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{c}{f^2} \Delta f \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} BW \Rightarrow \Delta\lambda = 2 \frac{\lambda^2}{c} R_b$$

οπότε από τις σχέσεις (2.10α) και τη (2.11) προκύπτει: $R_b \leq \frac{0.25}{\lambda} \sqrt{\frac{c}{2D_\lambda L}}$

Οπότε για απόσταση $L = 11.2 \text{ km}$ ο μέγιστος ρυθμός υπολογίζεται ως: $R_b = 5.9 \text{ Gbps}$

¹ Η σχέση αυτή εξασφαλίζει πως η χρωματική διασπορά προκαλεί επιβάρυνση ισχύος (power penalty) ίση με 1dB ή 2 dB αντίστοιχα. Δείτε σχετικά το "Optical Networks a Practical Perspective" των R. Ramaswami και K. N. Sivarajan.

2.4.4.5 Διασπορά τρόπου πόλωσης (Polarization Mode Dispersion – PMD)

Η διασπορά τρόπου πόλωσης (Polarization Mode Dispersion – PMD) οφείλεται στο γεγονός ότι ο πυρήνας της ίνας είναι ελλειπτικός κι επομένως διαφορετικές πολώσεις διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες. Επιπλέον, η κατανομή της ενέργειας του οπτικού σήματος στις διάφορες καταστάσεις πόλωσης (State Of Polarizations – SOPs) αλλάζει αργά με το χρόνο, για παράδειγμα λόγω της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Τέλος, η PMD είναι δυνατόν να προκύψει και λόγω της εξάρτησης από την πόλωση της λειτουργίας των διαφόρων δομικών στοιχείων του δικτύου.

Η μέση τιμή $\langle \Delta\tau \rangle$ της διαπλάτυνσης ενός οπτικού παλμού λόγω των διαφορετικών χρόνων διάδοσης (differential time delay) των SOPs σε μια ζεύξη δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \Delta\tau \rangle = D_{PMD} \sqrt{L}$$

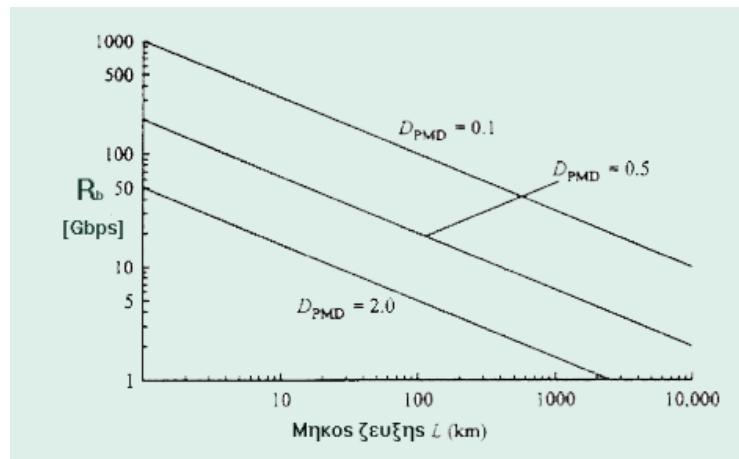
όπου L [km] το μήκος της ζεύξης και D_{PMD} [$\frac{ps}{\sqrt{km}}$] ο συντελεστής διασποράς PMD της ίνας. Η τιμή του

συντελεστή D_{PMD} για τυπικές ίνες κυμαίνεται από 0.5 έως και $2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$, ενώ νέες ζεύξεις παρουσιάζουν

τιμές έως και $0.1 \frac{ps}{\sqrt{km}}$.

Για αξιόπιστη μετάδοση και λόγω του στατιστικού χαρακτήρα της PMD, η αντίστοιχη διαπλάτυνση των οπτικών παλμών δεν πρέπει να ξεπεράσει το 10% της διάρκειας του bit T_b .

$$\langle \Delta\tau \rangle \leq D_{PMD} \sqrt{L} < 0.1 T_b$$



Σχήμα 0.4 Εφικτοί ρυθμοί μετάδοσης και της απόστασης λόγω της PMD

Η σχέση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10 για διάφορους ρυθμούς και αποστάσεις. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μια κακής ποιότητας ίνα με $D_{PMD} = 2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$, το μέγιστο μήκος ζεύξης για μετάδοση στα 10 Gbps είναι μόλις 25 km. Αυτή βέβαια είναι μια ακραία περίπτωση αλλά ενδεικτική για το πως η διασπορά τρόπου πόλωσης PMD μπορεί να αποτελέσει σημαντικό περιοριστικό παράγοντα.

2.4.5 Είδη οπτικών ινών και οπτικά καλώδια

Οι οπτικές ίνες ταξινομούνται σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

- ◆ Προφίλ του δείκτη διάθλασης του πυρήνα
- ◆ Υλικό πυρήνα και περιβλήματος
- ◆ Τρόπος διάδοσης του φωτός
- ◆ Χαρακτηριστικά της διάδοσης

2.4.5.1 Τύποι οπτικών ινών

Από τα προηγούμενα συνάγεται ότι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα μπορεί να είναι σταθερός, οπότε μιλάμε για ίνες *βηματικού δείκτη (step index)* ή να μεταβάλλεται ακτινικά, οπότε έχουμε ίνες *διαβαθμισμένου δείκτη (graded index)*. Ανάλογα με τον αριθμό των τρόπων που μπορούν να διαδοθούν στην ίνα έχουμε τις *μονότροπες* (διάδοση ενός μόνο τρόπου) και τις *πολύτροπες* (διάδοση πολλών τρόπων) ίνες. Γνώρισμα των μονότροπων ινών είναι οι πολύ μικρές διαστάσεις της διαμέτρου του πυρήνα (~ 5 - 8 μm), τα πολύ καλά χαρακτηριστικά διάδοσης αλλά και το μεγάλο κόστος και η δυσκολία χειρισμού τους.

Για την κατασκευή του πυρήνα και του μανδύα χρησιμοποιούνται πυριτύαλος και πλαστικό. Έτσι υπάρχουν οι ίνες silica (μανδύας και πυρήνας από γυαλί), οι ίνες PCS (μανδύας από γυαλί και πυρήνας από πλαστικό) και από το 1980 και μετά οι πλαστικές ίνες (μανδύας και πυρήνας από πλαστικό) που χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις μικρών αποστάσεων λόγω της εύκολης σύνδεσής τους με τα ενεργά στοιχεία του οπτικού συστήματος. Οι μονότροπες ίνες είναι πάντα τύπου silica, βηματικού δείκτη. Είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται πλέον στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων αποκλειστικά.

2.4.5.2 Τύποι μονότροπων οπτικών ινών

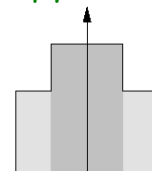
Η εξέλιξη των μονότροπων οπτικών ινών διήρκεσε αρκετές δεκαετίες. Οι τρεις κυρίαρχοι τύποι και οι προδιαγραφές τους σύμφωνα με την ITU-T είναι:

- Η ίνα *μη μετατοπισμένης διασποράς* (Non Dispersion Sifted Fiber NDSF), G.652
- Η ίνα *μετατοπισμένης διασποράς* (Dispersion-Shifted Fiber – DSF), G.653
- Η ίνα *μη μηδενικής μετατοπισμένης διασποράς* (Non Zero Dispersion Sifted Fiber NZ-DSF), G.655

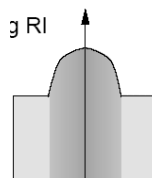
Υπάρχουν τρία οπτικά παράθυρα στην περιοχή του υπέρυθρου που αξιοποιούνται για μετάδοση με οπτικές ίνες. Το πρώτο παράθυρο, στην περιοχή των 850 nm, χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε ζεύξεις μικρών αποστάσεων με πολύτροπες ίνες. Οι ίνες μη μετατοπισμένης διασποράς NDSF, είναι απλές μονότροπες ίνες (Single Mode – SMF), και χρησιμοποιούνται στο δεύτερο οπτικό παράθυρο, στην περιοχή των 1310 nm. Σε αυτό το μήκος κύματος η χρωματική διασπορά είναι σχεδόν μηδενική.

Το τρίτο οπτικό παράθυρο στην περιοχή των 1550 nm (ζώνη C)

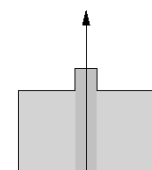
Κατανομή του δείκτη διάθλασης σε ίνες διαφόρων τύπων



Step Index MM



Graded Index MM



Step Index SM

προσφέρει δύο πλεονεκτήματα: πολύ χαμηλότερη εξασθένηση και συχνότητα λειτουργίας συμπίπτουσα με αυτή των νέων ενισχυτών με ίνα προσμίξεων ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifiers – EDFAs). Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά διασποράς περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση laser στενότερου εύρους γραμμής και υψηλότερης ισχύος. Επειδή όμως, το τρίτο οπτικό παράθυρο έχει μικρότερη εξασθένηση από αυτή του παραθύρου των 1310 nm, οι κατασκευαστές σχεδίασαν την ίνα μετατοπισμένης-διασποράς, μετακινώντας το σημείο μηδενικής διασποράς στην περιοχή των 1550 nm. Παρόλο που αυτή η λύση συνδύαζε την χαμηλότερη οπτική εξασθένηση και το σημείο μηδενικής διασποράς στο παράθυρο των 1550 nm, προέκυψε ότι υπάρχουν καταστροφικά μη γραμμικά φαινόμενα στην οπτική ίνα στην περιοχή του σημείου μηδενικής διασποράς, για τα οποία δεν υπάρχει αποτελεσματική αντιστάθμιση. Λόγω αυτού του περιορισμού, αυτές οι ίνες δεν είναι κατάλληλες για DWDM εφαρμογές. Ο τρίτος τύπος, η ίνα μη μηδενικής μετατοπισμένης διασποράς NZ DSF, έχει σχεδιαστεί συγκεκριμένα για τις ανάγκες των DWDM εφαρμογών. Ο σκοπός αυτής της σχεδίασης είναι να επιτύχει χαμηλή διασπορά στην περιοχή των 1550nm αλλά όχι μηδενική. Αυτή η στρατηγική εισάγει ένα ελεγχόμενο ποσό διασποράς, που εκμηδενίζει τα μη γραμμικά φαινόμενα, όπως η μίξη τεσσάρων κυμάτων που θα δούμε πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο, και καθιστά δυνατή τη σχεδίαση DWDM συστημάτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τύποι οπτικής ίνας, ανάλογα με το “οπτικό παράθυρο”, που χρησιμοποιείται.

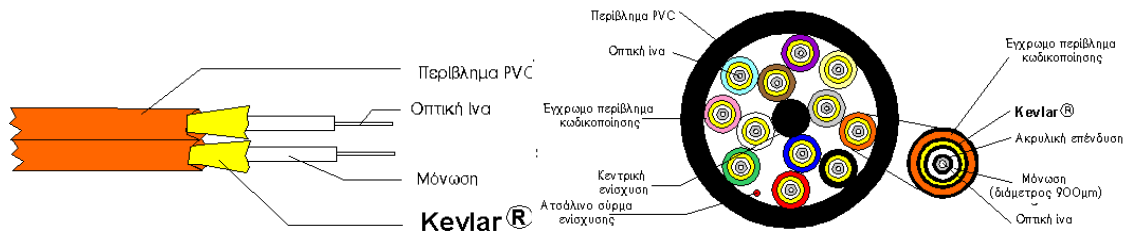
Πίνακας 2.1

Είδη και χαρακτηριστικά οπτικών ινών

Περιοχή μήκων κύματος [μm]	Οπτική ίνα		Διαστάσεις NA	Χρήση
	Υλικό	Τύπος		
0.63	Πλαστική	πολύτροπη	100-1000/200-1200 NA: 0.50 - 0.66	Μεταφορά δεδομένων τοπικές ζεύξεις
0.85	Silica, PCS	Πολύτροπη, βηματικού ή διαβαθμισμένου δείκτη	50/125, 85/125, 100/140 NA: 0.3 - 0.5	Γενική
1.30	Silica	Πολύτροπη, βηματικού ή διαβαθμισμένου δείκτη	50/125, 85/125 NA: 0.2 -0.35	ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων
1.55	Silica	Μονότροπη, βηματικού δείκτη	8.5/125 NA: 0.1	ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων

2.4.5.3 Οπτικά καλώδια

Η χρήση των οπτικών ινών ενισχύεται από την δυνατότητα των μηχανικών να τις συσκευάζουν με τέτοιο τρόπο ώστε να τις προστατεύουν αλλά και να κάνουν εύκολα συνδέσεις.



Σχήμα 2.5 Οπτικό καλώδιο α) δύο ινών και β) δώδεκα ινών

Σε μικρά μήκη, η οπτική ίνα μπορεί να προστατευτεί απλά με χρήση λεπτών πλαστικών περιβλημάτων. Για μεγάλα μήκη, η οπτική ίνα υπόκειται σε μηχανικές τάσεις και πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την προστασία της τόσο κατά την κατασκευή της, όσο κατά την εγκατάσταση και κατά τη διάρκεια της χρησιμοποίησής της. Οι μικρές διαστάσεις των οπτικών ινών επιτρέπουν ακόμη την ομαδοποίησή τους σε ένα καλώδιο μικρής διαμέτρου.

Έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη ποικιλία οπτικών καλωδίων. Όλα στοχεύουν στην καλύτερευση των μηχανικών ιδιοτήτων των οπτικών ινών που περιέχουν, χωρίς να υποβαθμίζουν τις οπτικές τους ιδιότητες. Έτσι τα οπτικά καλώδια προστατεύουν τις ίνες από τις μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά και μετά την εγκατάστασή τους, με τη βοήθεια ατσάλινων συρμάτων ενίσχυσης. Αυξάνουν την αντοχή της ίνας στα σπασίματα λόγω πλευρικών δυνάμεων και μεγάλων κάμψεων και την προστατεύουν από γδαρσίματα. Τέλος μειώνουν τις δονήσεις και προστατεύουν την ίνα από την υγρασία και από χημικές επιδράσεις. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται μερικά από τα χρησιμοποιούμενα είδη οπτικών καλωδίων. Ένα τυπικό οπτικό καλώδιο μπορεί έχει διάμετρο 15 mm και βάρος 12.5 kg/km.

2.4.6 Ασύρματη μετάδοση

Ασύρματη ονομάζεται η ζεύξη που είναι ανεξάρτητη από υλικά μέσα και χρησιμοποιεί ως μέσο διάδοσης τον αέρα ή το κενό. Στηρίζεται στη διάδοση σημάτων στην ατμόσφαιρα μέσω της χρήσης κεραιών, που επιτρέπουν στην ενέργεια να περάσει από το ενσύρματο μέσο μεταφοράς στο χώρο, με την καλύτερη απόδοση. Οι ασύρματες ζεύξεις είναι από τους σημαντικότερους τρόπους μετάδοσης και χρησιμοποιούνται αρκετά μετά το 1950.

Βασικό στοιχείο είναι η ανεξαρτησία από υλικά μέσα διάδοσης, όμως απαιτείται μεγάλη ισχύς προκειμένου τα σήματα, που παρουσιάζουν μεγάλη εξασθένηση κατά τη διάδοσή στην ατμόσφαιρα, να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Οι ασύρματες ζεύξεις παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε παρεμβολές θορύβου και χαμηλή ασφάλεια πληροφορίας.

Παρ' ότι αναπτύχθηκαν για μετάδοση φωνής και εικόνας, σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως για όλες τις μορφές τηλεπικοινωνιών.

Για τη μετάδοση του σήματος, απαιτείται η χρήση ενός αναλογικού σήματος, του φορέα ή φέροντος. Ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων που ανήκει αυτή του φέροντος σήματος, αυτό χαρακτηρίζεται από ιδιότητες, όπως η απόσταση μετάδοσης, το εύρος ζώνης και η κατευθυντικότητα (directional ή omni directional: κατευθυντικός μη κατευθυντικός). Χρησιμοποιούνται διάφορες περιοχές συχνοτήτων ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής (§ 2.3.1). Η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας εξαρτάται κάθε φορά από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης ζεύξης.

2.4.6.1 Ραδιοκύματα

Παράγονται εύκολα, μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις και χρησιμοποιούνται και για επικοινωνία σε εσωτερικούς χώρους εξ' αιτίας της διεισδυτικότητάς τους. Ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις (μη κατευθυντικά) οπότε δεν χρειάζεται ευθυγράμμιση πομπού και δέκτη. Ραδιοκύματα με μικρές συχνότητες διαπερνούν εμπόδια αλλά ελαττώνεται απότομα η ισχύς τους, ενώ σε υψηλές συχνότητες ταξιδεύουν σε ευθεία αλλά ανακλώνται από εμπόδια. Επίσης υπόκεινται σε παρεμβολές.

2.4.6.2 Μικροκύματα

Χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων από το 1930 σαν επέκταση των ραδιοφωνικών συχνοτήτων. Έχουν συχνότητες 1 - 50 Ghz και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στις περιπτώσεις που είναι δύσκολη μια μικρής απόστασης ενσύρματη επίγεια σύνδεση π.χ. η σύνδεση δύο κτιρίων που χωρίζονται από κάτι, στην τηλεφωνία και τηλεόραση, στα ραντάρ αλλά και στους δορυφόρους.

Οι μικροκυματικές ζεύξεις είναι αρκετά κατευθυντικές, έτσι είναι πιο ασφαλείς από τις άλλες ασύρματες. Απαιτούν οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, έχουν ευαισθησία καιρικά φαινόμενα και για ζεύξεις μεγαλύτερων αποστάσεων, η χρήση αναμεταδοτών είναι απαραίτητη.

2.4.6.3 Κινητές επικοινωνίες

Η **ασύρματη τηλεφωνία (cordless telephony)** έκανε την εμφάνισή της στα πλαίσια της επικοινωνίας χωρίς γεωγραφικά και χρονικά όρια. Έτσι κάποιος μπορεί να συνδεθεί με τηλεφωνικό δίκτυο μέσω μίας συσκευής που δε χρειάζεται καλώδιο για να στείλει ή να λαμβάνει σήματα. Οι πρώτες ασύρματες τηλεφωνικές συσκευές εμφανίστηκαν στην Ευρώπη τη δεκαετία του 1980 και η ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας τους επέτρεψε να εξελιχθούν πολύ γρήγορα από απλές οικιακές συσκευές σε συστήματα ασύρματης

επικοινωνίας για την κάλυψη μικρών αποστάσεων, με δυνατότητα εκπομπής χαμηλής ισχύος. Η επόμενη μεγάλη εξέλιξη ήταν τα συστήματα **κινητής τηλεφωνίας (mobile telephony)** που ήρθε να καλύψει την ανάγκη για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις που απαιτεί μεγάλη ισχύ εκπομπής και μεγάλο αριθμό συχνοτήτων, προκειμένου να είναι δυνατή η κάλυψη πολλών χρηστών ταυτόχρονα. Και εδώ η εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας και η εφαρμογή της ιδέας των **κυψελωτών δικτύων (cellular mobile network)** οδήγησε στην ανάπτυξη και διάδοση της κινητής τηλεφωνίας. Τα κυψελωτά δίκτυα βασίζονται στην ιδέα της διαίρεση μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής σε μικρότερες, που ονομάζονται **κυψέλες (cells)**. Έτσι οι τηλεπικοινωνιακοί πομποί είναι μικρής ισχύος, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιες συχνότητες σε μη γειτονικές κυψέλες. Η κάθε κυψέλη διαθέτει ένα σταθερό σταθμό βάσης. Τα πρώτα συστήματα κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας ήταν και αυτά αναλογικά που στη συνέχεια έγιναν ψηφιακά. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος με ευρεία χρήση σήμερα είναι το **GSM (Global System for Mobile communications)**. Δημιουργήθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για τα Ταχυδρομεία και τις Τηλεπικοινωνίες (**Conference of European Postal and Telecommunications - CEPT**). Βασικό του στοιχείο είναι η μετατροπή του σήματος φωνής σε ψηφιακό και η μετάδοσή του σε συχνότητες UHF γύρω στα 900 MHz, με κανάλια εύρους ζώνης 200 kHz. Άλλο σύστημα κινητών επικοινωνιών είναι το **Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Τηλεπικοινωνίας (Universal Telecommunications System – UMTS)** και συσχετίζεται με την αντίστοιχη προσπάθεια που ξεκίνησε η **International Telecommunications Union – ITU** για να αναπτυχθεί ένα σύστημα που να προσφέρει όλες τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Με συχνότητες της τάξης των 2.000 MHz και ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 2 Mbps είναι απόλυτα συμβατό με τα σταθερά δίκτυα και έχει δυνατότητα συνεργασίας με αυτά.

2.4.6.4 Δορυφορικές επικοινωνίες

Τα συστήματα κινητής επικοινωνίας λειτουργούν με διάφορες ασύμβατες τεχνικές, με αποτέλεσμα πολλές φορές, όταν κάποιος αγοράζει ένα τηλέφωνο στην Αμερική, να μην δουλεύει στην Ευρώπη και αντιστρόφως. Έτσι κλήθηκαν τα **συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών (satellite mobile communications)** για να παρέχουν μια πραγματικά παγκόσμια τηλεπικοινωνιακή κάλυψη.

Οι δορυφορικές επικοινωνίες ξεκίνησαν μετά το 1950 ενώ κάποια νηπιακά βήματα είχαν γίνει μετά το 1942. Τα πρώτα δορυφορικά συστήματα δεν ήταν βιώσιμα λόγω της μικρής ισχύος των πυραύλων που τους έθεταν σε τροχιά. Η χαμηλή τροχιά των 10 Km

είχε σαν αποτέλεσμα ο δορυφόρος να κινείται ταχύτερα από την περιστροφή της γης, κάτι που επηρέαζε την κατασκευή των γήινων σταθμών, αφού έπρεπε να περιστρέφονται συνεχώς για να τους παρακολουθούν. Στην εξέλιξη των συστημάτων αυτών κατασκευάστηκαν διάφοροι τύποι δορυφόρων:

- Γεωστατικοί GEO (Geosynchronous Earth Orbit)
- δορυφόροι χαμηλής LEO (Low Earth Orbit) και μέσης τροχιάς MEO (Medium Earth Orbit) και
- δορυφόροι ελλειπτικής τροχιάς HEO (Highly inclined Elliptical Orbit).

Οι δορυφόροι

- καλύπτουν με μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και απομακρυσμένες
- έχουν μεγάλο εύρος ζώνης
- έχουν μεγάλη καθυστέρηση σήματος της τάξης των 250 msec που οφείλεται στην μεγάλη απόσταση
- δεν επηρεάζονται από την απόσταση μεταξύ επικοινωνούντων
- έχουν μεγάλους χρόνους μετάδοσης, καθώς για να διανύσει ένα σήμα τη διαδρομή από και προς το δορυφόρο, απαιτείται χρόνος 0,3 sec)
- δεν παρέχουν καμία ασφάλεια, Γι' αυτό το λόγο αυτό υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις κρυπτογράφησης των σημάτων
- απαιτείται μεγάλη ισχύς εκπομπής από το δορυφόρο με συνέπεια την αύξηση του βάρους του και τη μείωση της ζωής του, καθώς η απόσταση από τη γη προκαλεί εξασθένηση του σήματος.

Χρησιμοποιούνται:

- ❑ για τηλεφωνικές συνδέσεις
- ❑ για ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές μεταδόσεις
- ❑ για κινητές επικοινωνίες
- ❑ για προσωπικές επικοινωνίες
- ❑ σε αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες πολυμέσων.

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει μερικά χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων δορυφόρων:

Τύποι δορυφόρων χαρακτηριστικά	LEO	MEO	GEO	HEO
Τροχιά	Κυκλική	Κυκλική	Κυκλική	Ελλειπτική
Αριθμός τροχιών	6	3	1	4
Ύψος ²	785 Km	10.354 Km	35.786 Km	-
Απόγειο	-	-	-	40.000 Km
Περίγειο	-	-	-	500 Km
Περίοδος	1 h 40 min	6 h	24 h	12 h
Ταχύτητα	25.560 Km/h		11.070 Km/h	Μη σταθερή
Βάρος	700 Kgr	1.000 Kgr	1.500 Kgr	1.000 Kgr
Απαιτούμενος αριθμός	66 (11 ανά τροχιά)	66 (11 ανά τροχιά)	3	66 (11 ανά τροχιά)
Ελάχιστη γωνία ανύψωσης	8°	8°	5°	80°
Διάρκεια ορατότητας	10 min	1 h	24 h	8 h
Χρόνος ζωής	3-7 χρόνια	10-15 χρόνια	10-15 χρόνια	7-10 χρόνια
Καθυστέρηση σήματος	μικρή	μέση	μεγάλη	μεγάλη
Εξασθένιση σήματος	μικρή	μέση	μεγάλη	μεγάλη
Πολυπλοκότητα δικτύου	μεγάλη	μέση	μικρή	μέση

Πίνακας : Χαρακτηριστικά δορυφόρων.

² Μέσες τιμές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

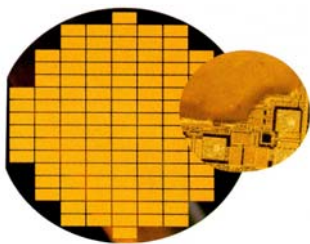
Από το *Επικοινωνίες και δίκτυα*

Σ. ΜΑΤΑΚΙΑΣ (MSc), Α. ΤΣΙΓΚΟΠΟΥΛΟΣ (PhD), Α. ΑΜΔΙΤΗΣ (PhD)

Η εξέλιξη των επικοινωνιών υπήρξε θεαματική σε όλη τη διάρκεια του 20ού αιώνα. Ιδιαίτερα από το Β' Παγκόσμιο πόλεμο και μετά, δόθηκε τεράστια σημασία στην τεχνολογία των συστημάτων επικοινωνιών με χρήση ηλεκτρικών σημάτων. Ανάμεσα στα πιο αξιόλογα επιτεύγματα της περιόδου αυτής περιλαμβάνονται το ραντάρ, τα μικροκυματικά συστήματα, το τρανζίστορ και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι και τα laser. Σήμερα όλος ο πλανήτης μας είναι διασυνδεδεμένος με συστήματα επικοινωνίας που μεταφέρουν ομιλία, κείμενο, εικόνες και διάφορες πληροφορίες.



Κατευθυντήρια δύναμη και προϋπόθεση της εξέλιξης αυτής ήταν η αντίστοιχη εξέλιξη της Ηλεκτρονικής. Η Ηλεκτρονική σήμερα έχει αλλάξει τελείως φυσιογνωμία σε σχέση με το τί ήταν πριν 50 χρόνια. Μέχρι το 1950 ορίζαμε την Ηλεκτρονική ως τη σπουδή των φαινομένων της αγωγιμότητας στο κενό, στα αέρια, ή στους ημιαγωγούς, καθώς και τη χρήση των διατάξεων που βασίζονται στα φαινόμενα αυτά.

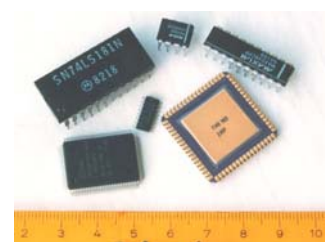


Ημιαγωγικό δισκίο και λεπτομέρεια από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip).



Σήμερα, η Ηλεκτρονική περιγράφεται ως το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούν μεταβολές φυσικών μεγεθών για να διαβιβάσουν, να λάβουν, και να επεξεργαστούν μια πληροφορία. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιεί η Ηλεκτρονική είναι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα φωτεινά σήματα (φωτόνια) και το ηλεκτρικό ρεύμα³. Η επεξεργασία και η μετάδοση της πληροφορίας (δηλ. η επικοινωνία), γίνεται ο στόχος της νέας Ηλεκτρονικής.

Η ανταλλαγή πληροφορίας είναι η βάση της ανάπτυξης των επικοινωνιών. Στη χώρα μας, οι επικοινωνίες αλλάζουν με ταχύτατους ρυθμούς. Το παλιό αναλογικό τηλεφωνικό δημόσιο δίκτυο αντικαθίσταται με ψηφιακά δίκτυα και εισάγονται νέες τεχνολογίες και υπηρεσίες. Οι οπτικές ίνες είναι πλέον το απαραίτητο μέσο μετάδοσης πληροφορίας και παρόμοια ανάπτυξη γνωρίζουν οι ασύρματες επικοινωνίες (λ.χ. δορυφορικές επικοινωνίες, κινητή τηλεφωνία). Όλες αυτές οι εξελίξεις βασίζονται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των:



³ Στους ημιαγωγούς το ηλεκτρικό ρεύμα προκύπτει από την κίνηση δύο τύπων ηλεκτρικών φορέων: των ηλεκτρονίων και των οπών.

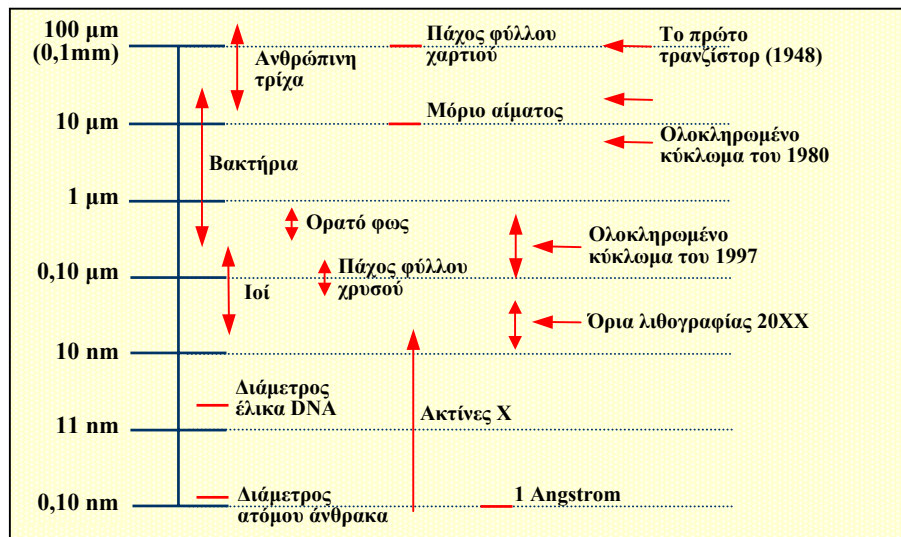
- Ολοκληρωμένων ημιαγωγικών κυκλωμάτων
- Μικροκυματικών διατάξεων
- Οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι κυριότερες τεχνολογίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα συστήματα επικοινωνιών

3.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

3.1.1 Ιστορική εξέλιξη

Για την κατασκευή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '50, χρησιμοποιούνταν οι *ηλεκτρονικές λυχνίες*. Η ανακάλυψη της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας κενού από τον Λη ντε Φόρεστ, αποτέλεσε, λόγω της ενισχυτικής ιδιότητάς της, τον ακρογωνιαίο λίθο της νέας τεχνικής για την εποχή εκείνη. Η τεχνική αυτή επέτρεψε τη γέννηση της ασύρματης τηλεγραφίας με σήματα Μορς, της ραδιοτηλεφωνίας, της



Διαστάσεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε σχέση με άλλες φυσικές ποσότητες.

ραδιοφωνίας, της τηλεόρασης και του ραντάρ.

Η ανακάλυψη της **κρυσταλλοτριόδου (τρανζίστορ)** το 1948 από τους Μπαρντίν, Μπρατέν και Σόκλεϋ, ξεπερνώντας τα μειονεκτήματα των λυχνιών (θέρμανση, κατανάλωση, όγκος, κλπ.), έφερε μια πραγματική επανάσταση στην Ηλεκτρονική και σημάδεψε ουσιαστικά την έλευση της εποχής της **Μικροηλεκτρονικής**.

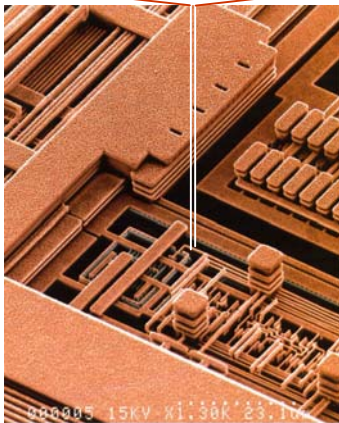
Τα τρανζίστορ αποτελούνται από ημιαγωγό (λ.χ. πυρίτιο ή γερμάνιο), ο οποίος είναι κατά περιοχές αρνητικά ή θετικά φορτισμένος με τη βοήθεια στοιχείων προσμείξεων πλούσιων αντίστοιχα σε ηλεκτρόνια ή οπές.

Τα τρανζίστορ εκτελούν τις ίδιες ακριβώς λειτουργίες με τις λυχνίες, χωρίς να έχουν τα μειονεκτήματά τους. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους, χάρη στα οποία εκτόπισαν σταδιακά τις λυχνίες, είναι:

- η χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας,
- το μικρό μέγεθος,
- το χαμηλό κόστος κατασκευής,

η υψηλή αξιοπιστία,
η έλλειψη προβλημάτων υπερθέρμανσης και,
η καταλληλότητά τους για παλμική λειτουργία σε
συστήματα ψηφιακής μετάδοσης.
Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της Ηλεκτρονικής
συντελέστηκε με την ανακάλυψη των ολοκληρωμένων
κυκλωμάτων.

ελάχιστη διάσταση κυκλώματος



Λεπτομέρεια από ολοκληρωμένο κύκλωμα και προσδιορισμός της ελάχιστης διάστασης του κυκλώματος.

Η διαφορά τους από τα κλασικά κυκλώματα είναι ότι όλα τα στοιχεία του ολοκληρωμένου κυκλώματος και οι διασυνδέσεις τους περιλαμβάνονται μέσα ή πάνω σε ένα τμήμα μονοκρυστάλλου ημιαγωγού (δηλ. ένα κομμάτι ημιαγωγού το

οποίο έχει παντού την ίδια κρυσταλλική δομή), το οποίο ονομάζεται **υπόστρωμα (substrate)**. Το υπόστρωμα προέρχεται από τεμαχισμό ενός μεγάλου κυκλικού και λεπτού δίσκου (παρόμοιου με ένα δίσκο CD) με διάμετρο 30 εκατοστών και πάχος κλάσματος του χιλιοστού του μέτρου. Ο δίσκος αυτός είναι μονοκρύσταλλος και ονομάζεται **δισκίο (wafer)**.

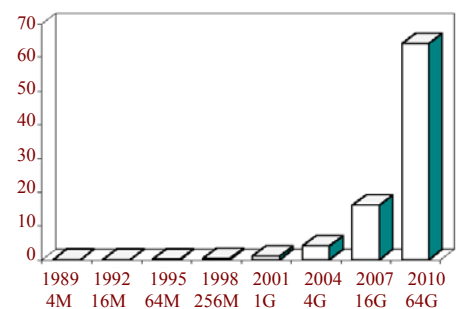
Κατά την κατασκευή, τα τρανζίστορ, οι δίοδοι, οι αντιστάσεις κλπ. καθώς και οι διασυνδέσεις τους διαμορφώνονται συγχρόνως κατά τη διάρκεια μιας ενιαίας σειράς κατασκευαστικών φάσεων.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι το αποτέλεσμα μιας εκπληκτικής εξέλιξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών για να πετύχει την: ελαχιστοποίηση του μεγέθους των ηλεκτρονικών διατάξεων αύξηση ταχύτητας μείωση κατανάλωσης

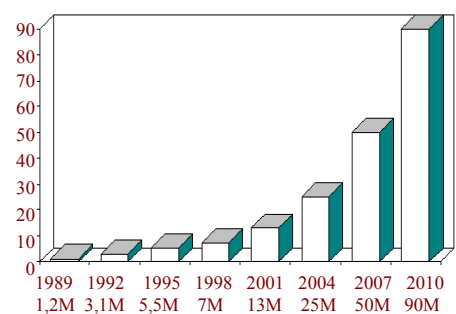
Σήμερα, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα περιέχουν ένα τεράστιο αριθμό τρανζίστορ που υπερβαίνει τα δέκα εκατομμύρια. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν τέτοια μεγάλη πυκνότητα ημιαγωγικών στοιχείων (τρανζίστορ) ονομάζονται κυκλώματα VLSI (Very Large Scale Integration) και αποτελούν την τελευταία λέξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα κατατάσσονται ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων που περιέχουν, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1, ή ανάλογα με την ελάχιστη διάσταση των στοιχείων του κυκλώματος (λ.χ. ελάχιστη απόσταση

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1		
Κατάταξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με τον αριθμό των στοιχείων που περιέχουν		
Όνομασία	Αριθμός	Τυπικές
	στοιχείων	εφαρμογές
SSI (Small Scale Integration)	1-100	Πύλες, τελεστικοί ενισχυτές
MSI (Medium Scale Integration)	100-1000	Καταχωρητές, φίλτρα
LSI (Large Scale Integration)	1000-100.000	Μικρο-επεξεργαστές,



Σχήμα 4.2.1. Εξέλιξη χωρητικότητας ημιαγωγικών ολοκληρωμένων μνημών ($M=10^6$, $G=10^9$).

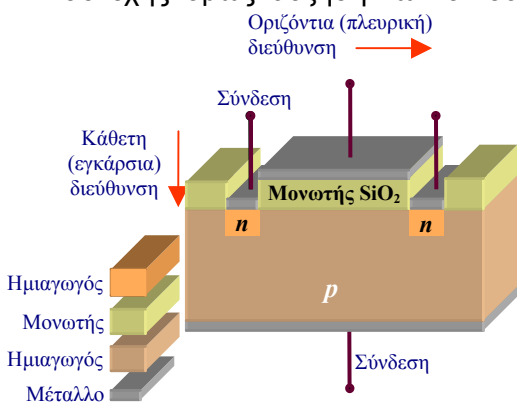


Σχήμα 4.2.2. Εξέλιξη αριθμού τρανζίστορ επεξεργαστών υπολογιστών, ($M=10^6$, $G=10^9$).

μεταξύ γειτονικών τρανζίστορ ή ελάχιστο πάχος μεταλλικών συνδέσεων). Η ελάχιστη διάσταση ήταν στη δεκαετία του '70 της τάξης των 7-10 μm , στη δεκαετία του '80 μειώθηκε στα 2 μm , στη δεκαετία του '90 έφθασε στα 0,25 μm και σήμερα στα 0,18 μm . Η μείωση της ελάχιστης διάστασης είναι καθοριστικός παράγοντας για την κατασκευή ολοκληρωμένων με όσο το δυνατόν μικρότερη επιφάνεια και όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αύξηση του αριθμού των κυκλωμάτων μέσα στο ίδιο ολοκληρωμένο. Αυτό σημαίνει μείωση του κόστους, καθώς συνδυάζονται στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα περισσότερες λειτουργίες, και αύξηση της ταχύτητας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (ισχύς επεξεργασίας).

Το 1965, μόλις έξι χρόνια μετά την κατασκευή του πρώτου ολοκληρωμένου κυκλώματος, ο Μουρ (G. Moore) διατύπωσε την άποψη ότι ο αριθμός των τρανζίστορ σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα – και επομένως η ταχύτητα επεξεργασίας του – θα διπλασιάζεται κάθε χρόνο, χωρίς να υπάρχει ανάλογη αύξηση του κόστους. Η διατύπωση αυτή, γνωστή και ως “νόμος του Moore”, ισχύει μέχρι σήμερα με μικρές αποκλίσεις (ο διπλασιασμός επιτυγχάνεται τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια ανά 18 μήνες), και φαίνεται στα σχ. 4.2.1 και 4.2.1 για τις ημιαγωγικές μνήμες και τους επεξεργαστές που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

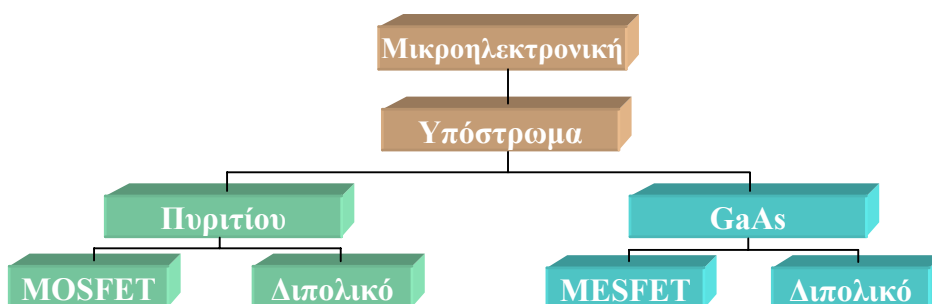
Η συνεχής όμως αύξηση των επιδόσεων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων δεν μπορεί να



Σχηματικό διάγραμμα τρανζίστορ ολοκληρωμένου κυκλώματος.

συνεχιστεί επ' άπειρον. Υπάρχουν θεωρητικά όρια τα οποία υπαγορεύουν ότι η ταχύτητα, που προκύπτει από τη συνεχή σμίκρυνση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από τρεις ή τέσσερις τάξεις μεγέθους σε σχέση με τη σημερινή. Το όριο αυτό τίθεται από το πρακτικό πρόβλημα της απαγωγής θερμότητας. Καθώς η επιφάνεια του ημιαγωγού μειώνεται, γίνεται ολοένα και δυσκολότερη η απαγωγή της θερμότητας που αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και την πρόωρη καταστροφή του ημιαγωγού.

Υπάρχουν επίσης και όρια στην ελάχιστη διάσταση των στοιχείων του κυκλώματος. Το ελάχιστο επιτρεπτό μέγεθος των στοιχείων του κυκλώματος δεν μπορεί να είναι μικρότερο από την απόσταση των ατόμων μέσα στον ημιαγωγικό κρύσταλλο. Το όριο αυτό κατά την **κάθετη (εγκάρσια) διεύθυνση** η σημερινή τεχνολογία το έχει ήδη επιτύχει. Τα διάφορα στρώματα ημιαγωγού, από τα οποία απαρτίζεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, μπορούν δηλαδή να είναι



Σχ. 4.2.3. Οικογένειες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

τόσο λεπτά, όσο η απόσταση δύο ατόμων μέσα στον κρύσταλλο.

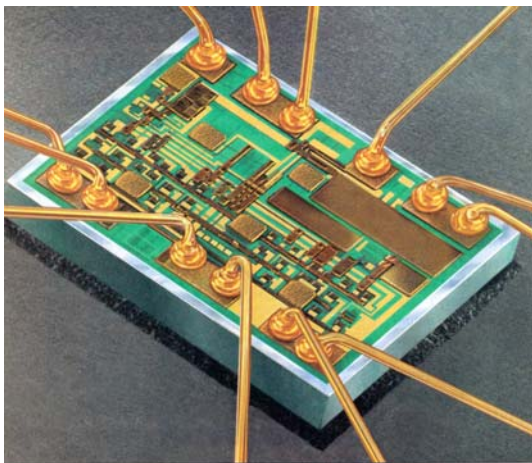
Το ελάχιστο μέγεθος στην **οριζόντια (πλευρική) διεύθυνση**, καθορίζεται από τη

διακριτική ικανότητα της μεθόδου κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Με την καθιερωμένη μέθοδο της φωτολιθογραφίας (που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια), η ελάχιστη διάσταση στοιχείων στην οριζόντια διεύθυνση είναι περίπου 0,18 μm . Η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο με τη βοήθεια ακτίνων -X ή δέσμης ηλεκτρονίων σε διαστάσεις κάτω από 0,1 μm .

Είναι φανερό από τα παραπάνω ότι είναι δύσκολο προς το παρόν να προβλεφθεί το τελικό όριο των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και αναμένεται σημαντική πρόοδος μέσα στον επόμενο αιώνα.

3.2 Τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα



ολοκληρωμένο κυκλώμα

κατασκευάζονται πάνω σε υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) ή αρσενικούχου γαλλίου GaAs. Τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν το κύκλωμα (δηλ. τα τρανζίστορ, οι αντιστάσεις, οι πυκνωτές κλπ.), αποτελούνται από περιοχές τύπου p (θετικά φορτισμένων προσμείξεων) και τύπου n (αρνητικά φορτισμένων προσμείξεων) πάνω στον αρχικό μονοκρύσταλλο πυριτίου. Οι προσμείξεις εισάγονται είτε κατά τη διάρκεια κατασκευής του αρχικού ολοκληρωμένου (chip) ή στη συνέχεια με *επιλεκτική διάχυση* σε συγκεκριμένες περιοχές (όπως θα δούμε

παρακάτω). Η τεχνολογία που χαρακτηρίζει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα προκύπτει από την τεχνολογία κατασκευής του ενεργού στοιχείου του ολοκληρωμένου κυκλώματος, δηλαδή του τρανζίστορ.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι τρανζίστορ, το τρανζίστορ διπολικών ενώσεων **BJT** (Bipolar Junction Transistor) και το τρανζίστορ επιδράσεως πεδίου **FET** (Field Effect Transistor). Τα διπολικά τρανζίστορ χρησιμοποιούνται κυρίως σε κυκλώματα ενίσχυσης ασθενών σημάτων ή σε κυκλώματα υψηλής ισχύος. Τα FET χρησιμοποιούνται συνήθως ως ηλεκτρονικοί διακόπτες σε λογικά (ψηφιακά) κυκλώματα. Από τα FET, τα πιο σημαντικά είναι τα λεγόμενα τρανζίστορ **MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)** και **MESFET (Metal Semiconductor FET)**, ονομασία που προέρχεται από την ειδική κατασκευή των ηλεκτροδίων τους.

3.3 ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Οι γραμμές μεταφοράς στα μικροκυματικά κυκλώματα μεταφέρουν ενέργεια ή πληροφορία μεταξύ δύο σημείων του κυκλώματος. Είναι ουσιαστικά το αντίστοιχο των μεταλλικών διασυνδέσεων των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χαμηλών συχνοτήτων. Επειδή όμως στα MIC το μέγεθος των αγωγών αυτών είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος λειτουργίας, οι αγωγοί θεωρούνται **κατανεμημένοι**, ονομάζονται γραμμές μεταφοράς και έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης του σήματος από αυτά που έχουν στις χαμηλές συχνότητες. Οι έννοιες κατανεμημένο στοιχείο ή κύκλωμα αναφέρονται ακριβώς στις σχετικές τους διαστάσεις ως προς το μήκος κύματος. **Κατανεμημένο** είναι ένα στοιχείο του οποίου οι διαστάσεις είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος, ενώ **εντοπισμένο** (συγκεντρωμένο) είναι το στοιχείο με διαστάσεις πολύ μικρότερες από αυτές του μήκους κύματος.

Ο όρος “**μικροκυματικές**” αναφέρεται σε διατάξεις που λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων από 1 GHz έως 30 GHz, η οποία αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 30 cm έως 1 cm. Η ιστορική εξέλιξη των μικροκυματικών κυκλωμάτων μοιάζει με αυτή των κλασικών ηλεκτρονικών. Υπήρξε μια συνεχής τάση για μετάβαση από τις ηλεκτρονικές μικροκυματικές λυχνίες σε μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Όμως, επειδή τα μικροκύματα αφορούσαν στρατιωτικές εφαρμογές (λ.χ. ραντάρ, συστήματα διεύθυνσης βολής, πλοήγησης κλπ.), οι επιπτώσεις

τους για ένα μεγάλο διάστημα έγιναν λιγότερο αισθητές. Οι πρώτες ανακαλύψεις έγιναν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου πολέμου, οπότε και κατασκευάστηκαν τα πρώτα δοκιμαστικά μικροκυματικά κυκλώματα.

Η μεγαλύτερη εξέλιξη πραγματοποιήθηκε την περίοδο 1960-1980, οπότε και αναπτύχθηκαν τα **μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Microwave Integrated Circuits, MIC)**, τα οποία συνδυάζουν ενεργές διατάξεις (λ.χ. τρανζίστορ FET) και παθητικά στοιχεία (γραμμές μεταφοράς, αντιστάσεις, πυκνωτές, πηνία) κατανεμημένα ή συγκεντρωμένα πάνω σε ένα **διηλεκτρικό** (μονωτικό) υπόστρωμα (συνήθως αλουμίνα, Al_2O_3).

Η λογική τους εξέλιξη ήταν βέβαια τα **μονολιθικά μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Monolithic Microwave Integrated Circuits, MMIC)**, στα οποία οι ενεργές διατάξεις και τα παθητικά στοιχεία διαμορφώνονται μέσα ή πάνω σε ένα **ημιαγωγικό**

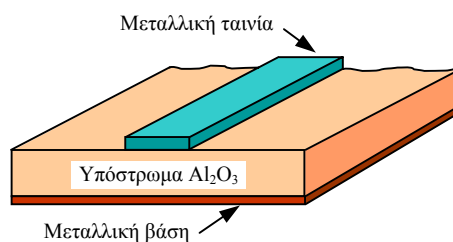
υπόστρωμα, με χρησιμοποίηση των διαδικασιών κατασκευής που ισχύουν για τα συνήθη ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs). Το υλικό αυτό έχει καλύτερες ιδιότητες από το πυρίτιο το οποίο είναι ακατάλληλο για τις υψηλές συχνότητες.

Τα μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα έχουν μεγάλη αξιοπιστία, μικρό μέγεθος, χαμηλό κόστος,

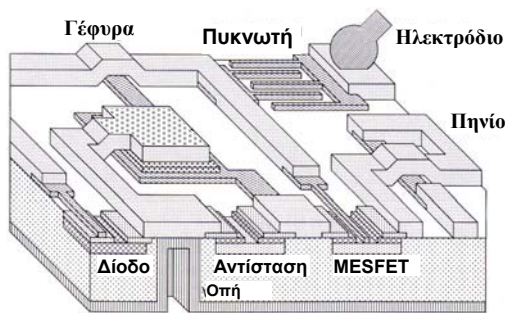
μεγάλο εύρος ζώνης και συνδυάζουν πολλές λειτουργίες πάνω στο ίδιο τσιπ.

Οι εφαρμογές των μικροκυματικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων αφορούν σε πολλούς τομείς των επικοινωνιών, ραντάρ, και αμυντικών συστημάτων. Οι δορυφορικοί πομποί και δέκτες σε συχνότητες 12 ή 4 GHz, η δορυφορική τηλεόραση, το δορυφορικό τηλέφωνο και τα κινητά τηλέφωνα στα 900 και 1800 MHz χρησιμοποιούν MMIC. Επίσης, τα ναυτιλιακά

Ο πιο χαρακτηριστικός τύπος ολοκληρωμένης γραμμής μεταφοράς είναι η **μικροταινία** (microstrip) η οποία είναι το αντίστοιχο της ομοαξονικής γραμμής (π.χ. της γραμμής της τηλεόρασης) για ένα μικροκυματικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Η μικροταινία είναι μια γραμμή μεταφοράς σε σμίκρυνση και αποτελείται από μία μεταλλική ταινία πάνω σε διηλεκτρικό (λ.χ. αλουμίνα) του οποίου η κάτω επιφάνεια έχει μεταλλική επικάλυψη. Η διέγερση με ρεύμα του ενός άκρου της μικροταινίας οδηγεί σε διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά μήκος αυτής με το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου να περιέχεται μέσα στο διηλεκτρικό.



Σχ. 3.1. Βασική δομή **μικροταινίας**.



Σχ. 3.2. Τριδιάστατο σχηματικό διάγραμμα MMIC.

και στρατιωτικά ραντάρ και τα συστήματα ηλεκτρονικού πολέμου χρησιμοποιούν μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

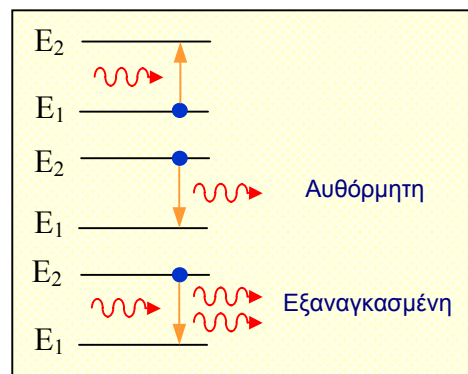
Τα MMIC έχουν εξελιχθεί σήμερα σε τέτοιο βαθμό, ώστε να λειτουργούν σε συχνότητες της τάξης των 100 GHz. Οι επιδόσεις αυτές οφείλονται στα βελτιωμένα υλικά και τις προωθημένες τεχνολογίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ο συνδυασμός της εξέλιξης των μικροκυματικών

κυκλωμάτων με την εξέλιξη των οπτικοηλεκτρονικών διατάξεων θα έχει έντονη επίδραση σε περιοχές της τεχνολογίας, όπως η ρομποτική, η δορυφορική τεχνολογία, οι μικροκυματικοί αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά ευρείας χρήσης.

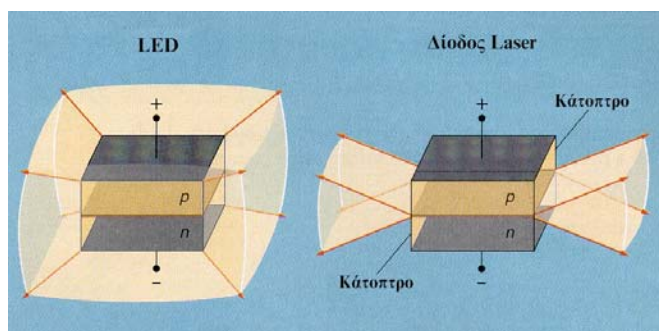
3.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Οι πηγές φωτός (ορατού και μη ορατού) βρίσκονται σήμερα στην καρδιά των δύο πλέον αναπτυσσόμενων βιομηχανιών: των υπολογιστών και των τηλεπικοινωνιών. Η οπτική ίνα μεταφέρει το φως κατάλληλων πηγών το οποίο περιέχει πληροφορία δεδομένων, εικόνας και φωνής, σε πολύ υψηλούς ρυθμούς. Τέτοιες φωτεινές (οπτικές) πηγές χρησιμοποιούνται, για να διαβάζουν τα δεδομένα που έχουν αποθηκευθεί σε CD ή σε οπτικό ψηφιακό δίσκο (Digital Video Disk, DVD) ή χρησιμοποιούνται σε εκτυπωτές υπολογιστικών συστημάτων.

Η αναγκαιότητα χρησιμοποίησης οπτικών μέσων στις τηλεπικοινωνίες προέκυψε από την ανάγκη μεταφοράς ολοένα και μεγαλύτερων ποσών πληροφορίας. Είναι γνωστή αρχή των τηλεπικοινωνιών ότι η ικανότητα μεταφοράς πληροφορίας μιας πηγής εξαρτάται από τη συχνότητά της, η οποία ονομάζεται **φέρουσα** συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η συχνότητα, τόσο περισσότερη είναι και η πληροφορία που μπορεί να μεταδώσει η πηγή.



Βασικές αλληλεπιδράσεις ύλης – ενέργειας.
 (α) Απορρόφηση: Ένα φωτόνιο ενέργειας E_2-E_1 απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο στη βασική κατάσταση E_1 και μεταβαίνει στην ανώτερη ενεργειακή κατάσταση E_2 .
 (β) Αυθόρμητη εκπομπή: Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο αποδιεγείρεται “αυθόρμητα” εκπέμποντας φωτόνιο ενέργειας (E_2-E_1) . Το φως που προκύπτει εκπέμπεται κατά τελείως τυχαίο τρόπο, δηλ. σε τυχαίες χρονικές στιγμές και σε τυχαίες διευθύνσεις.
 (γ) Εξαναγκασμένη εκπομπή: Ένα φωτόνιο ενέργειας (E_2-E_1) εξαναγκάζει την αποδιέγερση του διεγερμένου ηλεκτρονίου και προκαλεί την εκπομπή δευτερογενούς φωτονίου.



Σχ. 3.3. Εκπομπή φωτός από LED και Laser.

Οι οπτικές πηγές με φέρουσες συχνότητες της τάξης 10^{14} Hz υπερτερούν κατά 4-5 τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις μικροκυματικές πηγές, οι οποίες εκπέμπουν σε συχνότητες μερικών GHz (10^9 Hz). Άρα, τα οπτικά

συστήματα είναι σε θέση να μεταβιβάσουν 10 έως 100 χιλιάδες φορές περισσότερη πληροφορία από τα αντίστοιχα μικροκυματικά και βεβαίως εκατοντάδες εκατομμύρια φορές σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέσο μετάδοσης (λ.χ. χάλκινα καλώδια). Η ανακάλυψη του laser το 1960, σε συνδυασμό με την εξαιρετική ιδιότητα της οπτικής ίνας να “οδηγεί” το φως σε πολύ μακρινές αποστάσεις, επέτρεψαν τη ραγδαία εξέλιξη των οπτικών επικοινωνιών μέσα σε διάστημα λίγων δεκαετιών.

Οι δύο περισσότερο συνηθισμένες οπτικές πηγές είναι οι LED (Light Emitting Diode) και οι Laser. Σκοπός τους είναι να μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα με το οποίο τροφοδοτούνται σε δέσμη φωτός. Με αυτό τον τρόπο η πληροφορία μεταφέρεται από το ρεύμα τροφοδοσίας στη φωτεινή δέσμη. Η πληροφορία, η οποία εμπεριέχεται στις μεταβολές ή διακυμάνσεις του ρεύματος, μετατρέπεται σε μεταβολές των χαρακτηριστικών (λ.χ. της έντασης) της φωτεινής δέσμης.

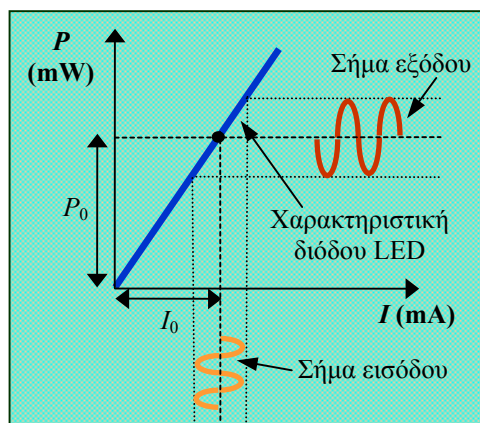
Πηγές LED

Οι LED είναι πηγές σχετικά απλές και βρίσκουν ευρεία χρήση σε ασύρματες υπέρυθρες επικοινωνίες, στα τηλεχειστήρια, σε εφαρμογές ηλεκτρονικής απεικόνισης (φωτεινοί ενδείκτες) κλπ.

Η LED είναι μία ημιαγωγική διάταξη ένωσης $p-n$, η οποία εκπέμπει φως, όταν ο θετικός ακροδέκτης τροφοδοσίας συνδεθεί στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n (αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται **ορθή πόλωση**). Ο μηχανισμός με τον οποίο παράγεται το φως στην ένωση $p-n$ είναι ο εξής: ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, καθώς κινείται προς το θετικό ακροδέκτη, συναντά

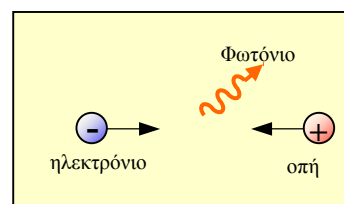
μια αντίθετα κινούμενη οπή στην περιοχή της ένωσης. Τα δύο σωματίδια επανασυνδέονται μεταξύ τους και αποδίδουν ενέργεια υπό μορφή ενός φωτονίου. Η παραγωγή φωτός κατ’ αυτόν τον τρόπο ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή** και χαρακτηρίζει τον τρόπο λειτουργίας των διόδων LED κατά τον οποίο το φως εκπέμπεται ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις στο χώρο.

Παραγωγή φωτός δεν προκύπτει από οποιοδήποτε ημιαγωγό αλλά από συγκεκριμένους ημιαγωγούς. Στους συνηθισμένους ημιαγωγούς των ηλεκτρονικών, δηλ. το πυρίτιο και το γερμάνιο, η επανασύνδεση πραγματοποιείται με απελευθέρωση θερμότητας και όχι φωτός και επομένως οι ημιαγωγοί αυτοί δεν είναι κατάλληλοι για οπτικές



Σχ. 3.8. Χαρακτηριστική οπτικής ισχύος εκπομπής – ρεύματος πόλωσης διόδου LED. Η διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης της LED από το σήμα πληροφορίας, μετατρέπονται από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της οπτικής ισχύος εξόδου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3	
ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ	
ΥΛΙΚΟ (ενεργό στρώμα/ υπόστρωμα)	ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ
GaAlAs/GaAs	750-870 nm
GaAs/GaAs	904 nm
InGaAsP/InP	1100-1650 nm
AlGaAsSb/InGaAsSb	2,0-3,0 μm



Σχ.3.9 Επανασύνδεση ηλεκτρονίου και οπής και εκπομπή φωτονίου

πηγές.

Οι καταλληλότεροι ημιαγωγοί είναι σύνθετοι ημιαγωγοί. Αυτοί προέρχονται από ανάμειξη των στοιχείων αλουμίνιο (Al), γάλλιο (Ga), ή ίνδιο (In) με τα στοιχεία φώσφορο (P), αρσενικό (As), ή αντιμόνιο (Sb), π.χ. GaAsP, GaAlAs ή GaInAsP. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την ακριβή σύνθεση του ημιαγωγού.

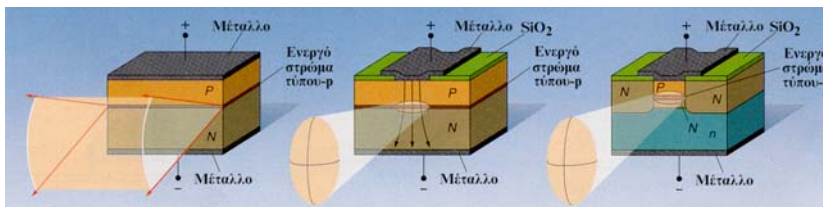
Στον πίνακα 3.3 φαίνονται τα κυριότερα ημιαγωγικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι οπτικές πηγές και το αντίστοιχο μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπουν. Με διαφορετικό χρώμα τονίζονται τα υλικά που δίνουν φως στα μήκη κύματος των οπτικών επικοινωνιών 0,85, 1,3 και 1,55 μm .

Η φωτεινή ισχύς της LED φθάνει τα μερικά mW. Η απόδοση της LED είναι το κλάσμα της ηλεκτρικής ισχύος εισόδου που μετατρέπεται σε φωτεινή ισχύ εξόδου. Η απόδοση αυτή σήμερα είναι της τάξης του 10%. Οι LED μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση πληροφορίας σε ψηφιακή ή αναλογική μορφή μέσα από μια οπτική ίνα. Στην ψηφιακή μετάδοση ο ρυθμός μπορεί να φτάσει μερικές εκατοντάδες Mbit/s. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης της LED από το σήμα πληροφορίας. Η διαμόρφωση είναι η μεταβολή της φωτεινής ισχύος εκπομπής της LED σύμφωνα με τις μεταβολές του ρεύματος οδήγησης που τη διαρρέει. Η δυνατότητα αυτή φαίνεται στο σχ. 3.8 όπου παριστάνεται η οπτική ισχύς εξόδου της LED συναρτήσει του ρεύματος οδήγησης. Η σχέση αυτή είναι μια ευθεία γραμμή, και επομένως οι διακυμάνσεις του ρεύματος μετατρέπονται με γραμμικό τρόπο σε διακυμάνσεις της οπτικής ισχύος εξόδου

Η εξαναγκασμένη εκπομπή δίνει ένα δευτερογενές φωτόνιο που προκύπτει από το αρχικό και έχει την ίδια συχνότητα, φάση και διεύθυνση με αυτό. Τα δύο αυτά φωτόνια μπορούν με τη σειρά τους να παράγουν άλλα δύο με εξαναγκασμένη εκπομπή. Έτσι έχουμε παραγωγή φωτονίων κατά αλυσιδωτή έννοια, και επομένως ενίσχυση του αρχικού οπτικού σήματος το οποίο προήλθε από αυθόρμητη εκπομπή.
Ο όρος *σύμφωνο φως* αναφέρεται ακριβώς στο γεγονός ότι όλα τα φωτόνια που εκπέμπονται τελικά από ένα laser είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους (δηλαδή έχουν την ίδια φάση).

3.4.1 Πηγές laser

Στα συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες οι πηγές που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά είναι τα διοδικά laser ημιαγωγού. Τα πρώτα laser ημιαγωγού κατασκευάστηκαν το 1962, όμως τελειοποιήθηκαν το 1970,



Σχ. 3.10. Διάφοροι τύποι ημιαγωγικών laser.



πομπός ημιαγωγικού laser του εμπορίου.

οπότε και άρχισαν να χρησιμοποιούνται. Ο όρος "laser" προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Ενίσχυση Φωτός από Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας) που δείχνουν

ακριβώς τη δυνατότητα των laser να παράγουν *σύμφωνο φως* εκμεταλλευόμενα την *εξαναγκασμένη ακτινοβολία* μέσα σε ένα υλικό.

Οι πηγές laser είναι παρόμοιες κατασκευαστικά με τις LED (δηλ. είναι και αυτές ενώσεις *p-n*), αλλά διαφέρουν στο ότι το φως παράγεται από *εξαναγκασμένη* (όχι αυθόρμητη) επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών. Επίσης διαθέτουν ανακλαστικά άκρα. Όταν το laser τροφοδοτηθεί με ρεύμα, το φως ανακλάται πολλαπλά εσωτερικώς μεταξύ των ανακλαστικών επιφανειών. Οι πολλαπλές ανακλάσεις των φωτεινών κυμάτων (**οπτική ανατροφοδότηση**) έχουν ως αποτέλεσμα την εξαναγκασμένη αποδιέγερση όλο και περισσότερων ηλεκτρονίων και την ενίσχυση της ακτινοβολίας λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής. Μόλις το ρεύμα αυξηθεί αρκετά, τότε :

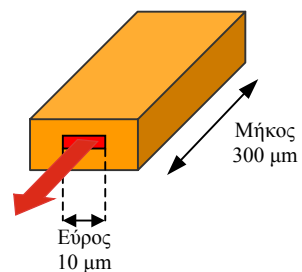
α) η ενίσχυση (απολαβή) ξεπερνά τις εσωτερικές απώλειες του υλικού

β) η φωτεινή δέσμη διαπερνά τα ημιδιαφανή ανακλαστικά άκρα (κάτοπτρα) και

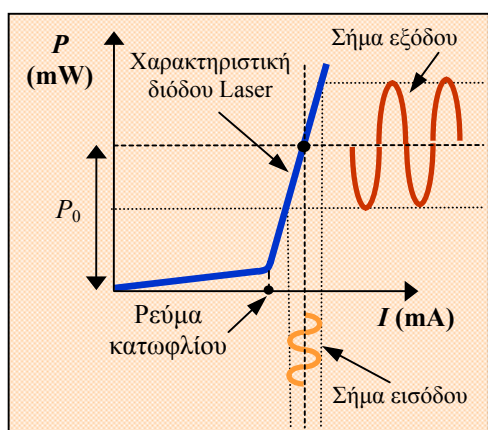
γ) εκπέμπεται μια σχεδόν **μονοχρωματική** φωτεινή δέσμη, εξαιρετικά μεγάλης λαμπρότητας και μεγάλης κατευθυντικότητας.

Η περιοχή γύρω από την ένωση *p-n* στην οποία πραγματοποιείται η παραγωγή σύμφωνου φωτός ονομάζεται **ενεργός περιοχή** ή **ενεργό**

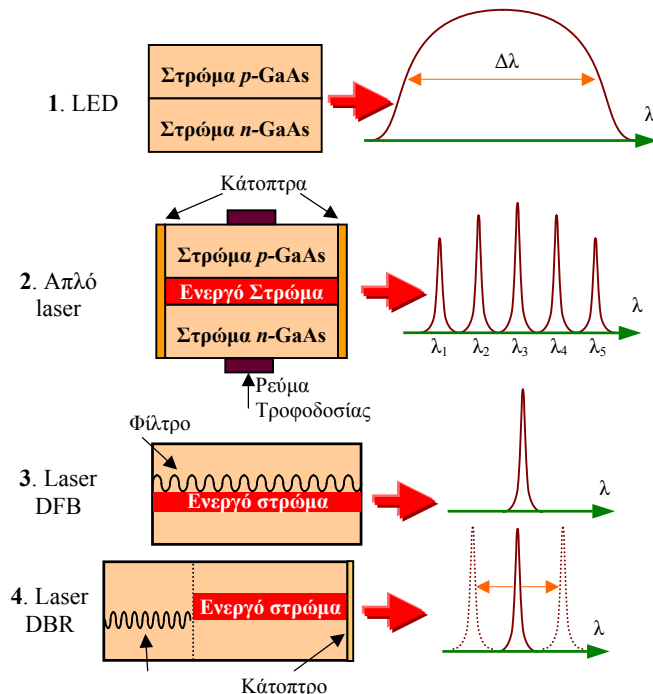
Η αυθόρμητη εκπομπή παράγει *ασύμφωνο φως*, φως που δεν έχει μια αναγνωρίσιμη ημιτονοειδή φύση, αφού αποτελείται από μια ροή φωτονίων με ανεξάρτητη φάση μεταξύ τους. Το φως που προέρχεται από αυθόρμητη εκπομπή εμφανίζει πολύ μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Το είδος αυτό φωτός είναι χαρακτηριστικό μιας θερμικής πηγής, όπως ένας φωτεινός λαμπτήρας ή μιας πηγής αυθόρμητου φωτός όπως η LED.
Η εξαναγκασμένη εκπομπή του laser παράγει σύμφωνο φως σε μία πολύ στενή περιοχή συχνοτήτων (**μονοχρωματικό** φως). Η ιδιότητα ακριβώς αυτή είναι που κάνει τα laser τις πλέον κατάλληλες πηγές για επικοινωνίες με οπτικές ίνες, στις οποίες η αντιμετώπιση του φαινομένου της διασποράς απαιτεί πηγές με στενό φάσμα εκπομπής για την αύξηση της μέγιστης απόστασης διάδοσης.



Τυπικές διαστάσεις του laser ημιαγωγού.



Σχ. 3.11 Χαρακτηριστική οπτικής ισχύος εκπομπής – ρεύματος πόλωσης διόδου Laser. Η διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης της Laser από το σήμα πληροφορίας, μετατρέπεται από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης σε αντίστοιχες διακυμάνσεις της οπτικής ισχύος εξόδου.



Σχ. 3.11. Μήκη κύματος εκπομπής διόδων laser και LED.

στρώμα. Το ρεύμα πάνω από το οποίο παράγεται σύμφωνο φως ονομάζεται **ρεύμα κατωφλίου**.

Οι διαστάσεις των ημιαγωγικών laser “ταιριάζουν” σε αυτές των οπτικών ινών. Το μήκος τους είναι 300-400 μm, ενώ το εύρος της ενεργού περιοχής είναι της τάξης των 10 μm, όσο περίπου και η διάμετρος της ίνας. Η μεγάλη κατευθυντικότητα και η

μονοχρωματικότητα επιτρέπουν την εύκολη εστίαση της δέσμης με φακούς και την αντιμετώπιση του φαινομένου της διασποράς των οπτικών ινών.

Τα laser έχουν ισχύ εκπομπής μέχρι μερικά Watts. Είναι πολύ ισχυρότερα από τις LED και, συνεπώς, έχουν δυνατότητα μετάδοσης σε πολύ πιο μακρινές αποστάσεις μέσα στην ίνα. Η απόδοση των laser είναι σήμερα της τάξης του 30%. Ένα άλλο πλεονέκτημα των laser ως προς τις LED είναι η ικανότητά τους να διαμορφώνονται με ταχύτερους ρυθμούς που σήμερα φθάνουν τα 10 Gbit/s.

Με την πάροδο των ετών, αναπτύχθηκαν πολυάριθμες σχεδιάσεις δομών laser. Η πιο απλή δομή ημιαγωγικού laser, που ήδη εξετάστηκε, περιλαμβάνει δύο κάτοπτρα στα άκρα της. Μια τέτοια δομή όμως εκπέμπει πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα σε μια στενή περιοχή του φάσματος.

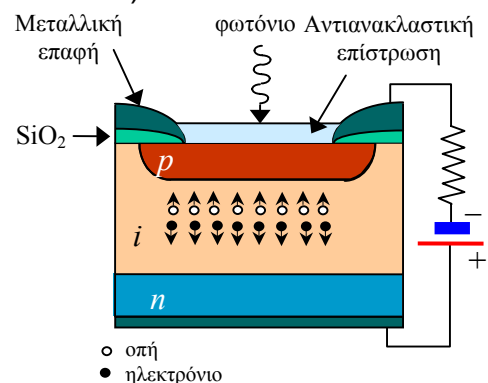
Υπάρχουν όμως και δομές laser για εφαρμογές που απαιτούν εκπομπή σε ένα μόνο μήκος κύματος (δηλ. πολύ στενό φάσμα εκπομπής ή “μονοχρωματική” εκπομπή). Δύο σημαντικές τέτοιες δομές είναι τα laser DFB (**D**istributed **F**eed**B**ack) και DBR (**D**istributed **B**ragg **R**eflector) που χρησιμοποιούν ένα φίλτρο μέσα στον ημιαγωγό, το οποίο επιτρέπει την ανατροφοδότηση του φωτός σε **ένα** μήκος κύματος. Το laser DFB εκπέμπει σε ένα προκαθορισμένο μήκος κύματος, ενώ το laser DBR έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει (ρυθμίζει) το μήκος κύματος εκπομπής μέσα σε μια περιοχή. Αυτό πραγματοποιείται εάν αλλάζουμε τα χαρακτηριστικά του φίλτρου.

3.5 ΦΩΤΟΔΕΚΤΕΣ

Οι φωτοδέκτες ή φωτοφωρατές είναι οι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν ένα φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό. Το φωτεινό σήμα φθάνει συνήθως μέσω μιας οπτικής ίνας και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μορφή, προκειμένου να οδηγηθεί στις επόμενες βαθμίδες ηλεκτρονικής επεξεργασίας.

Ο ιδανικός φωτοδέκτης θα πρέπει να έχει υψηλή απόδοση μετατροπής του φωτός σε ρεύμα (δηλ. υψηλή ευαισθησία) στο μήκος κύματος του φωτός που πρόκειται να ανιχνεύσει (π.χ. 1,3 ή 1,55 μm), να μην προσθέτει θόρυβο στο σήμα, να ανταποκρίνεται στο ρυθμό δεδομένων, να είναι αξιόπιστος και φθηνός και να έχει διαστάσεις συγκρίσιμες με τη διάμετρο του πυρήνα της ίνας. Τις απαιτήσεις αυτές ικανοποιούν οι **φωτοδίοδοι** ημιαγωγού, που χρησιμοποιούνται σήμερα στους δέκτες όλων των οπτικών συστημάτων. Υπάρχουν δύο τύποι φωτοδίοδων ημιαγωγού: η *φωτοδίοδος PIN* και η *φωτοδίοδος χιονοστοιβάδας* (APD: avalanche photodiode).

Η *φωτοδίοδος PIN* αποτελείται από τρία στρώματα. Ένα τύπου *p*, ένα τύπου *n* και μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα φωτοευαίσθητο στρώμα χαμηλής νόθευσης (intrinsic). Σε αυτό το στρώμα πραγματοποιείται η μετατροπή της οπτικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η φωτοδίοδος πολώνεται **ανάστροφα** (δηλ. ο θετικός ακροδέκτης



Σχ. 3.12 . Δομή και συνδεσμολογία μια δίοδου PIN79

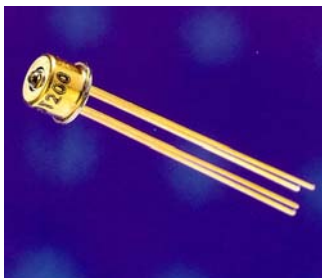
τροφοδοσίας συνδέεται στην περιοχή τύπου-*n* και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου-*p*) με τυπική τιμή τάσης 5V. Όταν πέσει φως πάνω στη φωτοδιόδο, τότε κάθε φωτόνιο απορροφάται και δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Κάτω από την επίδραση της ανάστροφης πόλωσης, τα αντίθετα ηλεκτρικά φορτία ηλεκτρονίου και οπής κινούνται σε αντίθετες διευθύνσεις και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.

Το μήκος κύματος λειτουργίας μιας φωτοδιόδου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της. Το Si είναι κατάλληλο για τα μικρά μήκη κύματος (0,8-0,9 μm), το Ge για το πρώτο “παράθυρο” των οπτικών ινών (1,3 μm) και το InGaAs (Ίνδιο - Γάλλιο - Αρσενικό) για το δεύτερο “παράθυρο” των οπτικών ινών (1,55 μm).

Η σημαντικότερη παράμετρος μιας φωτοδιόδου είναι η *αποκρισιμότητα* *R* (Responsivity) που συσχετίζει το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα *I* με την προσπίπτουσα στη φωτοδιόδο οπτική ισχύ *P*

$$R = \frac{I}{P}$$

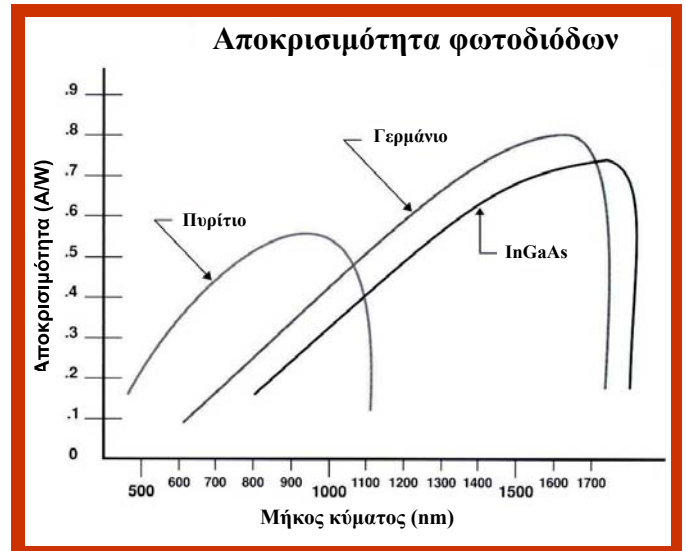
και εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι τυπικές τιμές της αποκρισιμότητας είναι 0,75 – 0,9 A/W.



Φωτοδιόδος PIN.

Σημαντική επίσης ιδιότητα μιας φωτοδιόδου PIN είναι το μεγάλο εύρος φωτεινής ισχύος που μπορεί να ανιχνεύσει. Η φωτοδιόδος μπορεί να ανιχνεύσει φωτεινή ισχύ στην περιοχή από μερικά nWatts μέχρι μερικές δεκάδες mWatts. Σε όλη αυτήν την περιοχή η φωτοδιόδος παράγει ρεύμα **ανάλογο** ($I = R \cdot P$) της προσπίπτουσας φωτεινής ισχύος.

Το ρεύμα εξόδου μιας PIN είναι πολύ ασθενές, της τάξης του μΑ, και επομένως χρειάζεται ενίσχυση πριν διοχετευθεί στις υπόλοιπες βαθμίδες του ηλεκτρονικού δέκτη. Η ενίσχυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενισχυτή με τρανζίστορ FET και έτσι έχουμε το συνδυασμό PIN με τρανζίστορ FET, ο οποίος ονομάζεται με μία λέξη φωτοδέκτης PIN-FET.



Σχ 3.13 Καμπύλες αποκρισιμότητας φωτοδιόδων συναρτήσει του μήκους κύματος του προσπίπτοντος φωτός για υλικά Si, Ge, InGaAs.

3.6 ΟΠΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

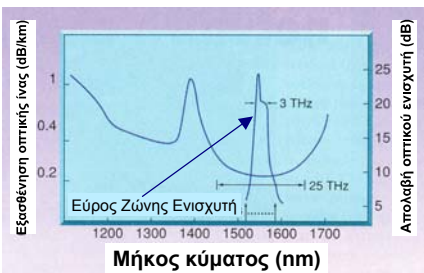
Στα μέχρι πρότινος επίγεια και υποθαλάσσια τηλεπικοινωνιακά συστήματα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων, για την περιοδική ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιούνται **επαναλήπτες-αναγεννητές** οι οποίοι μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, το ενισχύουν ηλεκτρονικά και στη συνέχεια το αναμεταδίδουν σε οπτική μορφή. Η χρήση όμως των επαναληπτών - αναγεννητών έχει τους εξής περιορισμούς:

το θόρυβο της ηλεκτρονικής ενίσχυσης,
το κόστος και το μέγεθος των αναγεννητών,
την ανάγκη συχνής συντήρησής τους και,
την αδυναμία ταυτόχρονης ενίσχυσης πολλών μηκών κύματος μέσα στην ίδια ίνα.

Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστούν όλες οι παραπάνω αδυναμίες είναι να διατηρηθεί το σήμα σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της διαδρομής. Αυτό συνεπάγεται ότι θα πρέπει να γίνεται απευθείας ενίσχυση του οπτικού σήματος, από **καθαρά οπτικούς ενισχυτές**.

Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι με τους οποίους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν οπτικό ενισχυτή:

- α) ως **ενισχυτή ισχύος**, αν τοποθετηθεί αμέσως μετά από το laser εκπομπής για να υψώσει το σήμα εξόδου σε μια υψηλή στάθμη,
- β) ως **ενισχυτή γραμμής**, για να ενισχύει το σήμα περιοδικά κατά μήκος της διαδρομής όπου παίζει το ρόλο αναγεννητή,
- γ) ως **προενισχυτή**, για να βελτιώσει την ευαισθησία του δέκτη.



Σχ. 3.14. Η εξασθένιση στην οπτική ίνα έχει ένα ελάχιστο σε μήκος κύματος 1550 nm, περιοχή στην οποία οι ενισχυτές ίνας προσμείξεων ερβίου εμφανίζουν τη μέγιστη απολαβή τους.

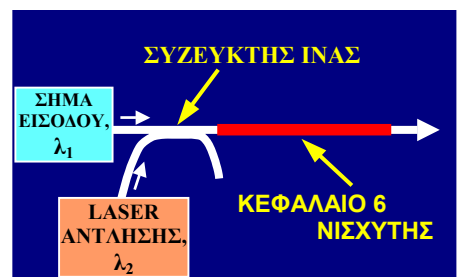
Στην πράξη, υπάρχουν δύο τύποι οπτικών ενισχυτών: οι **ενισχυτές ημιαγωγού** (semiconductor optical amplifiers - SOA) και οι **ενισχυτές με ίνα προσμείξεων ερβίου** (erbium doped fiber amplifiers - EDFA).

Πλεονεκτήματα Οπτικών Ενισχυτών

- Ο **επαναλήπτης-αναγεννητής** λαμβάνει το εξασθενημένο οπτικό σήμα που έχει διαδοθεί μέσα στην ίνα, το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, στη συνέχεια το ενισχύει και το επαναφέρει στην αρχική ψηφιακή μορφή του διορθώνοντας τυχόν λάθη κατά τη μετάδοση. Η επαναφορά αυτή (αναγέννηση) περιορίζει τον επαναλήπτη να λειτουργεί μόνο στο ρυθμό μετάδοσης, για τον οποίο σχεδιάστηκε η ζεύξη. Μετά την αναγέννηση το ηλεκτρικό σήμα μετατρέπεται σε οπτικό και εκπέμπεται στο επόμενο τμήμα του οπτικού καλωδίου. Επομένως, ο επαναλήπτης-αναγεννητής σχεδιάζεται για να λειτουργεί αποκλειστικά σε ένα μήκος κύματος και σε συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης.
- Αντίθετα, ο οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει **οποιοδήποτε μήκος κύματος** (ακόμα και περισσότερα από ένα) σε **οποιοδήποτε ρυθμό μετάδοσης** και έχει μεγάλο εύρος ζώνης. Έτσι, τα συστήματα μετάδοσης μπορούν να αναβαθμίζονται χωρίς να χρειάζεται αντικατάσταση των ενδιάμεσων οπτικών ενισχυτών.

3.6.1 Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού

Οι ενισχυτές ημιαγωγού που κατασκευαστικά μοιάζουν πολύ με τα laser ημιαγωγού, έχουν μικρή κατανάλωση και μπορούν να ολοκληρώνονται μονολιθικά με άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το εύρος ζώνης τους (δηλ. η περιοχή συχνοτήτων την οποία ενισχύουν) είναι της

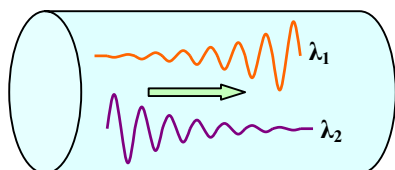


Σχ.3.15 Ενισχυτής ίνας προσμείξεων. Ο συζεύκτης ίνας εισάγει τα δύο μήκη κύματος στον πυρήνα της ίνας προσμείξεων.

τάξης των 35 nm, αλλά με ειδικές ημιαγωγικές δομές έχει φθάσει σήμερα μέχρι 240 nm. Εισάγουν όμως θόρυβο στο σήμα, έχουν σχετικά μεγάλο κόστος και εμφανίζουν διαφωνία μεταξύ των οπτικών σημάτων που ενισχύονται.

3.6.2 Οπτικοί ενισχυτές ίνας προσμείξεων

Οι ενισχυτές αυτοί βασίζονται στην αρχή της ενίσχυσης του φωτός μέσα στην ίνα λόγω νόθευσής της με κατάλληλα υλικά (στοιχεία). Τα άτομα των προσμείξεων βρίσκονται



Σχ.3.16 Στην ίνα προσμείξεων, η ενέργεια από το laser άντλησης (λ_2) μεταφέρεται στο φωτεινό σήμα πληροφορίας (λ_1), ενισχύοντάς το.

στον πυρήνα της ίνας, από τον οποίο διέρχεται και το προς ενίσχυση σήμα εισόδου (με μήκος κύματος λ_1). Στον ίδιο πυρήνα διοχετεύεται και φως υψηλής ισχύος από μια πηγή laser, η οποία ονομάζεται laser άντλησης (με μήκος κύματος λ_2). **Η άντληση είναι η διαδικασία με την οποία δίνεται η αναγκαία ενέργεια σε έναν οπτικό ενισχυτή ή μια πηγή laser, για να λειτουργήσει.** Η άντληση είναι

απαραίτητη για να διεγερθούν τα άτομα του υλικού, ώστε να έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή. Η ενέργεια άντλησης μπορεί να δίνεται α) με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (ενισχυτής ή laser ημιαγωγού) και β) με τη μορφή φωτεινής ακτινοβολίας (ενισχυτής ίνας).

Στον ενισχυτή ίνας τα άτομα προσμείξεων έχουν την εξής ιδιότητα. Απορροφούν φωτεινή ισχύ στο μήκος κύματος λ_2 και την αποδίδουν στο μήκος κύματος λ_1 . Μ' αυτόν τον τρόπο, το σήμα ενισχύεται σε οπτική μορφή, καθώς οδεύει μέσα στην ίνα. Οι πιο συνηθισμένοι ενισχυτές ίνας χρησιμοποιούν μερικά μέτρα ίνας με προσμείξεις του στοιχείου ερβίου (Er) και ενισχύουν φωτεινά σήματα στο μήκος κύματος 1,55 μm των οπτικών επικοινωνιών.

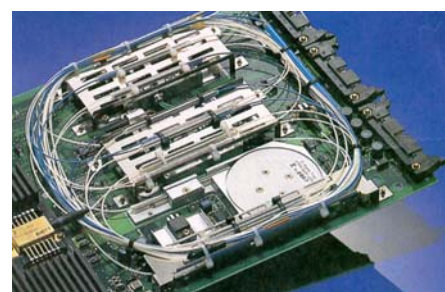
Ως πηγή άντλησης χρησιμοποιείται ένα laser ημιαγωγού, το οποίο εκπέμπει στα 0,98 ή 1,48 μm .

Τυπικές τιμές της ενίσχυσης (απολαβής) ενός ενισχυτή ίνας φθάνουν τα 30 dB με εύρος ζώνης 40 nm.

Οι ενισχυτές ίνας εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως:

- α) απλότητα στην κατασκευή,
- β) ευκολία ζεύξης με τη γραμμή οπτικής ίνας με χαμηλές απώλειες,
- γ) εξάλειψη των φαινομένων διαφωνίας των οπτικών σημάτων που ενισχύονται.

Οπτικοί ενισχυτές ίνας προσμείξεων ερβίου έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πολλές ζεύξεις, όπως στο υπερατλαντικό υποβρύχιο καλώδιο (TAT 12/13), το οποίο συνδέει τη Μεγάλη Βρεταννία, τη Γαλλία και τις Η.Π.Α. με ρυθμό μετάδοσης 10 Gbit/s.



Σχ. 3.17. Οπτικός ενισχυτής ίνας. Στο κάτω αριστερό άκρο διακρίνεται το laser άντλησης.

3.7 ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ

Στην αρχή του κεφαλαίου αναφέρθηκαν δύο ιστορικές ανακαλύψεις στο χώρο της Ηλεκτρονικής: η ανακάλυψη του τρανζίστορ το 1948 και του ολοκληρωμένου κυκλώματος το 1958. Σήμερα, βρισκόμαστε στο ξεκίνημα μιας νέας τεχνολογικής επανάστασης: της **οπτικοηλεκτρονικής ολοκλήρωσης**. **Οπτικοηλεκτρονική ολοκλήρωση είναι η ταυτόχρονη ανάπτυξη οπτικών, ηλεκτρο-οπτικών και ηλεκτρονικών διατάξεων στον ίδιο μονοκρύσταλλο.**

Έτσι, στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα μπορεί να συνυπάρχουν:

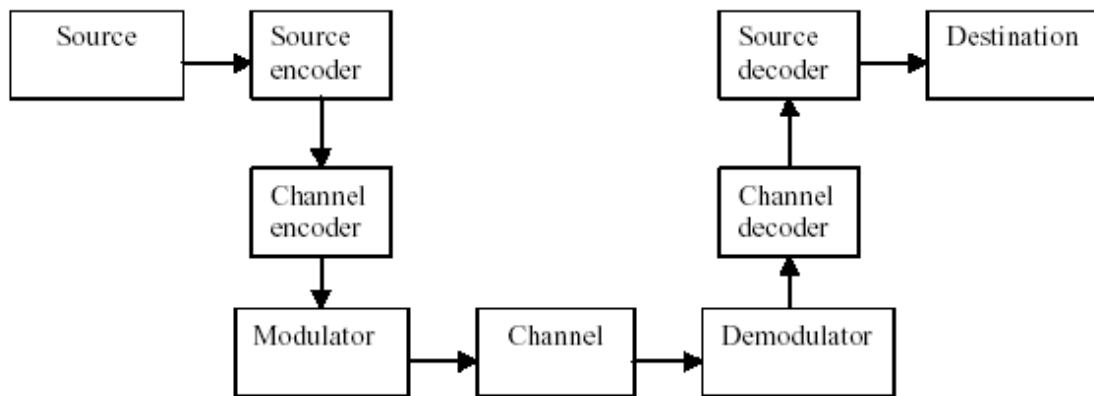
- α) η δίοδος laser,
- β) το ηλεκτρονικό κύκλωμα τροφοδοσίας και διαμόρφωσης της διόδου laser,
- γ) η φωτοδίοδος,
- δ) το κύκλωμα ενίσχυσης της φωτοδίοδου,
- ε) παθητικά φωτονικά κυκλώματα (οπτικά φίλτρα, κλπ.)

Η ολοκλήρωση αυτή επιτρέπει στους σχεδιαστές να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα κάθε ξεχωριστής διάταξης σε μια ενιαία δομή και να προτείνουν δομές με εντελώς νέες δυνατότητες και εφαρμογές. Η οπτικοηλεκτρονική ολοκλήρωση επιτεύχθηκε χάρη στην πρόοδο των διαδικασιών κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Κωδικοποίηση πηγής και καναλιού

Σε ένα σύστημα επικοινωνίας έχουμε μετάδοση δεδομένων από τη πηγή τους σε κάποιον προορισμό (δέκτη), όπως βλέπουμε στο σχήμα 1. Τα δεδομένα στην πηγή υφίστανται επεξεργασία από ένα κωδικοποιητή πηγής, που τα μετασχηματίζει σε μια πιο συμπαγή συμπιεσμένη μορφή. Οι κωδικοποιητές παράγουν στην έξοδό τους κωδικές λέξεις (codewords). Μια κωδική λέξη είναι μια ακολουθία χαρακτήρων από ένα κωδικό αλφάβητο. Οι κωδικές λέξεις που εμφανίζονται στην έξοδο της πηγής (source codewords) είναι ακολουθίες από σύμβολα του κώδικα πηγής. Οι ακολουθίες αυτές κατόπιν οδηγούνται σε ένα κωδικοποιητή καναλιού, όπου μετασχηματίζονται σε κωδικές λέξεις καναλιού (channel codewords). Σε αντίθεση με τους κωδικοποιητές πηγής, όπου σκοπός είναι η συμπίεση της μεταδιδόμενης ακολουθίας, οι κωδικοποιητές καναλιού αυξάνουν το μέγεθος της προς μετάδοση ακολουθίας, προσθέτοντας σε αυτήν bit πλεονασμού (redundancy bits). Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι η προστασία των ψηφιακών δεδομένων από σφάλματα μετάδοσης. Στη συνέχεια ο διαμορφωτής (modulator) μετασχηματίζει τα σύμβολα του κώδικα καναλιού στην τελική μορφή (αναλογικό σήμα) που θα μεταδοθεί στο κανάλι. Κατά τη μετάδοση τους στο κανάλι, τα σήματα υφίστανται διάφορες αλλοιώσεις λόγω φαινομένων όπως θόρυβος, παραμόρφωση και παρεμβολές. Ο αποδιαμορφωτής είναι η μονάδα εκείνη, όπου ανακτάται η πληροφορία της πηγής. Σε πρώτο στάδιο από το μεταδιδόμενο σήμα ανακτώνται τα σύμβολα, που προκύπτουν στην έξοδο του κωδικοποιητή καναλιού στην πηγή. Για να επιτευχθεί αυτό από ένα σήμα, που όπως αναφέραμε παραπάνω, έχει υποστεί πλήθος αλλοιώσεων κατά τη μετάδοση του, απαραίτητα είναι τα bits πλεονασμού. Έπειτα οι μορφές αυτές οδηγούνται στον αποκωδικοποιητή πηγής όπου υφίστανται αποσυμπίεση για να λάβουμε την αρχική μορφή της πληροφορίας.

Σκοπός μας είναι πάντα η πιο αποδοτική μετάδοση των δεδομένων. Λέγοντας αποδοτική εννοούμε, όταν για παράδειγμα έχουμε ένα δεδομένο κανάλι και μια δεδομένη επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας στο δέκτη, τη μετάδοση των δεδομένων στην υψηλότερη δυνατή ταχύτητα. Τα θεωρητικά όρια για την κωδικοποίηση πηγής και καναλιού μας τα παρέχει η θεωρία πληροφοριών. Η θεωρία πληροφοριών αποτέλεσε και τη βάση για τις πρώτες εφαρμογές συμπίεσης δεδομένων. Οι περισσότερες πρακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην κωδικοποίηση καναλιού στηρίζονται στη θεωρία αλγεβρικής κωδικοποίησης. Παρακάτω θα αναφερθούμε μόνο στις πολύ βασικές ιδέες των δύο αυτών τεράστιων σε όγκο θεωριών.



Σχήμα 1: Μπλοκ διάγραμμα ενός καναλιού ψηφιακής επικοινωνίας

4.1 Κωδικοποίηση πηγής: εντροπία και συμπίεση

Η έννοια της πληροφορίας είναι εξαιρετικά ευρεία για να εξαντληθεί σε έναν απλό ορισμό. Η εντροπία είναι ένα μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί για κάθε πιθανοτική κατανομή και έχει πολλές ιδιότητες που βρίσκονται σε συμφωνία με την αντίληψη που έχουμε, βασιζόμενοι στη διαίσθησή μας, για μια μέτρηση της πληροφορίας. Ας θεωρήσουμε X μια διακριτή τυχαία μεταβλητή ενός αλφαβήτου \mathcal{X} με κατανομή πιθανότητας $p(x)=\Pr(X=x)$, x ανήκει στο \mathcal{X} . Η εντροπία $H(X)$ μιας διακριτής τυχαίας μεταβλητής X καθορίζεται από τον τύπο:

$$H(X) = -\sum_x p(x) \log_2 p(x)$$

και μετριέται σε bits. Για μια δυαδική μεταβλητή, όταν $P(x=1)=p$ και $P(x=0)=1-p$, ο παραπάνω τύπος απλοποιείται στον:

$$h(p) = p \log_2 p + (1-p) \log_2 (1-p)$$

Συγκεκριμένα για την περίπτωση της ρίψης ενός νομίσματος (κορώνα-γράμματα) η εντροπία είναι 1. Αυτό προκύπτει απλά από τον παραπάνω τύπο αν θέσουμε $p=0.5$ (ισοπίθανα ενδεχόμενα). Η εντροπία είναι μέγεθος που δεν λαμβάνει αρνητικές τιμές, γιατί αφού $0 \leq p(x) \leq 1$, συνεπάγεται ότι $\log_2 p(x) \geq 0$.

Υποθέστε ότι η τυχαία μεταβλητή X έχει πιθανά αποτελέσματα a, b, c, d με αντίστοιχες πιθανότητες $1/2, 1/4, 1/8, 1/8$. Ένα άτομο A επιλέγει ένα από τα παραπάνω, σύμφωνα με την παραπάνω κατανομή πιθανοτήτων. Ένα άλλο άτομο B πρέπει να βρει το αποτέλεσμα με τον ελάχιστο αριθμό ερωτήσεων. Θα ρωτήσει πρώτα αν είναι το a . Αν ναι, σταματά εκεί, αλλιώς ρωτά «Είναι το b ;», Αν ναι, σταματά εκεί, αλλιώς ρωτάει αν είναι το c . Με τον τρόπο αυτό ο B ξεδιαλύνει την αβεβαιότητα για το αποτέλεσμα με τρεις δυαδικές ερωτήσεις. Ο μέσος αριθμός ερωτήσεων που θα πραγματοποιήσει είναι:

$$0.5 \cdot 1 + 0.25 \cdot 2 + 0.25 \cdot 3 = 1.75$$

Αυτό που είναι ενδιαφέρον στο παραπάνω παράδειγμα είναι ότι η εντροπία έχει την ίδια τιμή, δηλαδή $H(X) = 1.75$. Γενικά ο ελάχιστος αναμενόμενος αριθμός δυαδικών ερωτήσεων είναι μεταξύ $H(X)$ και $H(X) + 1$.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να καθορίσουμε το θεμελιώδες όριο συμπίεσης της πληροφορίας. Η συμπίεση δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί περιγράφοντας τα πιο συχνά αποτελέσματα με δυαδικές ακολουθίες μικρού μήκους και με δυαδικές ακολουθίες μεγαλύτερου μήκους τα λιγότερο συχνά. Παρακάτω εξηγούμε την περίφημη κωδικοποίηση του Huffman, με την οποία βρίσκονται τα ελάχιστα μήκη δυαδικών ακολουθιών που αναπαριστούν δεδομένα

Ένας κώδικας πηγής C για μια τυχαία μεταβλητή X είναι μια αντιστοίχιση από τη κλίμακα X στην αντίστοιχη Y^* , όπου Y^* το σύνολο των ορισμένου μήκους ακολουθιών από ένα s -αδικό αλφάβητο, π.χ. $Y^* = \{y_1, y_2, \dots, y_s\}$. Έστω $C(x)$ η κωδική λέξη που αντιστοιχεί στη x και έστω $l(x)$ το μήκος της $C(x)$. Το αναμενόμενο μήκος $L(C)$ ενός κώδικα μιας πηγής C για μια τυχαία μεταβλητή με πυκνότητα πιθανότητας $p(x)$, δίνεται από τον τύπο

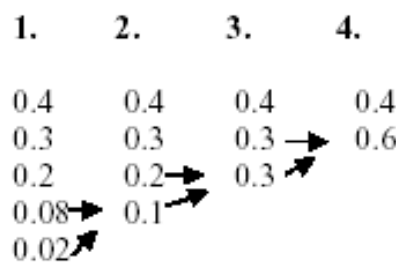
$$L(C) = \sum_x p(x) l(x).$$

Για το αριθμητικό παράδειγμα που αναλύσαμε παραπάνω, κατά Huffman η πηγή μπορεί να κωδικοποιηθεί ως $C = \{0, 10, 110, 111\}$, όπου $C(a) = 0$, $C(b) = 10$, $C(c) = 110$, $C(d) = 111$, και $L(C) = 1.75$.

Ένας κώδικας καλείται κώδικας προθέματος (prefix code) αν δεν υπάρχει κωδική λέξη η οποία να αποτελεί πρόθεμα άλλης κωδικής λέξης. Ο κώδικας του παραπάνω παραδείγματος είναι κώδικας προθέματος. Στην περίπτωση που έχουμε κώδικα προθέματος, ένα άτομο μπορεί από ένα σύνολο κωδικών λέξεων συνενωμένων (concatenated) σε μια μακριά ακολουθία, να ξεχωρίσει κάθε κωδική λέξη και κατόπιν να προχωρήσει στην αποκωδικοποίησή τους. Συνεπώς, ένας κώδικας προθέματος είναι ένας μοναδικά αποκωδικοποιήσιμος κώδικας. Για έναν τυχαίο τέτοιο κώδικα C , το αναμενόμενο μήκος κωδικής λέξης δε μπορεί να είναι μικρότερο από $H(X)/\log_2 s$. Ο αλγόριθμος για την εύρεση του βέλτιστου μοναδικά αποκωδικοποιήσιμου κώδικα είναι γνωστός: ο κώδικας Huffman. Η εφαρμογή του δίνει μέσο μήκος κωδικής λέξης ανάμεσα σε $H(X)$ και $H(X)+1$:

$$H(X)/\log_2 s \leq L(C) < H(X+1)/\log_2 s + 1$$

Για καλύτερη κατανόηση παραθέτουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα, για μια τυχαία μεταβλητή X με κατανομή πιθανοτήτων : {0.4, 0.3, 0.2, 0.08, 0.02}.



Συνδυάζουμε τα 2 λιγότερο πιθανά σύμβολα σε ένα σύμβολο, έως ότου τελικά μείνουμε με ένα μόνο σύμβολο και μετά αντιστοιχίζουμε κωδικές λέξεις στα σύμβολα ξεκινώντας από το βήμα 4 προς τα πίσω. Πρώτα αντιστοιχίζουμε την κωδική λέξη $C(x_1)=0$ στην πιθανότητα 0.4 και το πρόθεμα 1 σε όλες τις άλλες πιθανότητες της κατανομής. Το πρόθεμα επιμηκύνεται με το bit 0 και έχουμε την $C(x_2)=10$ με πιθανότητα 0.3 στο βήμα 3. Το άλλο τμήμα του 0.6, με πιθανότητα 0.3 πάλι, αποκτά πρόθεμα 11. Στο βήμα 2 το πρόθεμα 11 επιμηκύνεται με το bit 0 και έχουμε $C(x_3)=110$ και το πρόθεμα 111 στο βήμα 1 επιμηκύνεται με bits 0 και 1 δίνοντας τις κωδικές λέξεις $C(x_4)=1110$ και $C(x_5)=1111$ αντίστοιχα.

Το πλεονέκτημα του αυτοσυγχρονισμού των κωδικών προθέματος αποτελεί ταυτόχρονα και μειονέκτημα όταν μεταδίδονται μέσω ενός καναλιού με θόρυβο, που οδηγεί σε αλλοιώσεις του σήματος που φτάνει στο δέκτη. Μπορεί, στην περίπτωση

αυτή, η απώλεια συγχρονισμού σε ένα σημείο μιας ακολουθίας bits, να οδηγήσει σε λανθασμένη αποκωδικοποίηση όλων των επόμενων κωδικών λέξεων. Αν αντίθετα χρησιμοποιήσουμε κώδικα, όπου οι κωδικές λέξεις έχουν σταθερό μήκος, το πρόβλημα αυτό εξαλείφεται. Δυστυχώς όμως, ένας μοναδικά αποκωδικοποιήσιμος κώδικας με σταθερό μήκος δε μας δίνει δυνατότητα για συμπίεση. Κατά συνέπεια πρέπει να εγκαταλείψουμε την μονοσήμαντη αποκωδικοποίηση, αν θέλουμε να έχουμε σταθερό μήκος λέξεων παράλληλα με δυνατότητα για συμπίεση. Δεχόμαστε τότε την παραμόρφωση που εισάγει μια συμπίεση αυτής της μορφής. Η παραμόρφωση αυτή δεν είναι αποδεκτή για περιπτώσεις συμπίεσης (π.χ. program codes) αλλά είναι αποδεκτή για πηγές φωνής ή εικόνας, μέσα σε κάποια καθορισμένα όρια ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS).

4.2 Κωδικοποίηση Καναλιού

4.2.1 Βασικές έννοιες

Θεωρείστε δεδομένα που αναπαρίστανται ως δυαδική πληροφορία. Ένας δυαδικός κώδικας μεγέθους M και μήκους ακολουθίας n είναι ένα σύνολο M δυαδικών λέξεων, γνωστές και ως κωδικές λέξεις καναλιού (channel codewords).

Συνήθως $M=2^k$, όπου k ακέραιος. Μια τέτοια περίπτωση έχουμε όταν ένα block από k bits κώδικα πηγής, που θα το καλούμε από εδώ και πέρα μήνυμα (message), ενσωματώνεται σε μια κωδική λέξη. Ο κώδικας αναφέρεται, τότε, σαν ένας (n,k) δυαδικός κώδικας. Για παράδειγμα ένας $(5,2)$ δυαδικός κώδικας,

$$C = \{00000, 10101, 01111, 11010\} \quad (1)$$

αποτελείται από τέσσερις κωδικές λέξεις, όπου ζευγάρια bits κώδικα πηγής ενσωματώνονται σε δύο κωδικές λέξεις καναλιού. Γενικά μπορούμε να ορίσουμε κώδικες πάνω σε ένα αυθαίρετο αλφάβητο από q σύμβολα $\{0,1,2,\dots,q-1\}$. Στην περίπτωση που είναι $q=2$, έχουμε δυαδικό αλφάβητο.

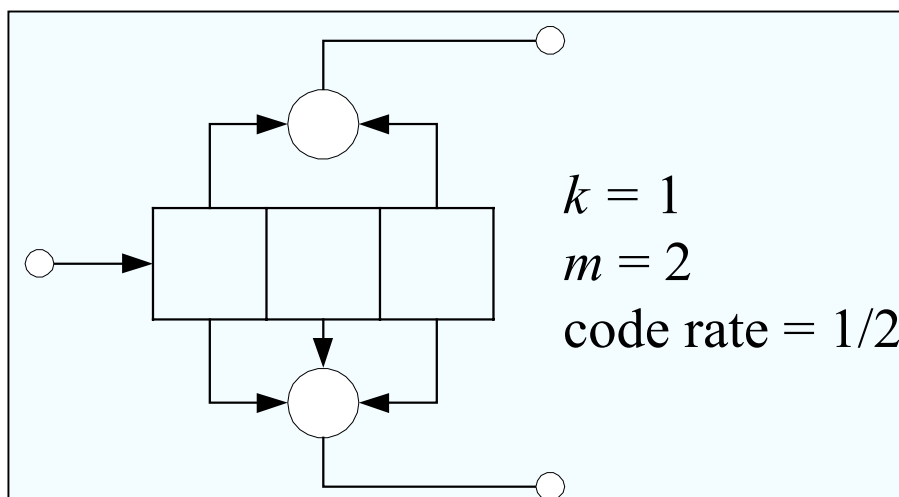
Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες κωδικών καναλιού: **κώδικες μπλοκ** και **συνελικτικοί (convolutional) κώδικες**. Ο κώδικας που είδαμε παραπάνω είναι ένας κώδικας block. Η ακολουθία που εξάγεται από την πηγή χωρίζεται σε ομάδες (blocks) μηνυμάτων που αποτελούνται από k bits το καθένα. Το block που παράγεται στην

έξοδο εξαρτάται μόνο από το μπλοκ εισόδου. Ο ρυθμός R ενός κώδικα block είναι ορίζεται ως εξής:

$$R=k/n, \quad 0 \leq R \leq 1$$

Όσο υψηλότερος είναι ένας ρυθμός τόσο λιγότερο πλεονασμό έχουμε. Οι συνελκτικοί κώδικες είναι περισσότερο πολύπλοκοι. Σε αντίθεση με τους κωδικες block που συγκεντρώνουν τα εισερχόμενα bits σε ομάδες (blocks) και παραγουν μεγαλύτερες ομάδες στην εξοδο τους, οι συνελκτικοι κωδικες μεταχειριζονται τα δεδομενα εισοδου σαν μια συνεχη ακολουθια δεδομενων. Για καθε k bits στην εισοδο, ο κωδικοποιητης παραγει m bits στην εξοδο

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε έναν συνελκτικό κωδικοποιητή που χρησιμοποιει το τρεχον bit και τα δυο προηγουμενα.



Σχήμα 2 : Συνελκτικός κωδικοποιητής

Ο ρυθμός R ενός συνελκτικού κώδικα είναι:

$$R=k/m, \quad 0 \leq R \leq 1$$

Οι κώδικες block καθορίζονται από τρεις βασικές παραμέτρους : το μήκος της ομάδας n , το μήκος του μηνύματος k και την ελάχιστη απόσταση κώδικα d_{min} .

Ένας τέτοιος κώδικας συμβολίζεται ως $C(n,k, d_{min})$. Η απόσταση Hamming $d(x,y)$ μεταξύ δύο κωδικών λέξεων είναι ο αριθμός των θέσεων στις οποίες διαφέρουν. Η ελάχιστη

απόσταση κώδικα ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση Hamming ανάμεσα στα δυνατά ζευγάρια κωδικών λέξεων. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε τον κώδικα (1), έχει $d_{min}=3$. Ας υποθέσουμε ότι ο κώδικας έχει μεταδοθεί και ο δέκτης έχει λάβει τη λέξη r :

$$(r_0, r_1, \dots, r_{n-1}) = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) + (e_0, e_1, \dots, e_{n-1})$$

, όπου η διαφορά μεταξύ r και c ονομάζεται διάνυσμα σφάλματος (error vector). Για παράδειγμα έστω ότι έχει μεταδοθεί η κωδική λέξη 01111 και ο δέκτης έχει λάβει τη λέξη 01011. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ένα σφάλμα στο τρίτο δυαδικό ψηφίο της κωδικής λέξης και το διάνυσμα σφάλματος είναι $e=(00100)$.

Οι δύο βασικοί λόγοι που χρησιμοποιούμε κώδικες καναλιού είναι η ανίχνευση σφαλμάτων και η διόρθωση σφαλμάτων. Η ανίχνευση σφάλματος σημαίνει ότι ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να «καταλαβαίνει» αν η ληφθείσα κωδική λέξη είναι σφάλμα, δηλαδή διαφέρει από τη κωδική λέξη που μεταδώσαμε. Στην περίπτωση που ο δέκτης ανιχνεύει σφάλμα, ζητάει από τον πομπό την επανάληψη της μετάδοσης της κωδικής λέξης, έως ότου αυτή φτάσει στο δέκτη χωρίς σφάλματα. Η διόρθωση σφάλματος, από την άλλη πλευρά, αποσκοπεί στην ελάττωση των σφαλμάτων χωρίς να χρειάζεται επαναμετάδοση της κωδικής λέξης.

Γίνεται εύκολα κατανοητό ότι αν ένας κώδικας έχει ελάχιστη απόσταση d_{min} , τότε έχει την ικανότητα να ανιχνεύει $t_{det} = d_{min} - 1$ σφάλματα. Αν η μεταδιδόμενη κωδική λέξη έχει αλλοιωθεί σε λιγότερες θέσεις από την αποστάση της από την πλησιέστερη σε αυτή κωδική λέξη, η λαμβανόμενη λέξη θα διαφέρει από κάθε άλλη κωδική λέξη, συνεπώς το σφάλμα ανιχνεύεται. Στην περίπτωση του κώδικα (1) μπορούμε να ανιχνεύσουμε μέχρι και δύο σφάλματα.

Ομοίως, ένας κώδικας που έχει ελάχιστη απόσταση d_{min} , έχει την ικανότητα να διορθώνει $t_{corr} = \text{int}[(d_{min}-1)/2]$ σφάλματα, όπου η συνάρτηση $\text{int}(x)$ δίνει το μεγαλύτερο ακέραιο, που είναι μικρότερος ή ίσος του x . Για την εύρεση της μεταδιδόμενης κωδικής λέξης, γίνεται ανίχνευση της κωδικής λέξης με την ελάχιστη απόσταση από τη ληφθείσα, μέχρι να βρεθεί η κωδική λέξη που προσεγγίζει τη μεταδιδόμενη περισσότερο από όλες τις άλλες.

Θεωρούμε μια μη-δυναδική ακολουθία κώδικα, για την οποία γνωρίζουμε τη θέση των σφαλμάτων, αλλά όχι την τιμή τους. Ένα τέτοιο σφάλμα είναι γνωστό με την ονομασία διαγραφή (erasure). Αν ο κώδικας έχει ελάχιστη απόσταση d_{\min} , τότε έχει την ικανότητα να διορθώνει $t_{\text{eras}}=d_{\min}-1$ διαγραφές. Αν η μεταδιδόμενη κωδική λέξη εμφανίζει διαγραφές σε μικρότερο αριθμό ψηφίων από τον αριθμό ψηφίων που διαφέρει από την πλησιέστερη σε αυτήν κωδική λέξη, ένα τμήμα της κωδικής λέξης ανασκευάζεται από τα μη διαγραμμένα ψηφία που ταιριάζουν καλύτερα στη μεταδιδόμενη κωδική λέξη. Στην περίπτωση του κώδικα (1) μπορούμε να διορθώσουμε μέχρι δύο διαγραφές.

Ο απλούστερος κώδικας ανίχνευσης σφάλματος είναι ο **κώδικας ελέγχου απλής ισοτιμίας (simple parity check code)**, $C(n, n-1, 2)$, $q=2$. Ένα bit ισοτιμίας προστίθεται στο μήνυμα. Αυτός ο κώδικας είναι ικανός να ανιχνεύει ένα μοναδικό σφάλμα. Για παράδειγμα ο κώδικας $C=\{0000, 0011, 0101, 0111, 1001, 1010, 1100, 1110\}$, έχει παραμέτρους $C(4,3,2)$.

Ο απλούστερος κώδικας διόρθωσης σφάλματος είναι ο **κώδικας απλής επανάληψης (simple repetition code)**, $C(n, 1, n)$, $q=2$. Αυτός ο κώδικας αποτελείται από δύο μόνο κωδικές λέξεις, η μια με όλα τα ψηφία της 0 και η άλλη με όλα 1. Το μήνυμα είναι ίσο με ένα bit: αν είναι 0 τότε μεταδίδεται η κωδική λέξη που αποτελείται μόνο από μηδενικά. Για παράδειγμα ο κώδικας $C=\{00000, 11111\}$ έχει παραμέτρους $C(5,1,5)$ και μπορεί να διορθώσει 2 σφάλματα, ή να ανιχνεύσει 4. Ο ρυθμός του είναι χαμηλός: $R=1/5$.

Ο **διδιάστατος κώδικας ελέγχου ισοτιμίας (2-dimensional parity check code)**, είναι εξίσου απλός, αλλά εμφανίζει βελτιωμένη αποδοτικότητα. Το μήνυμα τοποθετείται μέσα σε έναν πίνακα. Οι στήλες και οι γραμμές του πίνακα επιμηκύνονται κατά το αντίστοιχο bit ισοτιμίας: θεωρήστε, για παράδειγμα, έναν μεγέθους 3×3 πίνακα μηνύματος:

1	1	0	0
0	1	1	0
1	1	1	1
0	1	0	1

Σχήμα 3: Διδιάστατος κώδικας ελέγχου ισοτιμίας

Και προσθέστε μια 4^n γραμμή και μια 4^n στήλη από bits ισοτιμίας. Το bit στη κάτω δεξιά γωνία καλείται ισοτιμία των ισοτιμιών (parity of parities), το οποίο μπορεί ισοδύναμα να υπολογιστεί ως την ισοτιμία της γραμμής με bits ισοτιμίας με την ισοτιμία της στήλης με bits ισοτιμίας. Αυτός ο κώδικας έχει απόσταση 4, κατά συνέπεια είναι ικανός να διορθώσει ένα σφάλμα. Ο αλγόριθμος διόρθωσης είναι επίσης πολύ απλός: οι ενδείξεις (indices) της γραμμής με τις αντίστοιχες της στήλης με σφάλμα ισοτιμίας σηματοδοτούν την είσοδο με σφάλμα.

4.2.2 Μη δυαδικές περιπτώσεις

Οι σύγχρονοι αλγεβρικοί κώδικες χρησιμοποιούν εκτενώς εργαλεία από την άλγεβρα. Ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία συνδέεται με τα πεπερασμένα πεδία (finite fields). Ένα πεδίο είναι ένα σύνολο F με ορισμένες τις πράξεις της πρόσθεσης και του πολλαπλασιασμού, ώστε να ικανοποιούν τις γνωστές μας ιδιότητες, της προσεταιριστικότητας (associativity) και της αντιμεταθετικότητας (commutativity), της επιμεριστικής ιδιότητας, της ύπαρξης μιας ουδέτερου προσθετικού στοιχείου (0) και ουδέτερου πολλαπλασιαστικού στοιχείου (1) και τέλος της ύπαρξης αντιστρώφων, τόσο για τον πολλαπλασιασμό όσο και για την πρόσθεση, για όλα τα στοιχεία του συνόλου πλην του στοιχείου 0. Τα επόμενα πεδία είναι βασικά σε πολλές περιοχές των μαθηματικών: (1) το πεδίο Q που αποτελείται από όλους τους λογικούς αριθμούς. (2) το πεδίο R των πραγματικών αριθμών. (3) το πεδίο C των μιγαδικών αριθμών. (4) το περιορισμένο πεδίο $GF(q)$ είναι μια αλγεβρική δομή με q στοιχεία. Ο αριθμός των στοιχείων μπορεί να είναι μόνο ένας πρώτος αριθμός, ή μια δύναμη ενός πρώτου αριθμού, $q=p^m$.

Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν $q=p$, όταν δηλαδή $m=1$. Για παράδειγμα θεωρήστε τον κώδικα $GF(5)$. Υπάρχουν 5 στοιχεία σε αυτό το πεδίο : 0,1,2,3,4. Η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός εκφράζονται με modulo 5, π.χ. $3+4=5+2=2 \pmod{5}$. Ο αντίστροφος του 4 είναι ο 4 γιατί : $4*4=16=3*5+1 \pmod{5}$. Η απλούστερη περίπτωση είναι η $GF(2)$, με το συνήθες modulo 2. Το πεδίο $GF(p)$ μπορεί να επεκταθεί στη γενική περίπτωση που $m>1$. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αλλά περιέχει πολύπλοκα μαθηματικά που ξεφεύγουν από τους σκοπούς αυτού του συγγράματος, συνεπώς δε θα επεκταθούμε περαιτέρω.

4.2.3 Γραμμικοί block κώδικες

Αν ένας γραμμικός συνδυασμός κωδικών λέξεων από έναν κώδικα $C(n, k, d_{\min})$, $GF(q)$ καταλήγει σε μια κωδική λέξη του ίδιου κώδικα, καλούμε τον κώδικα C γραμμικό. Ένα γραμμικός block κώδικας είναι ένα γραμμικός υποχώρος του γραμμικού χώρου όλων των q -αδικών διανυσμάτων με μήκος n . Υπάρχουν q^k κωδικές λέξεις, συνεπώς αυτός ο κώδικας έχει, ως γραμμικός υποχώρος, διάσταση k .

Οι γραμμικοί κώδικες μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια των πινάκων: τη **γεννήτρια πινάκων** και τον **πίνακα ελέγχου ισοτιμίας**. Η γεννήτρια πινάκων G έχει διάσταση $k \times n$, όπου οι γραμμές είναι γραμμικά ανεξάρτητες κωδικές λέξεις (ένα σύνολο διανυσμάτων είναι γραμμικά ανεξάρτητο, αν όλοι οι μη μηδενικοί γραμμικοί συνδυασμοί τους δε μπορούν να μας δώσουν μηδενικό διάνυσμα). Οι γραμμές του πίνακα συνδυαζόμενες με τα διανύσματα βάσης παράγουν τις κωδικές λέξεις:

$$(c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) = (m_0, m_1, \dots, m_{n-1}) * G$$

, όπου τα στοιχεία του διανύσματος $m = (m_0, m_1, \dots, m_{n-1})$, συνδυάζονται γραμμικά με τις γραμμές της G , δίνοντας τη κωδική λέξη c .

Ο πίνακας ελέγχου ισοτιμίας (parity check matrix) H έχει διάσταση $(n-k) \times n$. Έχει την παρακάτω ιδιότητα: για αυθαίρετη κωδική λέξη c από κώδικα C ισχύει $Hc^T=0$, όπου c^T δηλώνει τη μετάβαση από το διάνυσμα γραμμή c , το οποίο σημαίνει ότι οι κωδικές λέξεις και μόνον αυτές είναι ορθογώνιες στις γραμμές του πίνακα H . Ο πίνακας H συμβάλλει στην αποκωδικοποίηση των γραμμικών κωδίκων, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω.

Σε έναν κώδικα όπου οι κωδικές λέξεις έχουν τη δομή $c=(m_0, m_1, \dots, m_{k-1}, p_0, p_1, \dots, p_{n-k-1})$, τα μηνύματα εμφανίζονται καθαρά σαν τμήματα της κωδικής και ονομάζεται συστηματικός. Το άλλο τμήμα της κωδικής λέξης είναι το τμήμα της ισοτιμίας. Οι συστηματικοί κώδικες είναι πρακτικοί: αφού ο αποκωδικοποιητής έχει καταλήξει στην μεταδιδόμενη κωδική λέξη, ο υπολογισμός του αντίστοιχου μηνύματος είναι ιδιαίτερα απλός, «κόβοντας» το πρόθεμα από την αποκωδικοποιημένη λέξη.

Αν λάβουμε υπόψη μας τον κώδικα (1) είναι εύκολο να επαληθεύσουμε ότι:

$$G = \begin{pmatrix} 10101 \\ 01111 \end{pmatrix} \text{ and } H = \begin{pmatrix} 11100 \\ 01010 \\ 11001 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Εύκολα διαπιστώνεται ότι για γραμμικούς κώδικες η ελάχιστη απόσταση κώδικα είναι ίση με το ελάχιστο βάρος του κώδικα Hamming για μη μηδενικές κωδικές λέξεις. Αυτό απορρέει από τα παρακάτω: α) Λόγω της γραμμικότητας, η διαφορά μεταξύ δύο κωδικών λέξεων είναι μια κωδική λέξη β) Η απόσταση Hamming είναι το βάρος Hamming της διαφοράς γ) Κάθε κωδική λέξη μπορεί να περιγραφεί σαν μια διαφορά, απλά αφαιρώντας τη μηδενική κωδική λέξη από αυτή. Αυτή η σημαντική ιδιότητα λοιπόν, απλοποιεί κατά πολύ τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης.

Είναι εύκολο να δοθεί ένα κατώτερο όριο για την ελάχιστη απόσταση κώδικα, χάρη σε μια απλή ιδιότητα του πίνακα ελέγχου ισοτιμίας: ο ελάχιστος αριθμός γραμμικά εξαρτημένων στηλών δίνει το κατώτερο όριο για το d_{\min} . Αν θεωρήσουμε τον πίνακα H όπως στην (2), μπορούμε να δούμε ότι δύο αυθαίρετα επιλεγμένες στήλες είναι γραμμικά ανεξάρτητες και χρειαζόμαστε τουλάχιστον τρεις από αυτές, για να προκύψει γραμμικός συνδυασμός ίσος με μηδέν. Για παράδειγμα το άθροισμα των στηλών 0,2 και 4 δίνει μηδέν. Συνεπώς, η ελάχιστη απόσταση κώδικα είναι τουλάχιστον 3 (η οποία όπως γνωρίζουμε είναι ακριβώς 3).

Σύμφωνα με αυτό το θεώρημα, δίνεται παρακάτω ο πίνακας ελέγχου ισοτιμίας του γνωστού μας κώδικα Hamming $C(7,4,3)$ $GF(2)$:

$$H = \begin{pmatrix} 0111100 \\ 1011010 \\ 1101001 \end{pmatrix} \quad (3)$$

4.2.4 Κυκλικοί γραμμικοί block κώδικες

Ένας γραμμικός κώδικας $C(n,k, d_{\min})$, $GF(q)$ ο οποίος έχει την ιδιότητα, ότι η αυθαίρετη εναλλαγή (cyclic permutation) των ψηφίων μιας γραμμικής λέξης σχηματίζει μια γραμμική λέξη του ίδιου κώδικα, ονομάζεται κυκλικός. Οι κυκλικοί γραμμικοί κώδικες

περιγράφονται καλύτερα μέσω πολυωνύμων. Κάνουμε την ακόλουθη μοναδική αντιστοίχιση:

$$c = (c_0, c_1, \dots, c_{n-1}) \quad \longleftrightarrow \quad c(x) = c_0 + c_1 x + \dots + c_{n-1} x^{n-1}$$

Όπως είπαμε και παραπάνω, οι κυκλικοί γραμμικοί κώδικες μπορούν να περιγραφούν από πολυώνυμο: το πολυώνυμο γεννήτρια $g(x)$, και πολυώνυμο ελέγχου ισοτιμίας, $h(x)$. Το πολυώνυμο $g(x)$ έχει βαθμό $n-k$, το πολυώνυμο $h(x)$ έχει βαθμό k . Χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια $g(x)$ μπορούμε να παράγουμε κωδικές λέξεις σε πολυωνυμική μορφή:

$$c(x) = m(x)g(x) \quad (4)$$

, όπου $m(x) = m_0 + m_1 x + \dots + m_{n-1} x^{n-1}$ είναι το μήνυμα σε πολυωνυμική μορφή. Μεταξύ των πολυωνύμων $g(x)$ και $h(x)$ υπάρχει η απλή σχέση : $g(x)h(x) = x^n - 1$. Ο γνωστός μας κυκλικός γραμμικός κώδικας Hamming με παραμέτρους $C(7,4,3) GF(2)$ έχει πίνακα γεννήτρια $g(x) = x^3 + x + 1$. Για παράδειγμα, το μήνυμα $m = (1011) \longleftrightarrow m(x) = 1 + x^3 + x^4$, κωδικοποιείται στη κωδική λέξη $c(x) = 1 + x + x^5 + x^6 + x^7 \longleftrightarrow c = (1,1,0,0,0,1,1,1)$. Η παραγωγή (generation) κωδικών λέξεων (4) είναι μη-συστηματική. Η συστηματική παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί με τον εξής τρόπο: υπολογίζουμε το πολυωνυμικό υπόλοιπο:

$$r(x) = -x^{n-k}m(x) \bmod g(x) \quad (5)$$

, το οποίο δίνει τη ζητούμενη συστηματική κωδική λέξη:

$$c(x) = x^{n-k}m(x) + r(x) \quad (6)$$

Η παραγωγή (6) είναι η μαθηματική έκφραση της CRC (Cyclic Redundancy Check) παραγωγής: η πολυωνυμική $g(x)$ καλείται CRC πολυωνυμική παραγωγή.

4.2.5 Κώδικας Reed-Solomon

Οι κώδικες Reed-Solomon είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί μη-δυναδικοί κυκλικοί γραμμικοί block κώδικες. Το πολυώνυμο γεννήτρια του κώδικα Reed-Solomon $C(n,k,d_{\min})$, $GF(q)$, $n=q-1$ μπορεί να δοθεί από:

$$g(x) = (x-a)(x-a^2) \dots (x-a^{n-k+1}) \quad (7)$$

όπου a ανήκει στο $GF(q)$ και έχει τάξη n , που σημαίνει ότι το n είναι ο μικρότερος θετικός ακέραιος για τον οποίο $a^n = 1$. Οι κώδικες Reed-Solomon είναι βέλτιστοι, γιατί είναι MDS (Maximum Distance Separable) κώδικες:

$$d_{\min} = n - k + 1$$

, η οποία είναι η μέγιστη δυνατή απόσταση, όταν το μήκος ιστοιμίας $n - k$ είναι δοσμένο. Για παράδειγμα, ένας κώδικας Reed Solomon $C(12, 8, 5)$, $GF(13)$ μπορεί να παραχθεί από :

$$g(x) = (x-2)(x-4)(x-8)(x-3)$$

Ο κώδικας αυτός μπορεί να διορθώσει έως 2 σφάλματα μετάδοσης. Μια πρακτική ρύθμιση παραμέτρων είναι : $C(255, 255 - 2t, 2t + 1)$, $GF(256)$, όπου t είναι η ζητούμενη ικανότητα διόρθωσης και ο κώδικας χρησιμοποιεί αλφάβητο byte.

4.2.6 Οι γενικές ιδέες πίσω από την αποκωδικοποίηση

Ο αποκωδικοποιητής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα λανθασμένης αποκωδικοποίησης. Η βέλτιστη προσέγγιση είναι η **αποκωδικοποίηση μέγιστης πιθανοφάνειας** (*maximum likelihood (ML) decoding*). Υποθέστε ότι γνωρίζουμε ένα πιθανοτικό μοντέλο του καναλιού, από το οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε τις υπό συνθήκη πιθανότητες $P(r|c)$ για αυθαίρετη κωδική λέξη c και την αντίστοιχη λαμβανόμενη r . Υποθέτοντας ότι η έχει ληφθεί η r' , ψάχνουμε για μια κωδική λέξη c' , η οποία να μεγιστοποιεί την υπό συνθήκη πιθανότητα $P(r'|c')$. Η κωδική λέξη c' είναι η αποκωδικοποιημένη με ML κωδική λέξη. Δυστυχώς στην πράξη δεν είναι δυνατή μια τόσο πλήρης και ακριβής πιθανοτική περιγραφή του καναλιού. Επιπλέον, ακόμα και αν γνωρίζουμε μια τέτοια περιγραφή του καναλιού, η έρευνα για το μέγιστο δεν είναι εφικτή για μεγάλους (πρακτικά μεγέθη) κώδικες.

Οι αποκωδικοποιητές για κώδικες μπλοκ συνήθως ακολουθούν μια άλλη προσέγγιση: προσπαθούν να βρουν μια κωδική λέξη η οποία να είναι η πλησιέστερη σε απόσταση Hamming στη λαμβανόμενη λέξη. Η προσέγγιση αυτή λέγεται **κανόνας αποκωδικοποίησης της ελάχιστης απόστασης Hamming**. Η απευθείας αναζήτηση για την πλησιέστερη κωδική λέξη δεν είναι εφικτή για τυπικά μεγέθη κωδίκων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως μια άλλη μέθοδος αποκωδικοποίησης, η αποκωδικοποίηση συνδρόμου (*syndrome decoding*). Το σύνδρομο s όταν έχουμε λαμβανόμενη λέξη r , ορίζεται ως:

$$s = Hr^T$$

Σε περίπτωση που δεν έχουμε σφάλματα, όταν δηλαδή $r=c$, τότε έχουμε $s=0$, όπως προκύπτει από την βασική ιδιότητα του πίνακα H . Τα σφάλματα που μπορούν να διορθωθούν και τα αντίστοιχα σύνδρομα ταξινομούνται στον αντίστοιχο πίνακα αποκωδικοποίησης συνδρόμου. Για ένα διορθώσιμο σφάλμα επιλέγεται το διάνυσμα με το μικρότερο βάρος από ένα σύνολο πιθανών διανυσμάτων με το δοσμένο σύνδρομο. Για τον κώδικα (1), σύμφωνα με τον πίνακα ελέγχου ισοτιμίας (2) ο πίνακας αποκωδικοποίησης συνδρόμου είναι αυτός του παρακάτω σχήματος:

s	e
000	00000
001	00001
010	00010
011	01100
100	00100
101	10000
110	01001
111	01000

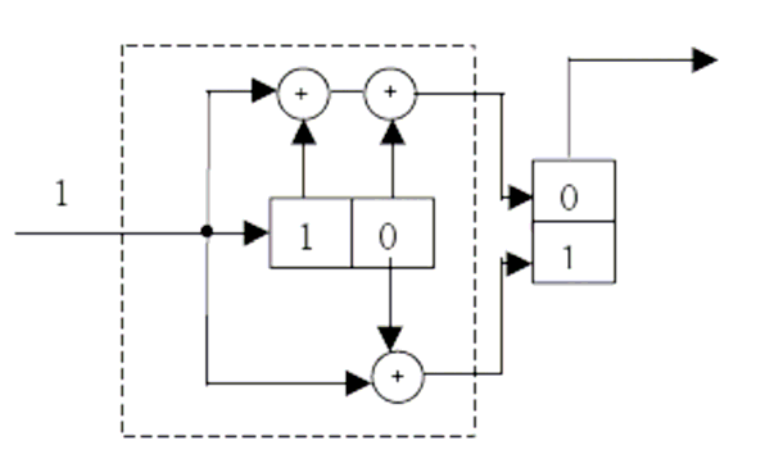
Σχήμα 4 : Πίνακας αποκωδικοποίησης συνδρόμου

Έστω ότι η ληφθείσα λέξη έχει σύνδρομο 111. Βρίσκουμε από τον πίνακα το πρότυπο ανάγνωσης σφάλματος 01000, με άλλα λόγια καταλήγουμε στην κωδική λέξη που προκύπτει από την ληφθείσα αν αναστρέψουμε το δεύτερο bit της τελευταίας. Για συνήθη μεγέθη κωδίκων δεν είναι πρακτικό να δουλεύει κανείς με πίνακες συνδρόμου, οπότε προτιμάται η χρήση αλγορίθμων αποκωδικοποίησης συνδρόμου. Στη μέθοδο αυτή υπολογίζουμε το πρότυπο σφάλματος ξανά και ξανά για κάθε ληφθείσα λέξη. Ο κλασικός αλγόριθμος που ακολουθεί μια τέτοια διαδικασία είναι ο αλγόριθμος Peterson-Gorenstein-Zierler-algorithm (PGZ). Μια πρακτική του βελτίωση είναι ο αλγόριθμος Berlekamp-Massey. Με τη χρήση των αλγορίθμων αυτών μπορούμε να στήσουμε και να λύσουμε συστήματα γραμμικών εξισώσεων όπου οι άγνωστοι είναι η θέση του σφάλματος και η αντίστοιχη τιμή του, ενώ τα σύνδρομα είναι οι γνωστοί όροι,

4.2.7 Συνελικτικοί κώδικες

Ο κωδικοποιητής ενός συνελικτικού κώδικα απαρτίζεται από απλά επί μέρους στοιχεία: **καταχωρητές ολίσθησης (shift registers) και αθροιστές modulo-2 (mod 2 adders).**

Ο κωδικοποιητής στο σχήμα 5 παράγει στην έξοδο δύο bits καναλιού για κάθε bit εισόδου, με άλλα λόγια, έχει ρυθμό κώδικα $R=1/2$. Το bit εισόδου εισάγεται σε έναν καταχωρητή ολίσθησης δύο κελιών. Παρά το ότι έχουμε κώδικες block, το μήκος της εισόδου δεν είναι σταθερό και το αντίστοιχο μήκος της εξόδου είναι απλά το διπλάσιο της ακολουθίας εισόδου (μήνυμα).

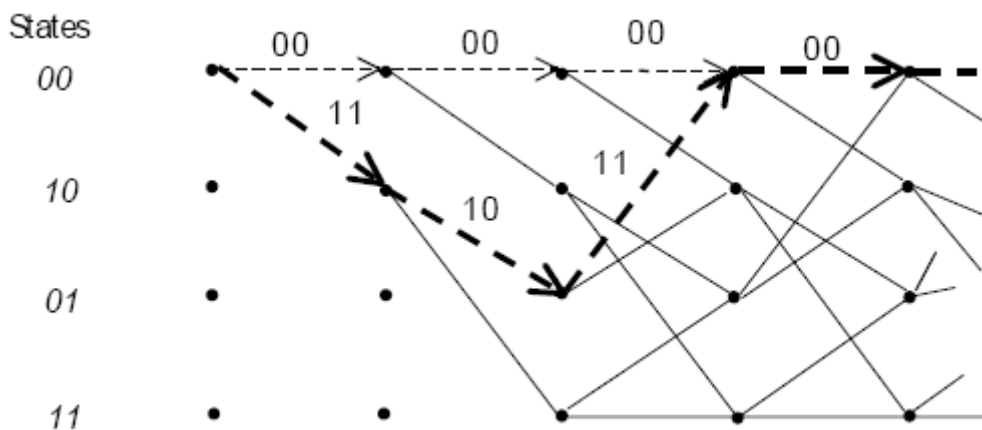


Σχήμα 5 : Συνελικτικός κωδικοποιητής $[x^2+x+1, x^2+1]$

Τα bits που αποθηκεύονται προσωρινά στον καταχωρητή προστίθενται modulo 2 (XOR) με το bit εισόδου. Η γεννήτρια καθορίζεται από τα δύο πολυώνυμα γεννήτριας που αντιστοιχούν στις θέσεις των taps του καταχωρητή.

Ο συνελικτικός κώδικας είναι γραμμικός, πράγμα που σημαίνει ότι αν οι κωδικές λέξεις c_1 και c_2 αντιστοιχούν στα μηνύματα m_1 και m_2 , αντίστοιχα, τότε και το άθροισμα των κωδικών λέξεων αντιστοιχεί στο άθροισμα των μηνυμάτων. Όπως έχουμε δει για τις κωδικές λέξεις η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των κωδικών λέξεων ισούται με το ελάχιστο μη μηδενικό βάρος (minimum nonzero weight). Για είσοδο με όλα τα bits ίσα με μηδέν ο συνελικτικός κωδικοποιητής δίνει αντίστοιχα έξοδο με όλο μηδενικά στοιχεία. Για την περίπτωση της γεννήτριας του σχήματος 5, το ελάχιστο βάρος κωδικής λέξης προκύπτει αν η αρχική κατάσταση της γεννήτριας είναι 00 και η είσοδος 1000... . Τότε, έχουμε έξοδο 11 10 11 00 00 ..., κατά συνέπεια η ελάχιστη απόσταση (γνωστή και ως ελεύθερη απόσταση) είναι 5. Με τους συνελικτικούς κώδικες μπορεί να επιτευχθεί η υλοποίηση ενός **αποκωδικοποιητή μέγιστης πιθανοφάνειας** (maximum likelihood decoder), με τη χρήση του αλγόριθμου Viterbi. Ο κώδικας αναπαρίσται με ένα ειδικό γράφημα που ονομάζεται **διάγραμμα trellis**.

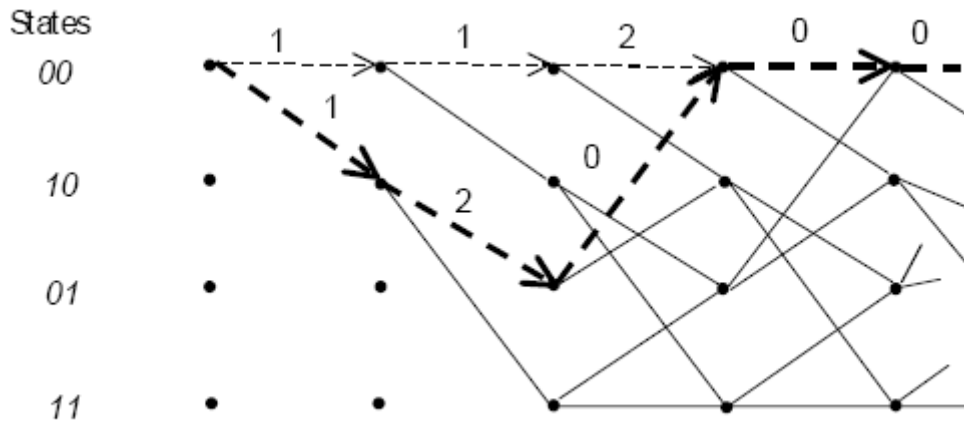
Οι κόμβοι αναπαριστούν τις καταστάσεις του καταχωρητή ολίσθησης. Επιπλέον, οι διαδρομές και οι κλάδοι αναπαριστούν τις κωδικές λέξεις και τις εξόδους ενός βήματος του κωδικοποιητή, αντίστοιχα. Οι κλάδοι ονομάζονται με βάση τις πραγματικές εξόδους του κωδικοποιητή. Αν το κανάλι μπορεί να περιγραφεί από ένα διακριτό δυαδικό συμμετρικό μοντέλο καναλιού χωρίς μνήμη (DM-BSC), αυτό σημαίνει ότι τα bits του καναλιού επηρεάζονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο



Σχήμα 6: Διάγραμμα trellis ενός συνελικτικού κωδικοποιητή

και η πιθανότητα των σφαλμάτων $0 \rightarrow 1$ και $1 \rightarrow 0$ είναι η ίδια, τότε η αποκωδικοποίηση μέγιστης πιθανοφάνειας είναι ισοδύναμη με την αποκωδικοποίηση με ελάχιστη απόσταση Hamming. Υποθέστε ότι έχει μεταδοθεί η κωδική λέξη με όλο μηδενικά bits και έχει ληφθεί η λέξη 10 01 11 00 00

Όλοι οι κλάδοι ονομάζονται από τα αντίστοιχα βάρη, τα οποία είναι η απόσταση του κλάδου από το αντίστοιχο τμήμα της λαμβανόμενης λέξης. Στην περίπτωση ενός καναλιού DM-BSC τα βάρη υπολογίζονται από την απόσταση Hamming. Αυτό φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 7. Το βάρος μιας διαδρομής είναι το άθροισμα των βαρών των κλάδων της. Η διαδρομή με το ελάχιστο βάρος αντιστοιχεί στην κωδική λέξη, που είναι πλησιέστερη στην λαμβανόμενη. Με τη χρήση του αλγόριθμου Viterbi μπορούμε να υπολογίσουμε επιτυχώς τη διαδρομή ελαχίστου βάρους, σε ένα διάγραμμα trellis.



Σχήμα 7 : Διάγραμμα trellis με βάρη κλάδων

Η χρήση βαρών μπορεί να γενικευτεί για ένα κανάλι χωρίς μνήμη: το βάρος ενός κλάδου με την ακολουθία bits x είναι $\log[\rho(y|x)]$, όπου y είναι το αντίστοιχο τμήμα των λαμβανόμενων λέξεων.

4.2.8 Φασματικό bit rate και αναλογία ενέργειας bit προς θόρυβο

Θεωρήστε τον κωδικοποιητή και το διαμορφωτή σαν μια μονάδα, η οποία δέχεται μηνύματα και παράγει σήματα στην έξοδο. Με άλλα λόγια ένα μήνυμα συλλέγει ένα σήμα από ένα σύνολο κυματομορφών σηματοδοσίας. Έστω S η μέση ενέργεια που στέλνει το σήμα στο κανάλι. Αν με R_b [bit/sec] συμβολίσουμε το bit rate τότε η ενέργεια bit είναι $E_b = S/R_b$. Ο Shannon ήταν αυτός που μας έδωσε τον τύπο που μας δίνει τη χωρητικότητα C [bit/sec] για κανάλι με **προσθετικό θόρυβο Gauss** (additive gaussian noise):

$$C = W \log_2(1 + S/N_0W) \quad (8)$$

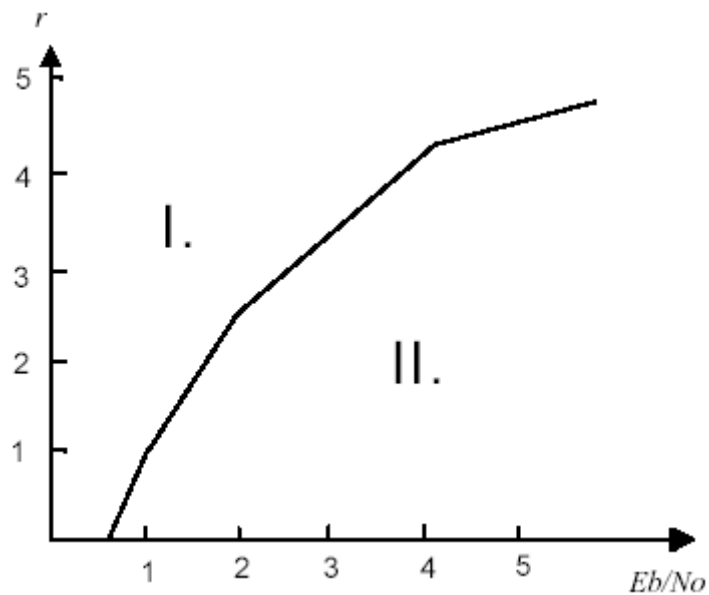
, όπου W είναι το εύρος ζώνης του καναλιού, πράγμα που σημαίνει ότι για τη κυματομορφή σηματοδοσίας $s(t)$ με ενέργεια $S = E_b R_b$, το φάσμα της μηδενίζεται έξω από τη ζώνη $[-W/2, W/2]$. Επιπλέον, με N_0 [watts/Hz] συμβολίζουμε την φασματική πυκνότητα του λευκού θορύβου. Ο τύπος (8) μας λέει ότι κάθε κυματομορφή σηματοδοσίας δε μπορεί να μεταδώσει περισσότερα C bits/sec διά μέσω ενός προσθετικού καναλιού λευκού θορύβου, με αυθαίρετα χαμηλό ρυθμό σφάλματος bit (bit error rate). Όπως γίνεται αντιληπτό, ο τύπος του Shannon μας δίνει ένα όριο που λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ψηφιακού

καναλιού επικοινωνίας. Πειραματιζόμενοι με τον τύπο (8) μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Είναι ενδιαφέρον το τι συμβαίνει αν θεωρήσουμε στον τύπο (8) πολύ μεγάλο εύρος ζώνης. Προκύπτει τότε, ότι ο ελάχιστος λόγος ενέργεια σήματος προς θόρυβο πρέπει να βρίσκεται πάντα από -1.6 dB αν θέλουμε να έχουμε πολύ χαμηλό ρυθμό σφάλματος bit.

Η εμπειρία διδάσκει ότι είναι εύκολο να σχεδιαστούν κυματομορφές που παρέχουν μικρό ρυθμό σφάλματος bit, αν ο λόγος E_b/N_0 είναι περί τα 12 dB (συνήθης για ψηφιακή διαμόρφωση χωρίς κωδικοποίηση). Η αποτελεσματικότητα των κωδικοποιητών μετριέται με ένα μέγεθος που ονομάζεται **κέρδος κωδικοποίησης (coding gain)**, το οποίο είναι η μείωση του λόγου E_b/N_0 που απαιτείται για να επιτύχουμε το ίδιο ρυθμό σφάλματος bit. Με τον τρόπο αυτό, διαφορετικές σχεδιάσεις κωδικοποιητή-διαμορφωτή μπορούν να συγκριθούν, πράγμα που συνήθως γίνεται συγκρίνοντας το λόγο E_b/N_0 , που απαιτείται για να επιτύχουμε δεδομένο bit error rate (π.χ. BER = 10^{-5}) και οι συγκρινόμενες μονάδες τοποθετούνται μεταξύ της ίδιας πηγής και καναλιού. Οι πιο εξελιγμένοι κωδικοποιητές στις μέρες μας χρησιμοποιούν κώδικες turbo (turbo codes). Με τη χρήση των κωδίκων αυτών, μπορούμε να επιτύχουμε λόγο E_b/N_0 της τάξεως του 1 dB (!) για τυπικές τιμές BER, που συναντούμε στην πράξη. Οι κώδικες αυτοί είναι βελτιώσεις πάνω σε κλασικούς συνελκτικικούς κώδικες και χρησιμοποιούν εξαιρετικά περίπλοκες μεθόδους αποκωδικοποίησης.

Αν δε μπορούμε να κρατήσουμε το ίδιο bit rate και εύρος ζώνης, καθώς συγκρίνουμε διαφορετικές σχεδιάσεις, μπορούμε να υπολογίσουμε την **απόδοση φάσματος $r=R_b/W$** [bit/sec / Hz]. Η απόδοση φάσματος r και ο λόγος E_b/N_0 είναι οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας. Από την (8) προκύπτει επίσης, ότι για κάθε σύστημα επικοινωνίας που θέλει να προσεγγίσει πολύ χαμηλό ρυθμό σφάλματος bit πρέπει **$E_b/N_0 \geq 2^{-1/r}$** .

Επιπλέον ο λόγος E_b/N_0 με κατάλληλη σχεδίαση μπορεί να προσεγγίσει από τον τύπο **$f(r)=(2r-1)/r$** . Μια γραφική αναπαράσταση των παραπάνω έχουμε στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8: Μέγιστες αποδόσεις φάσματος συναρτήσει του E_b/N_0 για πολύ μικρό BER

Η περιοχή II στο σχήμα 1.3.3 αντιστοιχεί στα εφικτά ζευγάρια $[r, E_b/N_0]$, με άλλα λόγια για κάθε σημείο κάτω από την καμπύλη μπορεί να σχεδιαστεί ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας, που έχει όσο μικρό ρυθμό σφάλματος bit επιθυμεί ο σχεδιαστής του. Η καμπύλη που χωρίζει τις δύο περιοχές δίνεται από τη συνάρτηση $f(r)$. Για παράδειγμα, αν το r τείνει στο 0 (άρα και το εύρος ζώνης W τείνει στο άπειρο) ο χαμηλότερος δυνατός λόγος ενέργειας bit προς θόρυβο είναι 0,69 (-1.6dB).

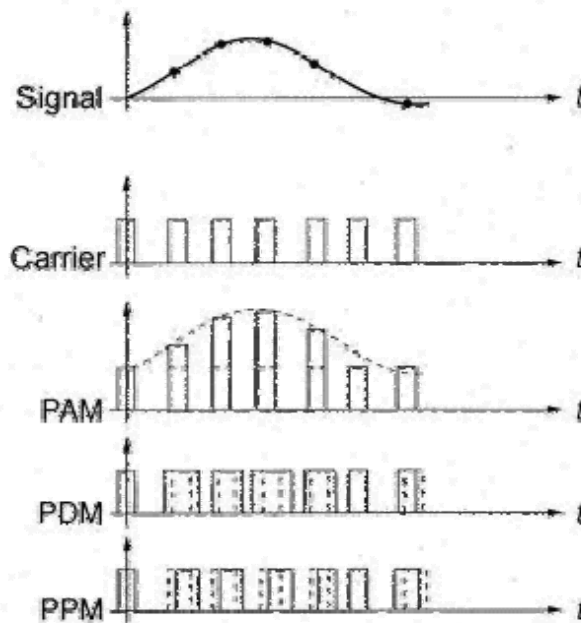
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

5.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΒΑΣΙΚΗ ΖΩΝΗ

Στη μετάδοση στη **βασική ζώνη (baseband)** το σήμα πληροφορίας μεταδίδεται στη αρχική μπάνα συχνοτήτων του (με κεντρική συχνότητα την $f=0$), χωρίς μετατόπιση του σε κάποια υψηλότερη συχνότητα (διαμόρφωση φέροντος). Χρησιμοποιείται μια μορφή ψηφιακής διαμόρφωσης, η διαμόρφωση παλμών. Ως διαμόρφωση παλμών ονομάζουμε τη διαμόρφωση όπου το σήμα φορέας είναι ακολουθία παλμών και το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει κάποιο από τα χαρακτηριστικά όπως το πλάτος, τη διάρκεια, τη θέση κλπ. Έτσι έχουμε διάφορα είδη διαμόρφωσης παλμών, όπως η **διαμόρφωση πλάτους παλμών (Pulse Amplitude Modulation)** η **διαμόρφωση διάρκειας παλμών (Pulse Duration Modulation)** και η **διαμόρφωση θέσης παλμών (Pulse Position Modulation)**. Θα επικεντρωθούμε στην διαμόρφωση πλάτους παλμών, η απλούστερα **PAM**, και ειδικότερα στη **παλμοκωδική διαμόρφωση PCM (Pulse Code Modulation)**.

5.1.1 Διαμόρφωση Πλάτους Παλμών (PAM)

Σε αυτό το είδος διαμόρφωσης τα πλάτη μιας σειράς παλμών μεταβάλλονται ανάλογα με τις αντίστοιχες τιμές των δειγμάτων ενός συνεχούς σήματος. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια διαμόρφωση PAM σε σύγκριση με τις δύο άλλες τεχνικές διαμόρφωσης που αναφέραμε παραπάνω.

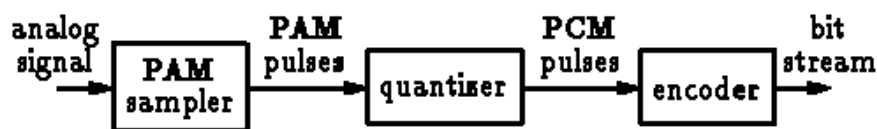


Σχ.4.1 Διαμόρφωση PAM

Είναι η απλούστερη μορφή διαμόρφωσης παλμών. Μπορούμε να πούμε ότι αποτελεί μια μορφή AM, με τη μόνη διαφορά ότι το φέρον σήμα είναι μια σειρά παλμών. Αυτό συνεπάγεται ότι η διαμόρφωση PAM έχει τις ίδιες αδυναμίες με την AM, δηλαδή υψηλή ευαισθησία του σήματος σε θόρυβο και παρεμβολές. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε παρεμβολή κατά τη διαδρομή μετάδοσης (transmission path) θα προκαλέσει αλλαγές στη στάθμη της τάσης του σήματος και κατά συνέπεια στο πλάτος του. Αφού όμως το σήμα πληροφορίας αναπαρίσταται από το πλάτος του PAM σήματος, θα έχουμε παραμόρφωση σήματος. Για το λόγο αυτό η διαμόρφωση PAM δε χρησιμοποιείται συχνά. Έχουν αναπτυχθεί άλλες τεχνικές διαμόρφωσης παλμών όπως η τεχνική PCM που θα δούμε παρακάτω.

5.1.2 Παλμοκωδική Διαμόρφωση (PCM)

Λέγοντας παλμοκωδική διαμόρφωση στην ουσία εννοούμε την ψηφιοποίηση της διαμόρφωσης PAM. Οι ουσιώδεις λειτουργίες του πομπού ενός συστήματος PCM είναι η **δειγματοληψία** (sampling), η **κβάντιση** (quantizing), και η **κωδικοποίηση** (encoding), όπως φαίνεται στο σχήμα 2 :



Σχ. 4.2 : Λειτουργίες PCM πομπού

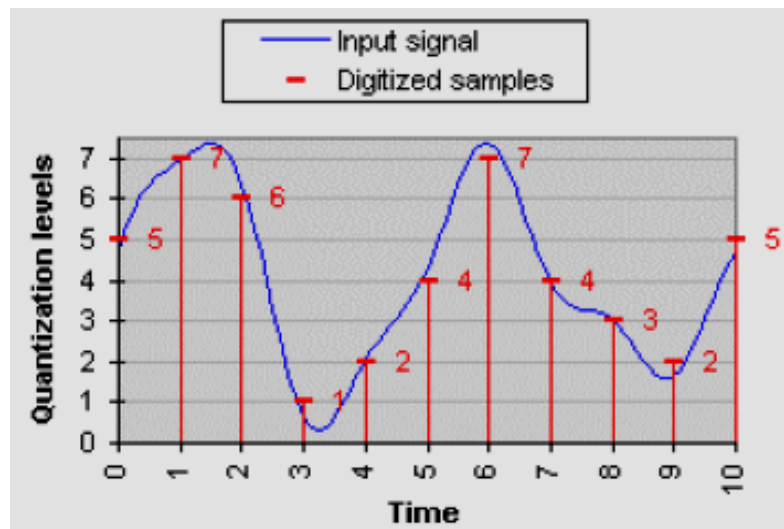
Η έξοδος του δειγματολήπτη είναι προφανώς το σήμα PAM που αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Η κβάντιση είναι η διαδικασία μετατροπής της τιμής κάθε αναλογικού δείγματος PAM σε μια διακριτή τιμή που μπορεί να αναπαρασταθεί από μια **λέξη κώδικα** (code word). Το αρχικό συνεχές σήμα προσεγγίζεται από ένα σήμα το οποίο κατασκευάζεται από διακριτά πλάτη, επιλεγμένα από ένα διαθέσιμο σύνολο με βάση την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Προφανώς εάν καθορίσουμε διακριτές στάθμες πλάτους με αρκετά μικρό βήμα μεταξύ τους, μπορούμε να κάνουμε το προσεγγιζόμενο σήμα να μη ξεχωρίζει πρακτικά από το αρχικό συνεχές σήμα. Η διαφορά μεταξύ των δύο γειτονικών διακριτών τιμών ονομάζεται **κβάντο** (quantum) ή μέγεθος βήματος (step-size). Καθώς τα δείγματα PAM εισέρχονται στη φάση της κβάντισης, αντιστοιχίζονται σε μια διακριτή στάθμη πλάτους. Σε κάθε στάθμη αντιστοιχίζεται μια διακριτή τιμή με τη μορφή δυαδικής κωδικής λέξης (binary code word). Αν το μήκος της κωδικής λέξης είναι n bits τότε θα έχουμε 2^n διακριτές στάθμες PCM. Αν ένα δείγμα PAM δεν αντιστοιχιστεί στη διακριτή στάθμη την πιο κοντινή στην πραγματική τιμή του τότε έχουμε το λεγόμενο **θόρυβο κβάντισης** (quantization noise). Ο θόρυβος κβάντισης μειώνει το SNR του σήματος. Ας δούμε ένα παράδειγμα PCM κωδικοποίησης για να ξεδιαλύνουν όλα τα παραπάνω!

Ένα απλό παράδειγμα PCM κωδικοποίησης

Στο παράδειγμα που θα εξετάσουμε παρακάτω παίρνουμε 11 δείγματα από το PAM δείγμα και χρησιμοποιούμε 8 διακριτά επίπεδα κβάντισης, τα οποία κωδικοποιούνται σύμφωνα με τον πίνακα :

Level	Code word
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Στο σχήμα 3 βλέπουμε την διαδικασία της κβάντισης και ψηφιοποίησης του PAM σήματος. Στα δεξιά κάθε δείγματος είναι ο αριθμός του επιπέδου κβάντισης του. Ο αριθμός αυτός αντιστοιχίζεται σε μια κωδική λέξη μήκους 3-bit σύμφωνα με το παραπάνω πίνακα.



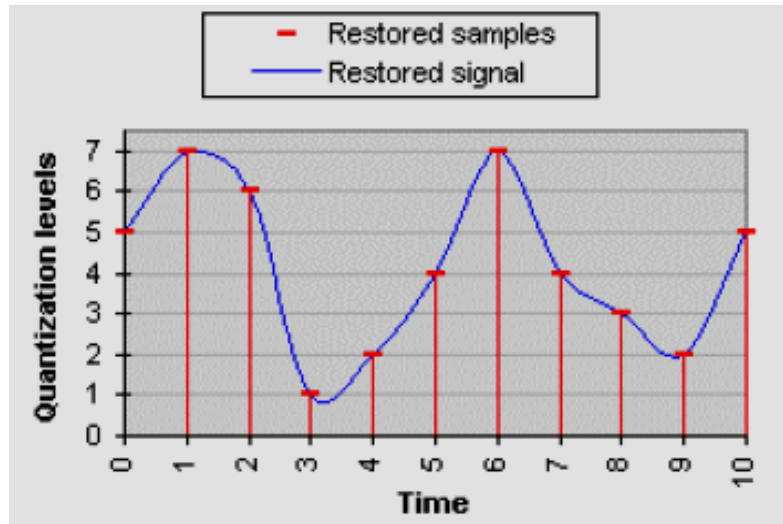
Σχ4..3 Κβάντιση και ψηφιοποίηση σήματος

Το κωδικοποιημένο PCM σήμα του πομπού είναι :

101 111 110 001 010 100 111 100 011 010 101

Δηλαδή για την κωδικοποίηση χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 33 bits. Ο αριθμός των bits μπορεί να μειωθεί με κατάλληλες μεθόδους συμπίεσης. Στο σχήμα 4 βλέπουμε το

ανακτώμενο σήμα στο δέκτη. Βλέπουμε ότι εμφανίζει απόκλιση από το αρχικό, συνέπεια του θορύβου κβάντισης.



Σχ. 4.4 Ανάκτηση σήματος στο δέκτη

5.1.2.1 Εύρος Ζώνης PCM

Το εύρος ζώνης μιας δυαδικής PCM κυματομορφής υπολογίζεται ως εξής :

Bit Rate : $R = n f_s$ n - αριθμός bits στο PCM , f_s - ρυθμός δειγματοληψίας

Το n ουσιαστικά είναι το μήκος των κωδικών λέξεων.

$$B_{PCM} \geq \frac{1}{2} R = \frac{1}{2} n f_s \quad \text{άρα} \quad \text{Minimum BW} : \frac{1}{2} R = \frac{1}{2} n f_s$$

5.1.3 Εφαρμογές PCM – Ψηφιακή Τηλεφωνία

Η τεχνική PCM έχει μεγάλο εύρος πρακτικών εφαρμογών : ψηφιακό video, ψηφιακή εγγραφή ήχου (CD) και ψηφιακή τηλεφωνία. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε το αναλογικό σήμα της ανθρώπινης φωνής το εύρος ζώνης του οποίου κυμαίνεται από

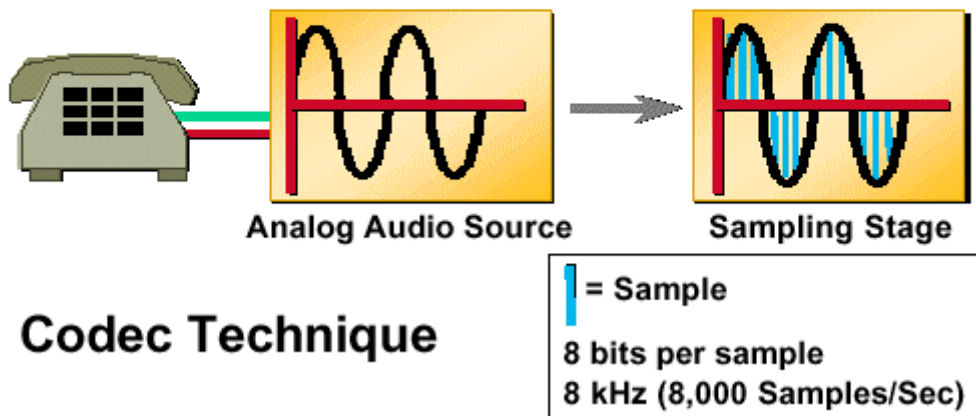
200 ως 3400 Hz , για πρακτικούς λόγους ας θεωρήσουμε ότι είναι 4000 Hz. Τότε σύμφωνα με το κριτήριο του Nyquist για το ρυθμό δειγματοληψίας πρέπει να ισχύει :

$$F_s \geq 2BW = 2 \times 4000 = 8000 \text{ samples/sec}$$

Κατά την κβάντιση κάθε δείγμα κωδικοποιείται με μια λέξη (code word) μήκους 8 bits οπότε ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για την τηλεφωνία PCM είναι $8 \times 8000 = 64000$ bits/sec ή 64 kbps. Προφανώς minimum bandwidth : $\frac{1}{2} R = \frac{1}{2} 64 = 32$ kHz . Στις γραμμές T1 έχουμε 24 πολυπλεγμένα κανάλια (ΗΠΑ) με κωδικοποίηση PCM bit rate = $24 \times 64000 + 8$ (framing bits) = 1544 kbps.

Pulse Code Modulation—Nyquist Theorem

Voice Bandwidth =
200 Hz to 3400 Hz



5.1.4 Πλεονεκτήματα PCM έναντι PAM

Μικρότερη ευαισθησία σε θόρυβο και χαμηλότερη πιθανότητα σφάλματος.

Ποιότητα μετάδοσης ανεξάρτητη από απόσταση, αφού με τη χρήση ενδιάμεσων αναγεννητών μπορούμε να αναπαράγουμε το ψηφιακό σήμα. Ικανότητα μεταφοράς σημάτων σε μεγάλη απόσταση (ψηφιακή τηλεφωνία).

Δυνατότητα χρήσης TDM.

Χαμηλότερο κόστος ψηφιακού κυκλώματος.

Γίνεται τώρα φανερό γιατί στη πράξη χρησιμοποιούμε σχεδόν αποκλειστικά την PCM. Μειονέκτημά της έναντι της PAM το μεγαλύτερο εύρος ζώνης της.

5.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΕ ΖΩΝΗ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Η μετάδοση σήματος στη βασική ζώνη είναι ικανοποιητική για εφαρμογές όπως η σταθερή τηλεφωνία, όμως δεν επαρκεί για άλλες εφαρμογές όπως π.χ. ασύρματη μετάδοση. Σε τέτοιες περιπτώσεις μετατρέπουμε το σήμα βασικής ζώνης (**baseband**) σε σήμα ζώνης διέλευσης (**passband**), με μια διαδικασία που ονομάζεται **διαμόρφωση φέροντος**. Με τη διαμόρφωση φέροντος το σήμα βασικής ζώνης που περιέχει την πληροφορία που θέλουμε να μεταδώσουμε, 'επικάθεται' σε ένα σήμα υψηλότερης συχνότητας, το λεγόμενο **φέρον σήμα (carrier signal)**. Στην ουσία κάποιο από τα χαρακτηριστικά του φέροντος σήματος μεταβάλλεται συναρτήσει του σήματος πληροφορίας. Οι βασικοί λόγοι που μας ωθούν στη διαμόρφωση του baseband σήματος πληροφορίας είναι :

Το μήκος των κεραιών πρέπει να είναι της τάξεως του μήκους κύματος λ του σήματος (π.χ. $\lambda/2$, $\lambda/4$). Είναι όμως $\lambda = c/f$, όπου c η ταχύτητα του φωτός και f η συχνότητα του σήματος. Συνεπώς όσο μετατοπίζουμε το σήμα σε υψηλότερη συχνότητα, τόσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κεραιών που θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε. Για παράδειγμα ένα σήμα 100 Hz έχει $\lambda = 3\text{km}$, ενώ με διαμόρφωση στα 100MHz έχει $\lambda = 3\text{m}$.

Γίνεται δυνατή η χρήση της τεχνικής της πολυπλεξίας σήματος, έτσι π.χ. μπορούμε να μεταδώσουμε δύο ή περισσότερα σήματα ταυτόχρονα, πράγμα αδύνατο αν περιοριζόμασταν μόνο στη μετάδοση σε βασική ζώνη αφού θα ήταν αναπόφευκτες επικαλύψεις ανάμεσα στα σήματα.

Διακρίνουμε δύο τύπους διαμόρφωσης, την αναλογική και τη ψηφιακή.

5.2.1 Αναλογική Διαμόρφωση

Ένα αναλογικό σήμα χαρακτηρίζεται από τρία βασικά μεγέθη :

- Το πλάτος του A
- Τη συχνότητά του f
- Τη φάση του φ

Βάσει αυτών των μεγεθών το ημιτονικό σήμα του φέροντος γράφεται :

$$C(t) = A \cdot \sigma\upsilon\nu(\omega \cdot t + \varphi) \quad (4. 1)$$

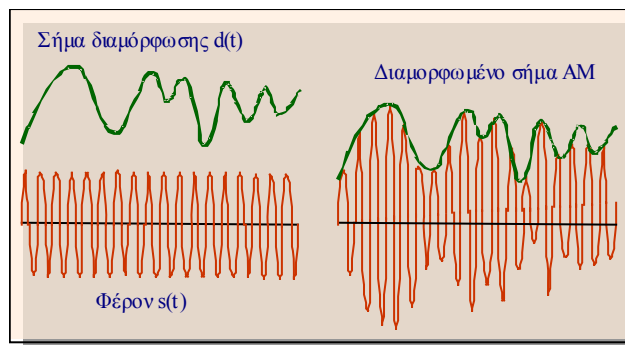
όπου t είναι ο χρόνος και $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή συχνότητα του σήματος. Το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει το φέρον σήμα, όταν μεταβάλλει ένα από τα τρία βασικά του μεγέθη, πλάτος, συχνότητα ή φάση. Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι δύο βασικές μέθοδοι αναλογικής διαμόρφωσης που είναι η **διαμόρφωση κατά πλάτος** και η **διαμόρφωση κατά συχνότητα**.

5.2.1.1 Διαμόρφωση κατά Πλάτος (Amplitude Modulation-AM)

Όταν το σήμα πληροφορίας μεταβάλλει/διαμορφώνει το πλάτος του φέροντος σήματος, πρόκειται για **διαμόρφωση πλάτους (amplitude modulation) ή AM**, όπως είναι ευρύτερα γνωστή.

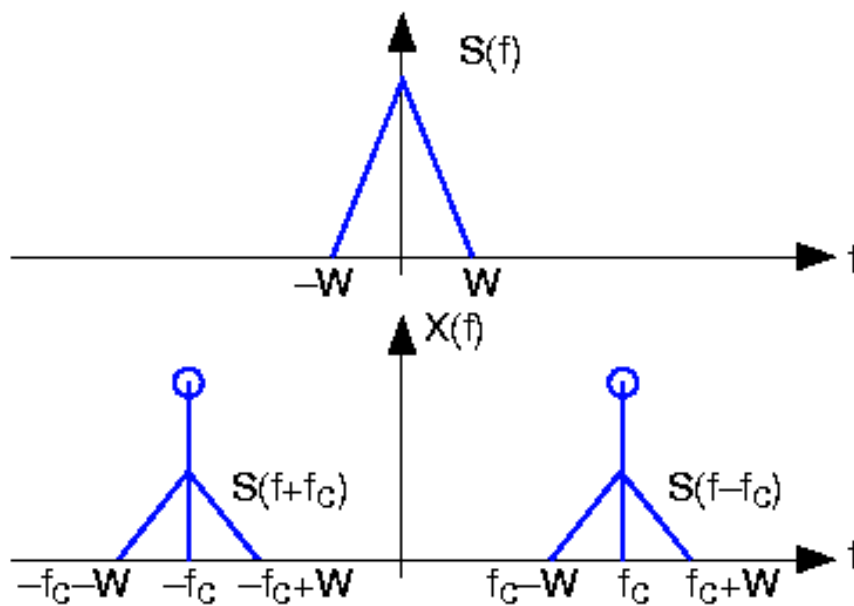
Αν θεωρήσουμε ως φέρον σήμα το σήμα της εξίσωσης 6.2.1 και ως σήμα πληροφορίας το σήμα $d(t)$, ορίζεται ως διαμόρφωση πλάτους η διαδικασία κατά την οποία το πλάτος του φορέα A μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα πληροφορίας $d(t)$, γύρω από μία μέση τιμή. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 5, όπου φαίνεται ότι το πλάτος του φέροντος σήματος διαμορφώνεται από το σήμα πληροφορίας που είναι σαφώς χαμηλότερης συχνότητας. Το αποτέλεσμα είναι ένα διαμορφωμένο σήμα AM, του οποίου οι μεταβολές του πλάτους του μεταφέρουν ουσιαστικά τη χρήσιμη πληροφορία. Για παράδειγμα, το σήμα πληροφορίας $d(t)$ θα μπορούσε να είναι η φωνή του εκφωνητή σε ένα ραδιόφωνο και το σήμα φορέας θα μπορούσε να είναι ένα σήμα με κατάλληλη συχνότητα (μακρά, μεσαία ή βραχεία κύματα) για τη μετάδοσή του στο περιβάλλον, από όπου θα το λάμβαναν οι ραδιοφωνικοί δέκτες.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διαμορφωμένο κατά πλάτος σήμα στο πεδίο του χρόνου.



Σχ. 4.5 Διαμόρφωση σήματος κατά πλάτος (AM)

Στο πεδίο της συχνότητας το AM σήμα αποτελείται από τη κεντρική συχνότητα του φέροντος και τις συχνότητες του σήματος πληροφορίας μετατοπισμένες σε δύο πλευρικές περιοχές συχνοτήτων γύρω από την κεντρική συχνότητα f_c του φορέα. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται **πάνω πλευρική ζώνη** (συχνότητες μεγαλύτερες από τη συχνότητα του φορέα) και **κάτω πλευρική ζώνη** (**Upper and Lower Side Band- USB and LSB**). Το αντίστοιχο φάσμα συχνοτήτων ενός AM σήματος δίνεται με ένα παράδειγμα στο σχήμα 6. Στο παράδειγμα αυτό έχει θεωρηθεί ότι το σήμα βασικής ζώνης (ή το φασματικό περιεχόμενο του σήματος πληροφορίας) έχει τριγωνική μορφή για λόγους ευκολίας παράστασης του AM σήματος.



Σχ.4. 6 Φασματικό περιεχόμενο AM σήματος

Το **εύρος ζώνης** BW (Bandwidth) ενός σήματος AM είναι ευθέως ανάλογο της μέγιστης συχνότητας f_{\max} του σήματος πληροφορίας $d(t)$ και δίνεται από τη σχέση:

$$BW = 2 \cdot f_{\max} \quad (4.2)$$

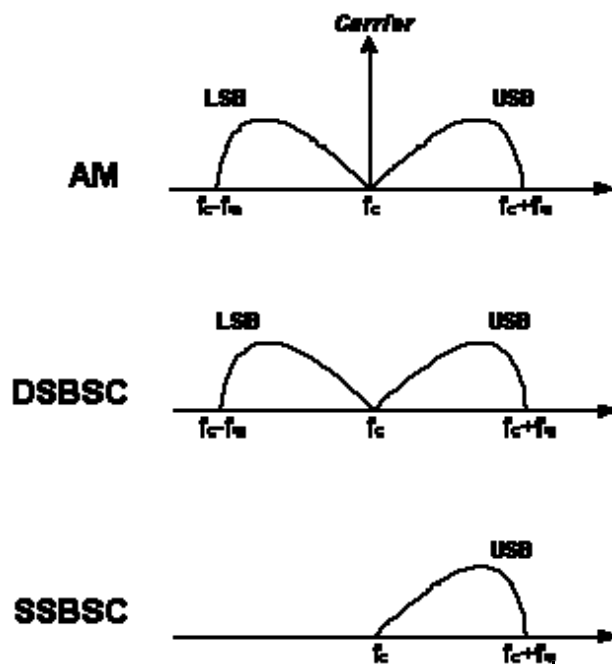
Πέρα από τη βασική μορφή της AM διαμόρφωσης υπάρχουν και διάφορες παραλλαγές της με αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι πιο χαρακτηριστικές από αυτές είναι οι ακόλουθες :

Μετάδοση της διπλής πλευρικής ζώνης χωρίς την παρουσία του φέροντος (Double Sideband Suppressed Carrier- DSSC). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή

μεταδίδεται το διαμορφωμένο σήμα χωρίς την κεντρική συχνότητα του φέροντος σήματος.

Μετάδοση της μίας πλευρικής ζώνης (Single Side Band – SSB). Με τη μέθοδο αυτή εξοικονομείται και ενέργεια αλλά κυρίως εύρος ζώνης, μια και μεταδίδεται μόνο η μία από τις δύο πλευρικές ζώνες συχνοτήτων.

Στο σχήμα 7 βλέπουμε μια σύγκριση των τριών μορφών AM.



Σχ. 4.7 Φασματικό περιεχόμενο AM, DSBSC, SSBSC

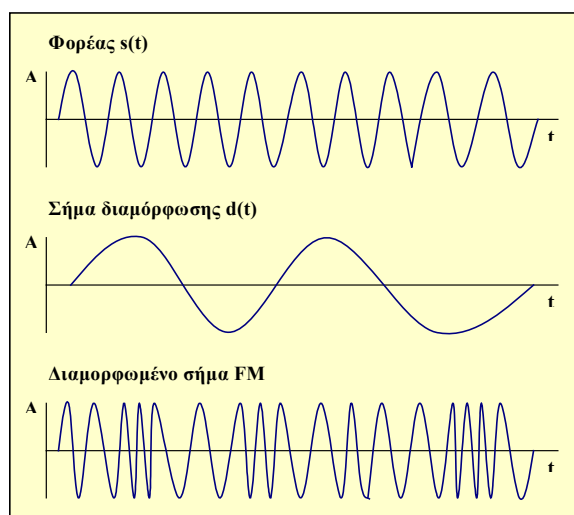
Δεδομένου ότι τα AM σήματα απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό του στιγμιαίου πλάτους τους (που μεταφέρει τη χρήσιμη πληροφορία), είναι ευαίσθητα στην παρουσία του θορύβου.

5.2.1.2 Διαμόρφωση κατά Συχνότητα (Frequency Modulation-FM)

Όταν το σήμα πληροφορίας μεταβάλλει/διαμορφώνει τη συχνότητα του φέροντος σήματος, πρόκειται για **διαμόρφωση συχνότητας (Frequency modulation) ή FM**.

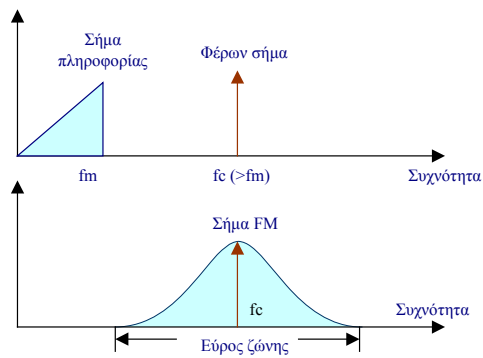
Έτσι, ονομάζεται **διαμόρφωση συχνότητας** η διαδικασία κατά την οποία το σήμα πληροφορίας $d(t)$ μεταβάλλει (ή διαμορφώνει) τη συχνότητα του φέροντος σήματος $C(t)$ (βλέπε εξίσωση 4.1). Κατά τη διαδικασία αυτή η γωνιακή συχνότητα ω του φέροντος μεταβάλλεται γραμμικά με το πλάτος του σήματος πληροφορίας γύρω από μία μέση τιμή.

Στο σχήμα 8 δίνεται ένα παράδειγμα FM διαμόρφωσης. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, η στιγμιαία συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος του σήματος πληροφορίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το σήμα πληροφορίας μπορεί να είναι ένα τραγούδι που μεταδίδεται από το ραδιόφωνο και το φέρον σήμα το αντίστοιχο ραδιοφωνικό σήμα που εκπέμπεται από το ραδιοσταθμό.



Σχ. 4.8 Διαμόρφωση Συχνότητας (FM)

Ο υπολογισμός του εύρους ζώνης συχνοτήτων ενός FM σήματος απαιτεί μια ιδιαίτερα σύνθετη μαθηματική διαδικασία που δεν άπτεται των σκοπών αυτού του συγγράματος. Το αποτέλεσμα της μαθηματικής ανάλυσης πάντως δείχνει ότι ένα FM σήμα αποτελείται από ένα πλήθος συχνοτήτων, που ονομάζονται **αρμονικές** και βρίσκονται γύρω από την κεντρική συχνότητα του φέροντος. Μάλιστα το πλάτος των αρμονικών αυτών συχνοτήτων μειώνεται συνεχώς, όσο η τιμή τους απομακρύνεται από την κεντρική συχνότητα, για να γίνει αμελητέα σε συχνότητες που απέχουν πολύ από αυτή. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της μορφής ενός σήματος FM στο πεδίο της συχνότητας δίνεται στο σχήμα 9.



Σχ. 4.9 Εύρος ζώνης FM σήματος

Ένα χρήσιμο μέγεθος στη διαμόρφωση FM είναι το **εύρος ζώνης συχνοτήτων (Bandwidth) BW** του σήματος FM που ορίζεται ως η περιοχή συχνοτήτων στην οποία συγκεντρώνεται το 95% της ολικής ενέργειας του σήματος και υπολογίζεται πρακτικά από τη σχέση:

$$BW = 2 \cdot (\Delta f_s + f_m) \quad (4.3)$$

, όπου Δf_s είναι η απόκλιση συχνότητας (frequency deviation) του σήματος FM. Η τελευταία ορίζεται ως η μέγιστη μεταβολή συχνότητας του φέροντος λόγω της διαμόρφωσης. Επιπλέον f_m είναι η μέγιστη συχνότητα του σήματος πληροφορίας $d(t)$.

Η διαμόρφωση συχνότητας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά στο θόρυβο και μεγαλύτερη πιστότητα στη μετάδοση από την AM διαμόρφωση και για τους λόγους αυτούς χρησιμοποιείται για εκπομπές ποιότητας στη ραδιοφωνία FM και για τη μετάδοση ήχου στην τηλεόραση. Το μειονέκτημα του μεγάλου εύρους ζώνης που έχει ένα σήμα FM, που μεταφράζεται σε μικρότερο αριθμό καναλιών για την ίδια περιοχή συχνοτήτων, αντιμετωπίζεται τουλάχιστον στη ραδιοφωνία FM από το γεγονός της μικρής εμβέλειας των ραδιοφωνικών σημάτων (συχνότητες φέροντος κοντά στα 100 MHz). Έτσι δύο ραδιοφωνικοί σταθμοί που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα, σε διαφορετική όμως γεωγραφική περιοχή, δε δημιουργούν προβλήματα ο ένας στον άλλο (αρκεί βέβαια να μη χρησιμοποιούνται αναμεταδότες).

5.2.2 Ψηφιακή Διαμόρφωση

Στην εποχή μας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ψηφιακές μέθοδοι διαμόρφωσης. Η ψηφιακή διαμόρφωση εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- Μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο (αναγέννηση σήματος)
- Συμπύεση φωνής → Αύξηση χωρητικότητας συστήματος
- Μείωση κόστους
- Βελτίωση Ασφάλειας (τεχνικές κωδικοποίησης)
- Μικρότερη απαιτούμενη ισχύς

Φωνή και δεδομένα αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο (π.χ. 3G συστήματα)

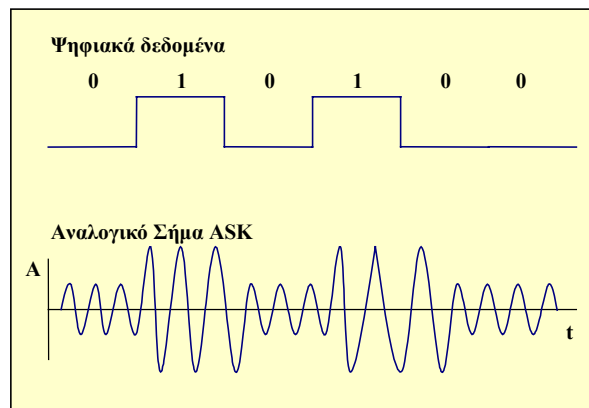
Βασικές έννοιες που πρέπει να διακρίνουμε πριν συνεχίσουμε είναι αυτές του bit rate και του symbol (ή baud) rate. Bit rate είναι ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η στοιχειώδης μονάδα πληροφορίας (bit). Baud rate είναι ο αριθμός συμβόλων ανά δευτερόλεπτο. Για ένα σύμβολο που αποτελείται από n bits, έχουμε M καταστάσεις σήματος, όπου $M=2^n$. **Baud rate = bit rate /αριθμό bits ανά σύμβολο**

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που αποτελεί δείκτη ποιότητας ενός τύπου ψηφιακής διαμόρφωσης είναι η **απόδοση φάσματος (spectrum efficiency)**. Η απόδοση φάσματος περιγράφει πόσο ικανοποιητικά χρησιμοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης και μετριέται σε brps/Hz. Το μέτρο της δίνεται από το πηλίκο του ρυθμού μετάδοσης προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Π.χ. για ένα σήμα που μεταδίδεται με bitrate 140 Mbits/sec σε ένα εύρος ζώνης 52.5 MHz έχουμε απόδοση φάσματος $140 \text{ Mbps}/52.5 \text{ MHz} = 2.7 \text{ brps/Hz}$.

Τέλος άλλη μια παράμετρος που θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στις παρακάτω παραγράφους είναι το BER (Bit Error Rate). Σε μια ψηφιακή διαμόρφωση το BER είναι το ποσοστό των bits με σφάλμα προς τον συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων ή λαμβανόμενων bits για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Συνήθως εκφράζεται ως αρνητική δύναμη του 10. Π.χ. 4 λανθασμένα bits για 100.000 bits που μεταδόθηκαν εκφράζεται ως 4×10^{-5} , ενώ BER 3×10^{-6} σημαίνει ότι 3 bits είχαν σφάλμα από τα 1.000.000 που μεταδόθηκαν.

5.2.2.1 Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Shift Keying- ASK)

Η ψηφιακή διαμόρφωση πλάτους ή ASK είναι η απλούστερη μορφή ψηφιακής διαμόρφωσης, όπως αντίστοιχα η AM διαμόρφωση είναι και η απλούστερη αναλογική. Και εδώ το πλάτος του ημιτονικού σήματος – φέροντος, μεταβάλλεται αναλογικά με την τιμή του ψηφιακού σήματος πληροφορία Μόνο που στην περίπτωση των ψηφιακών σημάτων, λόγω του ότι ουσιαστικά περιέχουν παλμούς, το ASK σήμα θα έχει τη μορφή του σχήματος 10 :

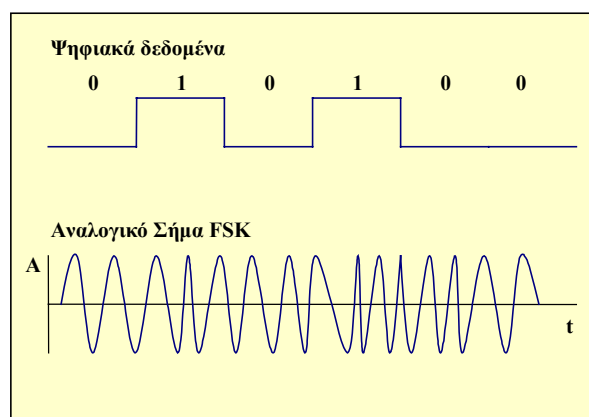


Σχήμα 4.10 Διαμόρφωση ASK

Δεδομένου ότι ο θόρυβος επηρεάζει ουσιαστικά το πλάτος των σημάτων, τα σήματα ASK είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο θόρυβο και ειδικά στις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Για το λόγο αυτό η χρήση της διαμόρφωσης ASK έχει αρχίσει να περιορίζεται πλέον σήμερα και να αντικαθίσταται από πλέον σύγχρονες μεθόδους διαμόρφωσης.

5.2.2.2 Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Shift Keying- FSK)

Όπως και στην περίπτωση της FM διαμόρφωσης, έτσι και στη ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας ή FSK, η συχνότητα του ημιτονικού φέροντος σήματος μεταβάλλεται με διακριτό τρόπο ανάλογα με την τιμή του ψηφιακού σήματος πληροφορίας. Στην απλούστερη περίπτωση αυτό σημαίνει μία τιμή συχνότητας για τη δυαδική τιμή «1» και μία άλλη τιμή συχνότητας για τη δυαδική τιμή «0». Χαρακτηριστικό παράδειγμα ψηφιακής διαμόρφωσης συχνότητας δίνεται στο σχήμα 11 :



Σχήμα 4. 11 Διαμόρφωση FSK

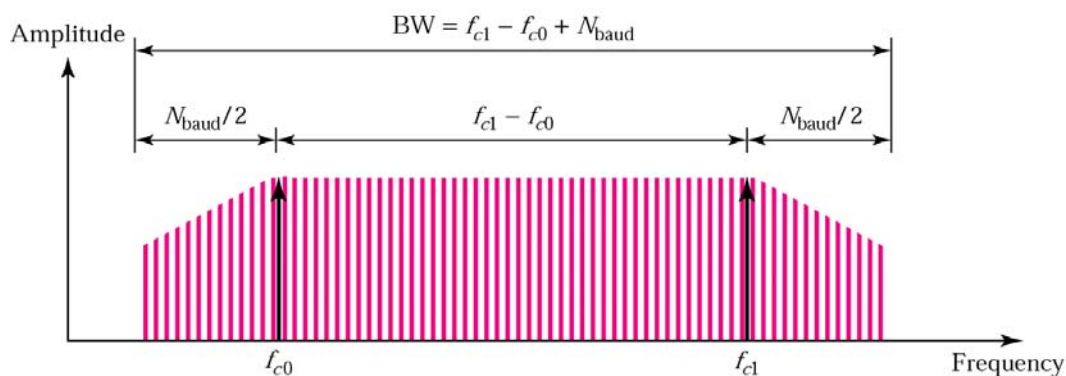
Η διαμόρφωση FSK εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή στο θόρυβο σε σχέση με την ASK, ενώ έχει εύρος ζώνης

$$B_{RF} = \text{baud rate} + f_2 - f_1 \quad (6.2.4)$$

όπου f_1 και f_2 οι δύο τιμές που παίρνει η συχνότητα του ημιτονικού φέροντος ανάλογα με το αν μεταδίδεται 0 ή 1 (f_2 η μεγαλύτερη τιμή πάντα). Στην περίπτωση της δυαδικής FSK, bit rate και baud rate συμπίπτουν οπότε η 6.2.4 γράφεται αλλιώς :

$$B_{RF} = R_B + f_2 - f_1$$

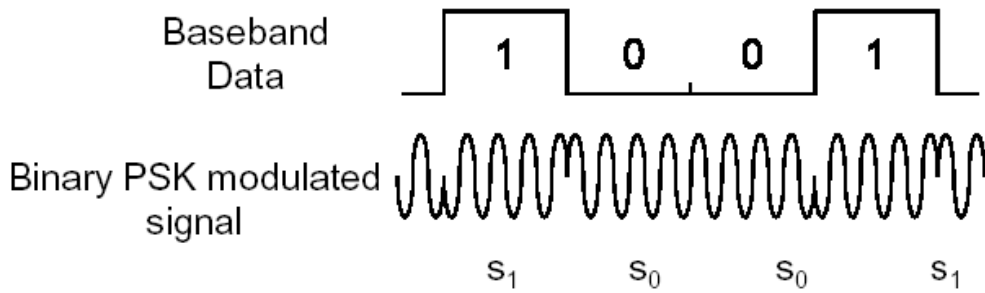
Στο παρακάτω σχήμα έχουμε ένα σήμα FSK στο πεδίο της συχνότητας, όπου μπορούμε να δούμε πιο παραστατικά το εύρος ζώνης για τη διαμόρφωση FSK



Σχήμα 4.12 Εύρος Ζώνης FSK

5.2.2.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης (Phase Shift Keying- PSK)

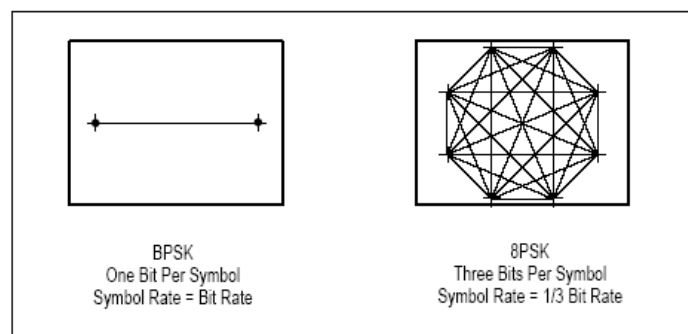
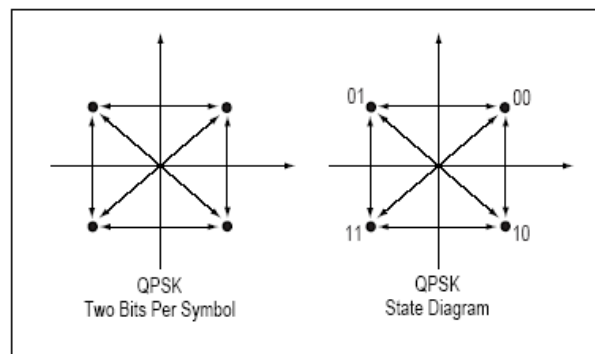
Στην περίπτωση αυτή είναι η φάση του ημιτονικού φέροντος που μεταβάλλεται συναρτήσει του σήματος πληροφορίας. Η πιο απλή μορφή της είναι η δυαδική PSK (Binary Phase Shift Keying – BPSK) όπου χρησιμοποιούνται δύο φάσεις για την αναπαράσταση των δυαδικών ψηφίων 0 και 1. Ένα τέτοιο σήμα έχει μορφή του παρακάτω σχήματος :

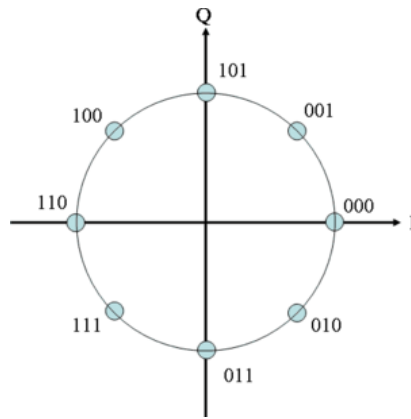


Σχήμα 4.13 Διαμόρφωση PSK

όπου $s_0 = A \cos(\omega_c t + \pi)$ και $s_1 = A \cos \omega_c t$.

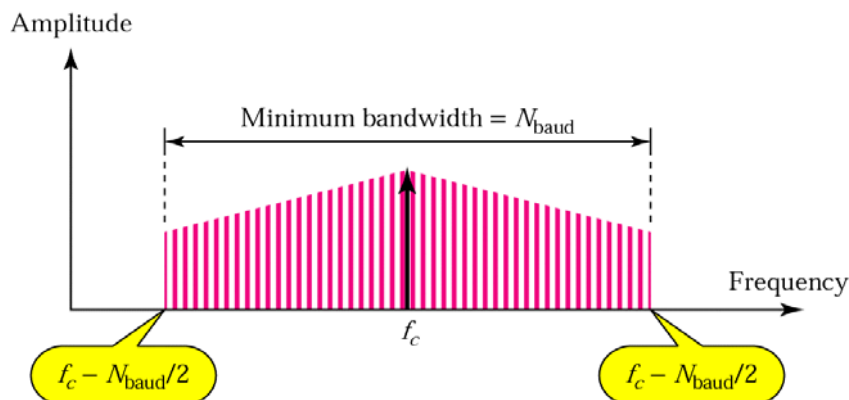
Στη γενικότερη μορφή όμως έχουμε τη M-PSK όπου χρησιμοποιούνται M φάσεις για την αναπαράσταση των M συμβόλων που αποτελούνται από n δυαδικά στοιχεία ($n = \log_2 M$). Π.χ. στην 4-PSK ή αλλιώς QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) τα σύμβολα 00, 01, 11, 10 αντιστοιχίζονται στις φάσεις $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ και $7\pi/4$ αντίστοιχα. Παρακάτω βλέπουμε τα λεγόμενα διαγράμματα αστερισμού (constellation diagrams) για τις διαμορφώσεις BPSK, QPSK και 8-PSK.





Σχήμα 4.14 Διάγραμμα αστερισμού για διαμόρφωση 8-PSK

Για τη διαμόρφωση PSK έχουμε **minimum BW= baud rate**. Έτσι προφανώς έχουμε για **BPSK** $BW = R_b$ (bit rate) για **QPSK** $BW = R_b/2$ για **8-PSK** $BW = R_b/3$. Όσο αυξάνεται ο αριθμός bits ανά σύμβολο (M) τόσο αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και η **απόδοση φάσματος (bandwidth efficiency)**. Από την άλλη πλευρά όμως αυξάνεται και το BER. Η διαμόρφωση PSK χρησιμοποιείται συχνά καθώς δίνει δυνατότητα για αποδοτικότερη χρήση του RF φάσματος σε σχέση με τις ASK και FSK. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε πιο παραστατικά το ελάχιστο εύρος ζώνης για ένα PSK σήμα



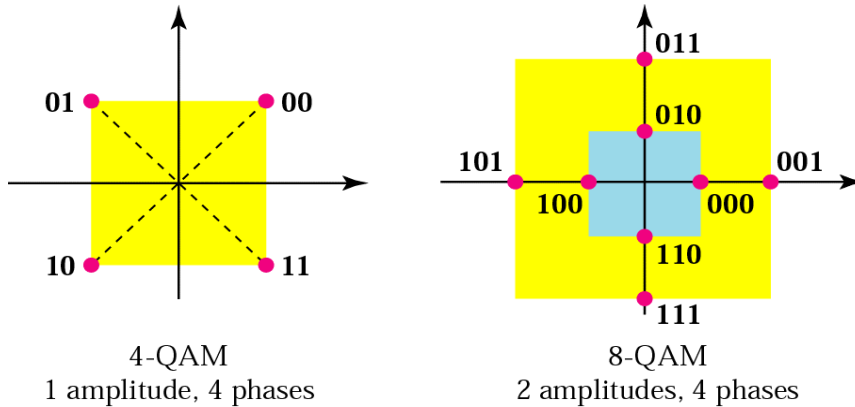
Σχήμα 4.15 Εύρος Ζώνης PSK

5.2.2.4 Ψηφιακή Διαμόρφωση (Gaussian) Minimum Shift Keying –(G) MSK

Η διαμόρφωση MSK είναι μια ειδική περίπτωση της FSK, όπου η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης χρησιμοποιούμενης συχνότητας είναι ίση με το μισό του bitrate. Π.χ. για bitrate 1200 bps, πρέπει $f_{max} - f_{min} = 1200/2 = 600$ Hz. Η GMSK είναι μια μορφή της MSK όπου το απαιτούμενο εύρος ζώνης μειώνεται ακόμα περισσότερο με το πέρασμα της διαμορφωμένης κυματομορφής από ειδικό χαμηλοπερατό φίλτρο (Gaussian filter). Η GMSK έχει καλύτερη απόδοση φάσματος και χαμηλότερο BER από την MSK. Οι 2 αυτές διαμορφώσεις χρησιμοποιούνται στην κινητή τηλεφωνία GSM καθώς και στα ασύρματα τηλέφωνα DECT.

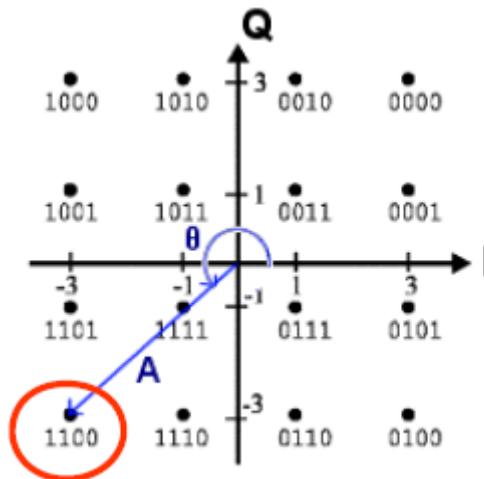
5.2.2.5 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Η διαμόρφωση QAM είναι στην ουσία ένας συνδυασμός PSK και διαμόρφωσης πλάτους. Το QAM σήμα έχει τόσες καταστάσεις όσοι είναι οι πιθανοί συνδυασμοί πλάτους και φάσης των φέροντων σημάτων. Π.χ. αν έχουμε 2 διαφορετικές τιμές πλάτους και 4 διαφορετικές φάσεις έχουμε $2 \times 4 = 8$ διαφορετικές καταστάσεις. Αυτή είναι η διαμόρφωση 8-QAM, στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το λεγόμενο διάγραμμα αστερισμού της (constellation diagram) όπως και της 4-QAM η οποία στην ουσία συμπίπτει με την 4-QPSK που είδαμε παραπάνω :



Σχήμα 4.16 4- και 8-QAM

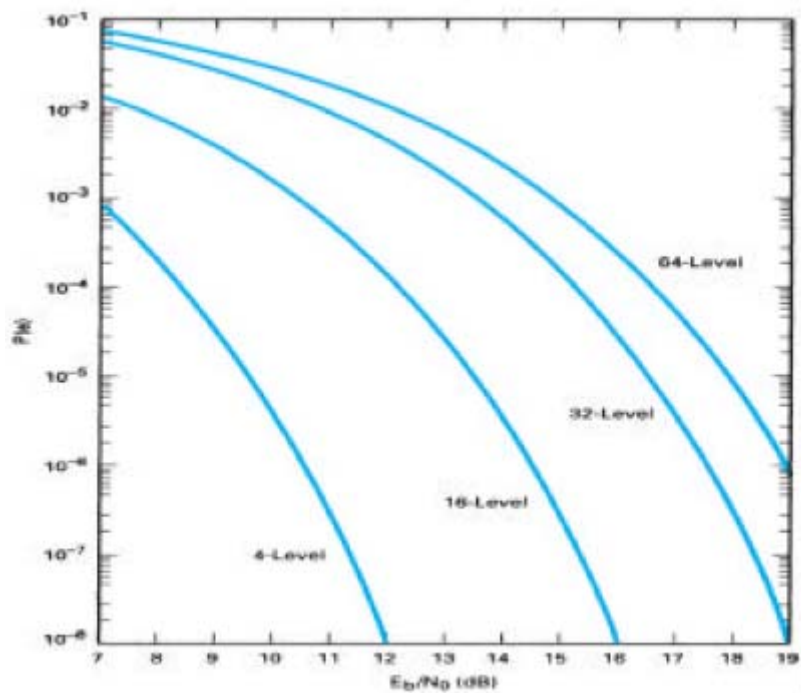
Στην 8-QAM όπως βλέπουμε έχουμε $\log_2 8 = 3$ bits/σύμβολο. Πιο συνηθισμένες μορφές είναι οι 16-, 32-, 64- και 256-QAM. Παρακάτω βλέπουμε το διάγραμμα για τη διαμόρφωση 16-QAM και συγκεκριμένα σε τι φάση και πλάτος αντιστοιχίζεται το σύμβολο 1100:



Σχ 4.17 Constellation diagram για 16 - QAM

Όσο αυξάνουμε το M (M-QAM) τόσο αυξάνεται η απόδοση φάσματος, αλλά και τόσο αυξάνεται είτε το BER για σταθερή ισχύ σήματος είτε ο απαιτούμενος λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο για σταθερό BER. Πιο παραστατικά αυτό φαίνεται στο παρακάτω

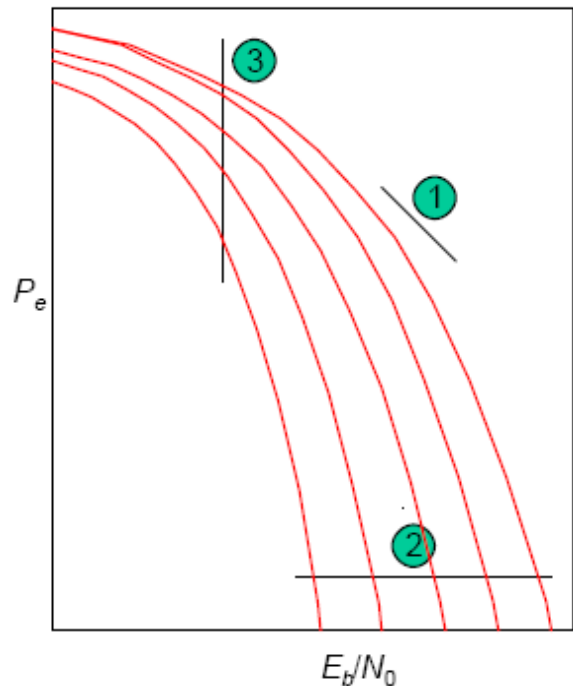
σχήμα (στον κάθετο άξονα η πιθανότητα σφάλματος ενώ στον οριζόντιο ο λόγος ισχύος σήματος προς θόρυβο) :



Σχήμα 4.18 BER συναρτήσει SNR για διάφορες μορφές QAM

Σε σχήματα όπως το παραπάνω φαίνονται παραστατικά η αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ισχύ και BER. Πιο συγκεκριμένα

- 1) Αύξηση της ισχύος οδηγεί σε μείωση του BER – σταθερός ρυθμός μετάδοσης
- 2) Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης ανάγκη για αύξηση ισχύος – σταθερό BER.
- 3) Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης οδηγεί σε αύξηση του BER, σταθερή ισχύς.



Σχ 19 Αλληλεξάρτηση SNR, BER και ρυθμού μετάδοσης

Τα παραπάνω ισχύουν για όλες τις ψηφιακές διαμορφώσεις και όχι μόνο για την QAM. Το πλεονέκτημα της QAM διαμόρφωσης έναντι της PSK είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης στο ίδιο εύρος ζώνης (μεγαλύτερη απόδοση φάσματος). Βασικό μειονέκτημα η αύξηση του BER ιδίως στις ανώτερες μορφές διαμόρφωσης ($M > 64$). Η διαμόρφωση QAM χρησιμοποιείται στην καλωδιακή τηλεόραση και στα καλωδιακά modems, στα V.34 modems καθώς και στις τεχνολογίες ADSL και VDSL. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις πρακτικές εφαρμογές που έχουν οι διάφοροι τύποι ψηφιακής διαμόρφωσης που μελετήσαμε έως τώρα

Πίνακας 2

Modulation format	Application
MSK, GMSK	GSM, CDPD
BPSK	Deep space telemetry, cable modems
QPSK, $\pi/4$ DQPSK	Satellite, CDMA, NADC, TETRA, PHS, PDC, LMDS, DVB-S, cable (return path), cable modems, TSTS
OQPSK	CDMA, satellite
FSK, GFSK	DECT, paging, RAM mobile data, AMPS, CT2, ERMES, land mobile, public safety
8, 16 VSB	North American digital TV (ATV), broadcast, cable
8PSK	Satellite, aircraft, telemetry pilots for monitoring broadband video systems
16 QAM	Microwave digital radio, modems, DVB-C, DVB-T
32 QAM	Terrestrial microwave, DVB-T
64 QAM	DVB-C, modems, broadband set top boxes, MMDS
256 QAM	Modems, DVB-C (Europe), Digital Video (US)

5.2.3 Εφαρμογές των διαφόρων τύπων ψηφιακής διαμόρφωσης

Συνοψίζοντας ως παραθέσουμε και έναν πίνακα που απεικονίζει τα θεωρητικά όρια στην απόδοση φάσματος για τις διάφορες μορφές διαμόρφωσης :

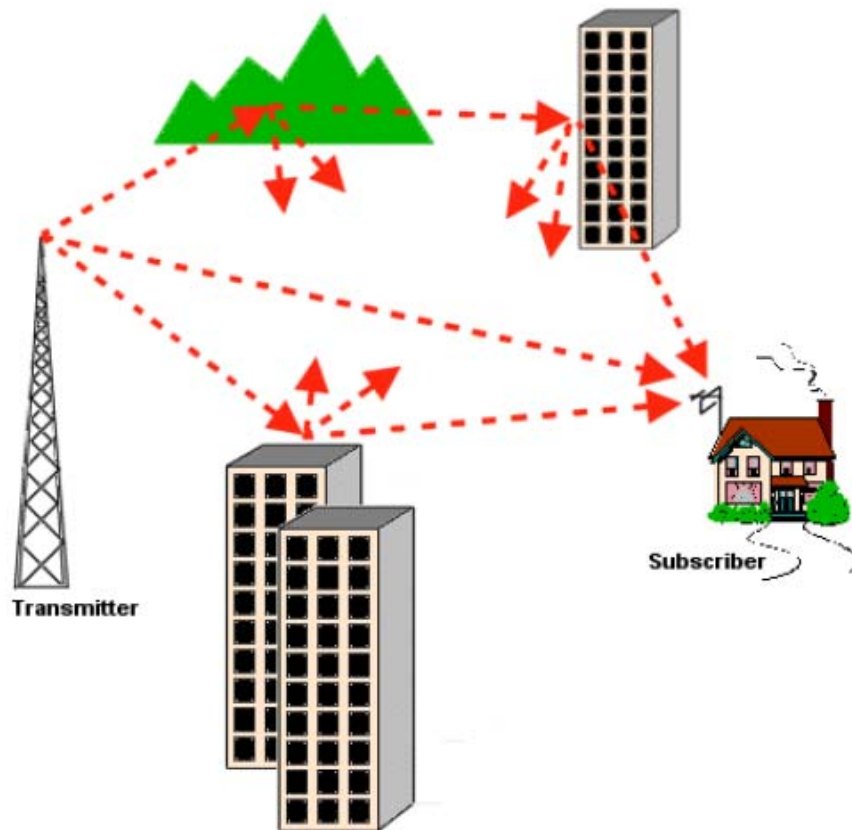
Πίνακας 3 Απόδοση φάσματος των διαφόρων τύπων ψηφιακής διαμόρφωσης

Modulation format	Theoretical bandwidth efficiency limits
MSK	1 bit/second/Hz
BPSK	1 bit/second/Hz
QPSK	2 bits/second/Hz
8PSK	3 bits/second/Hz
16 QAM	4 bits/second/Hz
32 QAM	5 bits/second/Hz
64 QAM	6 bits/second/Hz
256 QAM	8 bits/second/Hz

5.3 Ορθογωνική Πολυπλεξία Συχνότητας (Orthogonal Frequency)

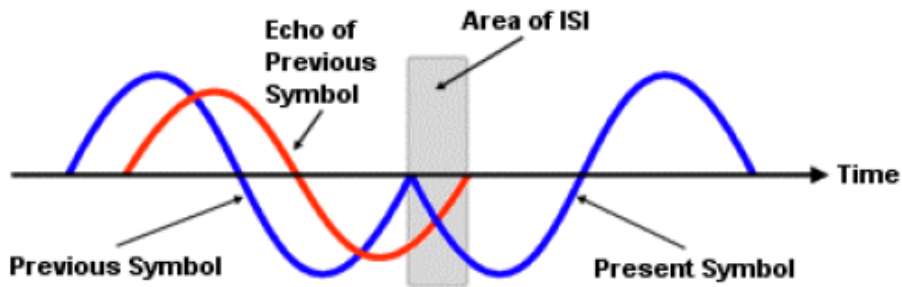
5.3.1 Division Multiplexing – OFDM

Η ορθογωνική πολυπλεξία συχνότητας (**OFDM**) είναι μια μορφή διαμόρφωσης στην οποία μεταδίδουμε περισσότερα του ενός φέροντα σε συχνότητες ορθογωνικές μεταξύ τους. Μεγάλο πλεονέκτημα της OFDM είναι ότι εμφανίζει μεγάλη αντοχή στο θόρυβο και σε λοιπές παρεμβολές καθώς και ότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο των **πολλαπλών διοδεύσεων (multipath effect)**. Το μεταδιδόμενο σήμα ανακλάται σε φυσικά εμπόδια και οι αντανακλάσεις του φτάνουν με χρονική διαφορά στο δέκτη. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται η ενδοσυμβολική παρεμβολή (InterSymbol Interference - ISI) στο δέκτη.



Σχ.4. 22 Φαινόμενο πολλαπλών διοδεύσεων (multipath effect)

Ας δούμε αναλυτικότερα πως η τεχνική OFDM μειώνει την ενδοσυμβολική παρεμβολή σε σχέση με τη διαμόρφωση ενός φέροντος. Βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα πως η ηχώ του προηγούμενου σύμβολου παρεμβάλλεται στο τρέχον σύμβολο.



Σχ 4.23 Καθυστέρηση διάδοσης

Η περιοχή ISI εκφράζει την **καθυστέρηση διάδοσης (delay spread)**. Ισχύει προσεγγιστικά, $ISI = \tau_{max}/T_{s,sc}$ (4.5)

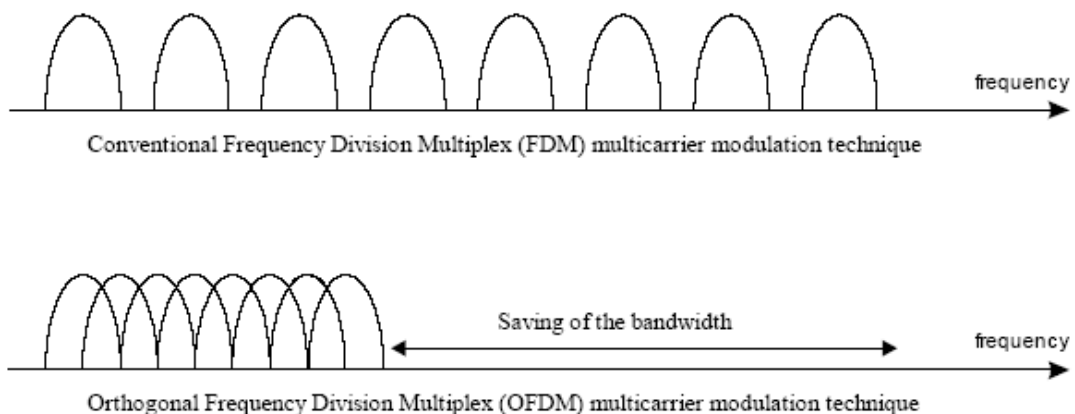
όπου τ_{max} η μέγιστη καθυστέρηση διάδοσης και $T_{s,sc}$ η περίοδος συμβόλου για διαμόρφωση με ένα φέρον.

Για την OFDM, αν έχουμε N φέροντα τότε είναι $T_s = N \times T_{s,sc}$. Είναι τότε

$$ISI = \tau_{max}/T_s = \tau_{max}/N \times T_{s,sc} \quad (4.6)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις βλέπουμε τη μείωση στην ISI λόγω της OFDM.

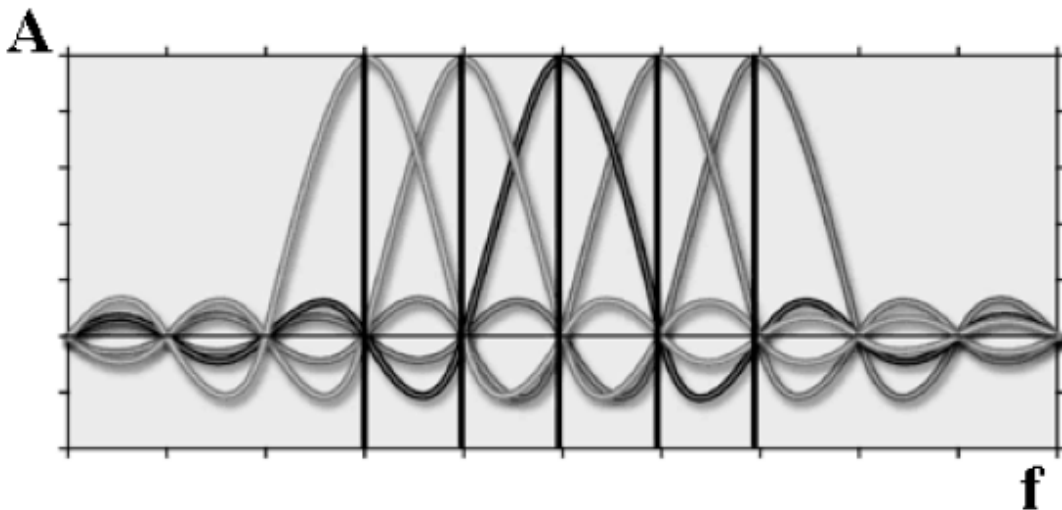
Και όλα αυτά επιτυγχάνονται με σαφώς αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος από ότι αν χρησιμοποιούσαμε απλή πολυπλεξία συχνότητας (FDM) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 4.24 Εξοικονόμηση φάσματος OFDM σε σχέση με FDM

Το “μυστικό” της OFDM είναι η χρήση **ορθογωνικών υποφερόντων (orthogonal subcarriers)**, η οποία επιτρέπει τη δυνατότητα αποδιαμόρφωσης των υποφερόντων στο δέκτη ακόμα και όταν υπάρχει επικάλυψη (overlapping) μεταξύ των φασμάτων τους.

Δύο σήματα λέγονται ορθογωνικά όταν ισχύει $(x_k(t) * x_j(t) dt = 0)$ ---θα μπει ολοκληρωμα . Αλλιώς, για γίνει περισσότερο κατανοητό το παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι όταν ένα υποφέρων εμφανίζει μέγιστο, τα υπόλοιπα έχουν μηδενική τιμή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 25.

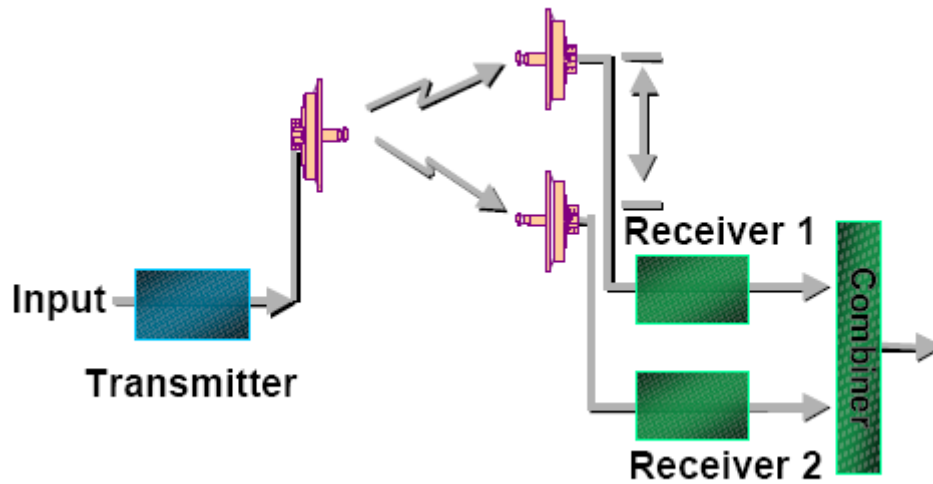


Σχ. 4.25 Φασματική απεικόνιση OFDM

Τα δεδομένα σε κάθε υποφέρων μεμονωμένα διαμορφώνονται είτε με PSK, είτε με QAM ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης και το BER που θέλουμε να έχουμε. Ο διαμορφωτής και ο αποδιαμορφωτής ενός OFDM συστήματος υλοποιούνται με τη χρήση ηλεκτρονικών φίλτρων που πραγματοποιούν FFT.

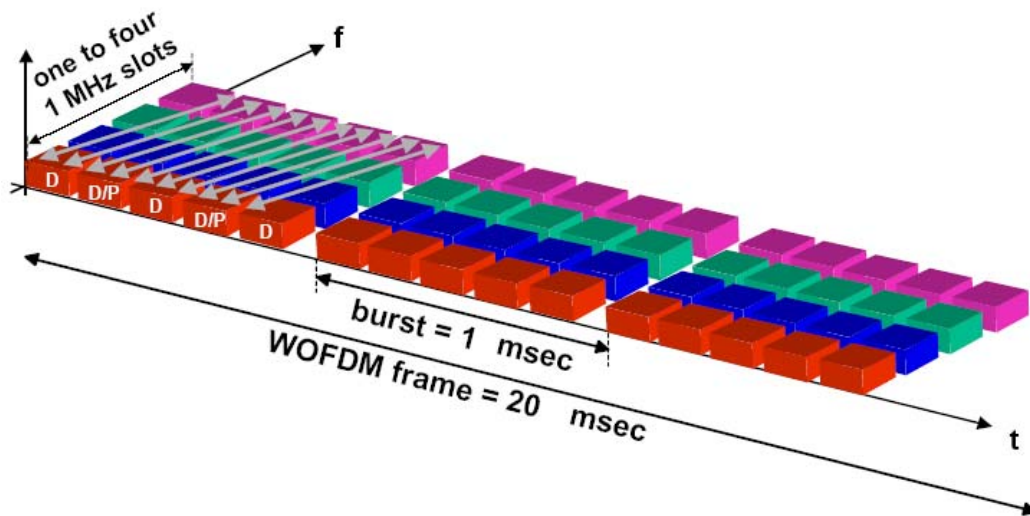
Βασικό χαρακτηριστικό του OFDM είναι ότι προσαρμόζει τους ρυθμούς μετάδοσης σε κάθε κανάλι ανάλογα με το SNR, μεταδίδει δηλαδή με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης στα κανάλια με λιγότερο θόρυβο.

Η χρήση OFDM σε συνδυασμό με τεχνικές FEC (Forward Error Correction) ονομάζεται COFDM (Coded – OFDM). Με τη μέθοδο αυτή εξασφαλίζεται η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στο δέκτη, με την μετάδοση bits διόρθωσης σφάλματος παράλληλα με τα bits δεδομένων. Ακόμα, έχουμε την VOFDM (Vector OFDM), η οποία είναι στην ουσία συνδυασμός OFDM με πολυπλεξία στο χώρο. Η χρήση δύο κεραιών στο δέκτη μπορεί να δώσει κέρδος 3-14 dB.



Σχ 4.26 VOFDM

Παρακάτω βλέπουμε εφαρμογή OFDM σε συνδυασμό με TDMA:



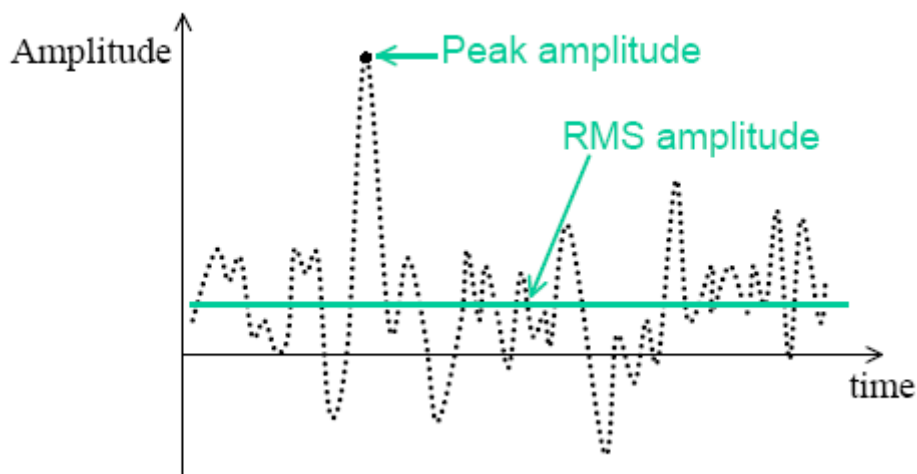
Σχ 4.27 OFDM με TDMA

Η τεχνική OFDM εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα

- Αύξηση της απόδοσης φάσματος σε σύγκριση με τεχνικές διαμόρφωσης ενός φέροντος
- Δυνατότητα για NLOS (Non-Line Of Sight) κάλυψη
- Αντοχή στο φαινόμενο πολλαπλών διαδεύσεων και περιορισμός ISI
- Αντοχή σε θόρυβο και λοιπές παρεμβολές

Αλλά και τα παρακάτω μειονεκτήματα

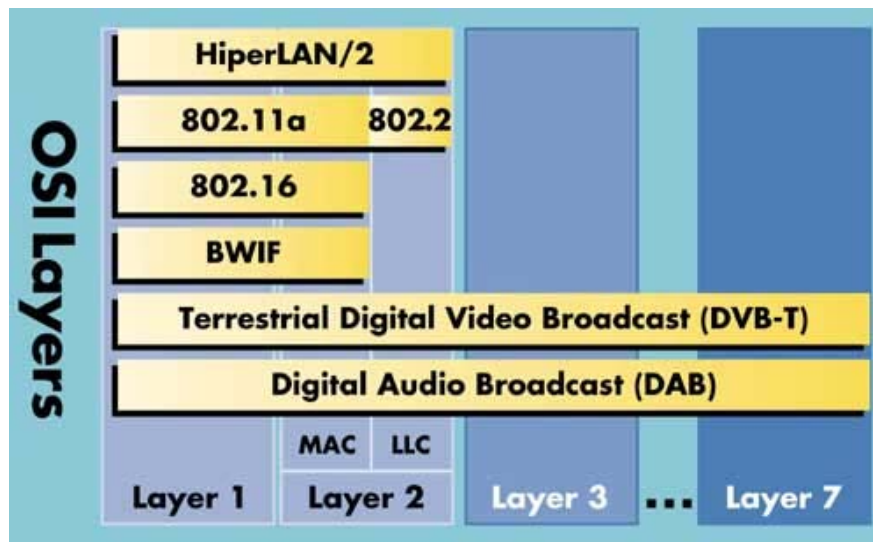
- Μεγάλη ευαισθησία σε σφάλματα συγχρονισμού, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια της ορθογωνικότητας και σε δημιουργία παρεμβολών μεταξύ γειτονικών υποφερόντων.
- Πολύ υψηλές τιμές του λόγου μέγιστης προς μέσης ισχύος PPARP (Peak-To-Average Power Ratio), με αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση ενισχυτών και ADCs (Analog to Digital Converters).
- Μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος εφαρμογής



Σχ. 4.28 PPARP για διαμόρφωση OFDM

5.3.1.1 Εφαρμογές OFDM

Η τεχνική OFDM χρησιμοποιείται ήδη σε πολλά συστήματα τηλεπικοινωνιών και μελλοντικά η χρήση προβλέπεται να εξαπλωθεί. Οι τεχνολογίες **xDSL** καθώς και **cable modem** χρησιμοποιούν την τεχνολογία OFDM για να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Πρόσφατα η OFDM υιοθετήθηκε σε αρκετές ασύρματες εφαρμογές στην Ευρώπη, όπως σε συστήματα **digital audio broadcast (DAB)** και **terrestrial digital video broadcast (DVB-T)**. Στις Ηνωμένες Πολιτείες η τεχνική OFDM υιοθετήθηκε για την υποστήριξη των ασύρματων δικτύων **MMDS**. Έχουμε επίσης εφαρμογές σε ασύρματα LANs, όπως το πρότυπο **802.11a** της **IEEE** καθώς και το πρότυπο **HiperLAN/2** της **ETSI**, τα οποία χρησιμοποιούν την OFDM σαν τεχνική διαμόρφωσης. Το ίδιο συμβαίνει και με την πολλά υποσχόμενη ασύρματη τεχνολογία **WiMAX (IEEE 802.16)**. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την χρήση OFDM στα διάφορα στρώματα του μοντέλου OSI.



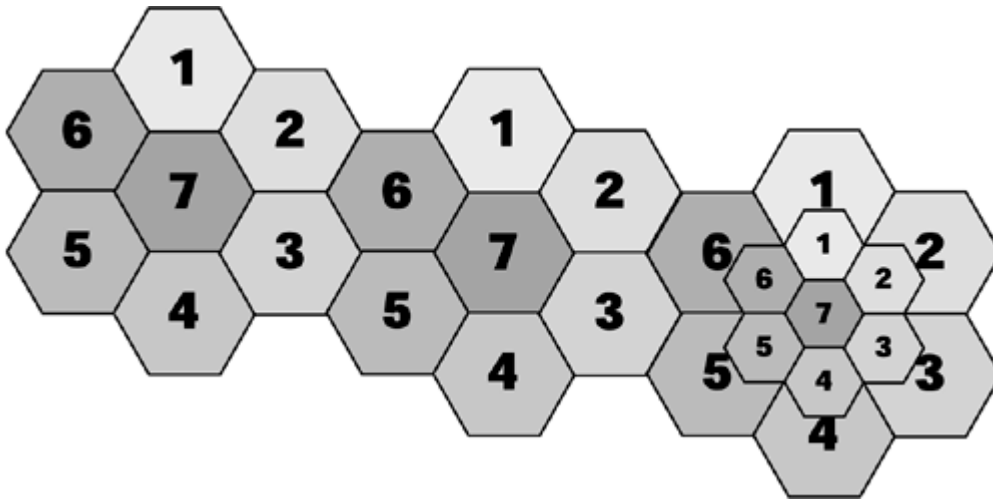
5.4 Επαναχρησιμοποίηση φάσματος

Το φάσμα στις ασύρματες επικοινωνίες είναι περιορισμένο – φανταστείτε την ασύρματη μετάδοση σαν να έχουμε ένα αόρατο καλώδιο στον ουρανό που πρέπει να το μοιραστεί όλος ο κόσμος. Αυτός είναι ένας από τους βασικούς περιορισμούς όσον αφορά την ασύρματη μετάδοση, με αποτέλεσμα να απαιτούνται τεχνικές για την αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος γνωστές και ως μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης φάσματος

Ένα πρώτο βήμα είναι να εφαρμόσουμε **διαίρεση χώρου (space division)**. Έτσι μπορούμε να ξαναχρησιμοποιήσουμε συχνότητες στις περιοχές κάλυψης, τις λεγόμενες **κυψέλες (cells)**. Δεύτερο βήμα είναι να εφαρμόσουμε κάποια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, που επιτρέπει το μοίρασμα του φάσματος σε πολλούς χρήστες. Μετά από όλα αυτά υπάρχουν οι τεχνικές ευρέως φάσματος (spread spectrum), duplexing και συμπίεσης ώστε να οδηγηθούμε σε ακόμα αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

5.4.1.1 Διαίρεση Χώρου (Space Division)

Εφαρμόζεται η γνωστή σε όλους μας κυψελοειδής αρχιτεκτονική. Η βασική ιδέα είναι η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων από μη γειτονικές κυψέλες. Στο σχήμα 29 βλέπουμε πως γίνεται επαναχρησιμοποίηση για $n = 7$ συχνότητες, που είναι το πιο συνηθισμένο πρότυπο επαναχρησιμοποίησης στα αναλογικά κυψελωτά δίκτυα.



Σχ. 4.29 Κυψελοποίηση

Όσο μεγαλώνουν οι απαιτήσεις σε φάσμα τόσο μειώνεται το μέγεθος της κυψέλης και κατ' επέκταση και η ισχύς των σταθμών βάσης. Ήδη έχουμε περάσει από το **macrocell** (13 km διάμετρος) των πρώτων αναλογικών κυψελωτών δικτύων στο **microcell** (1 km διάμετρος) και οδεύουμε προς το **picocell** (με ακτίνα κάλυψης μικρότερη των 50m).

5.5 Τεχνικές Πολλαπλής Πρόσβασης

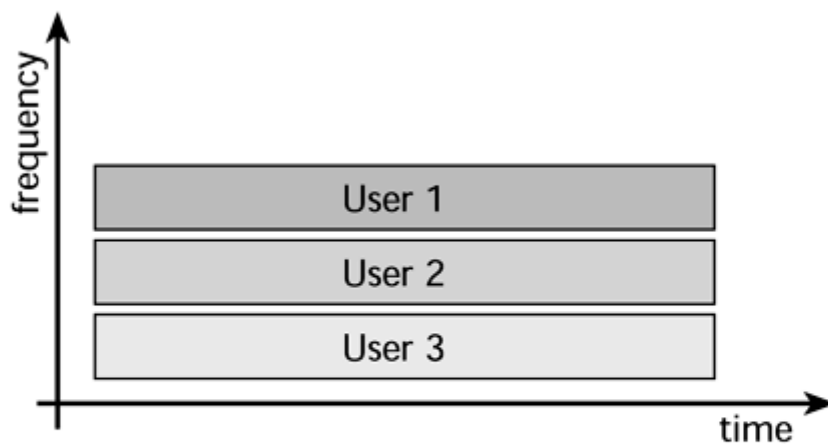
Οι βασικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης είναι οι εξής: **Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση στη Συχνότητα (Frequency Division Multiple Access – FDMA)**, **Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση στο Χρόνο (Time Division Multiple Access – TDMA)** και **Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση Κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA)**.

5.5.1 FDMA

Η FDMA χρησιμοποιείται σε κυψελωτά αναλογικά κυψελωτά δίκτυα. Κάθε χρήστης εκπέμπει σε διαφορετική συχνότητα. Με την FDMA όλοι εκπέμπουν ταυτόχρονα, αλλά κάθε εκπομπή καταλαμβάνει διαφορετική μπάντα συχνοτήτων. Για τις σημερινές απαιτήσεις η χωρητικότητα των FDMA συστημάτων είναι μικρή, περίπου 60 χρήστες ανά κυψέλη. Έτσι μόνο με αυτή τη τεχνική δε θα μπορούσε να εξυπηρετηθεί ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός ασύρματων χρηστών.

Πλεονεκτήματα της FDMA είναι το συγκριτικά χαμηλό κόστος υλοποίησης καθώς και το ότι δε χρειάζεται μηχανισμούς χρονισμού για το συγχρονισμό των σταθμών βάσης όπως η TDMA. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε παραστατικότερα πως στην FDMA όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν το σύστημα ταυτόχρονα, αλλά κάθε χρήστης 'δουλεύει' σε διαφορετική συχνότητα:

FDMA



AMPS

30KHz channels
Full-duplex
U.S.A.

TACS

25KHz channels
Full-duplex
U.K./Asia

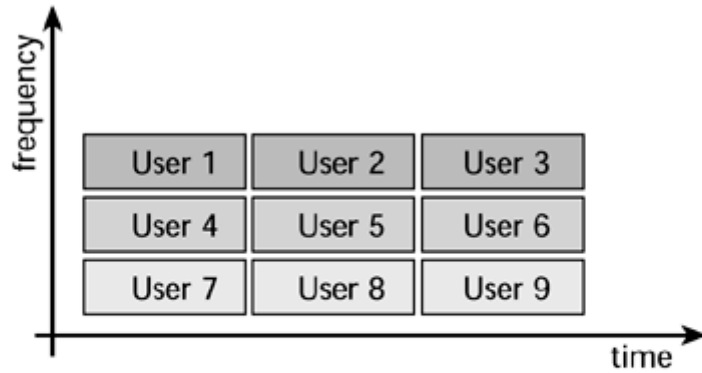
Σχ 4.30 FDMA

5.5.2 TDMA

Η TDMA χρησιμοποιείται σε ψηφιακά κυψελωτά και PCS συστήματα. Στην ουσία είναι ένας συνδυασμός **Frequency Division Multiplexing** (FDM) και **Time Division Multiplexing** (TDM). Πρώτα διαιρείται το διαθέσιμο φάσμα σε έναν αριθμό καναλιών. Έπειτα σε κάθε κανάλι εφαρμόζουμε TDM ώστε να μπορεί να 'σηκώνει' πολλαπλούς χρήστες πολυπλεγμένους στο χρόνο. Πολλά σύγχρονα πρότυπα κυψελωτών δικτύων στηρίζονται στη TDMA όπως τα GSM (Global System for Mobile Communications), UWC (Universal Wireless Communications), και JDC (Japanese Digital Cellular). Στο GSM για παράδειγμα κάθε κανάλι μπορεί να εξυπηρετήσει 8 χρήστες, όπου ο καθένας εκπέμπει/λαμβάνει σε διαφορετική χρονοθυρίδα (time slot).

Πλεονεκτήματα της σε σχέση με την FDMA είναι ότι παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και απόδοση φάσματος καθώς και η δυνατότητα χρήσης 'έξυπνων' ψηφιακών συσκευών (smart devices).

TDMA



U.S. TDMA (IS-136)

30KHz channels
3 time slots
Full-duplex
U.S.A.

GSM (ETSI standards)

200KHz channels
8 time slots
Full-duplex
"Everywhere"

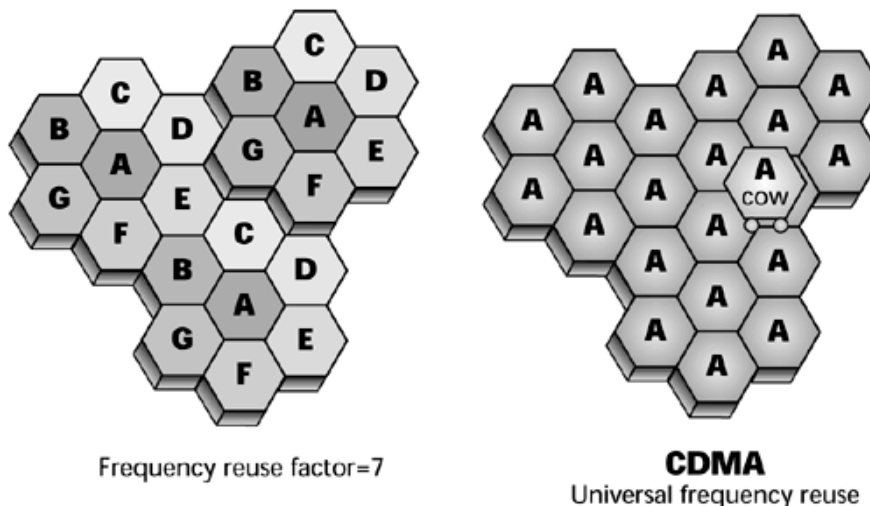
Σχ4. 31 TDMA

5.5.3 CDMA

Η CDMA είναι η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στις μέρες μας. Στην CDMA οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό γίνεται δυνατό γιατί κάθε 'συνομιλία' κωδικοποιείται με μοναδικό τρόπο. Έτσι κάθε δέκτης μπορεί να ξεχωρίσει την εκπομπή που απευθύνεται σ' αυτόν. Είναι η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που επιτυγχάνει τη μέγιστη πυκνότητα κάλυψης.

Ένα κλασικό παράδειγμα για τη κατανόηση της λειτουργία της CDMA είναι αυτό του 'κοκτέιλ πάρτι'. Φανταστείτε ότι βρίσκεστε σε ένα πάρτι και γύρω σας μιλάνε ταυτόχρονα ένας Έλληνας, ένας Ιάπωνας και ένας Ινδός. Ακούτε τις ομιλίες τους και επικεντρώνετε την προσοχή σας σε αυτή που περιέχει κατανοητές σε σας λέξεις. Είστε με άλλα λόγια ικανοί να φιλτράρετε τις συζητήσεις που δε σας ενδιαφέρουν γιατί αναγνωρίσατε έναν κώδικα (γλώσσα) κατανοητό σε σας.

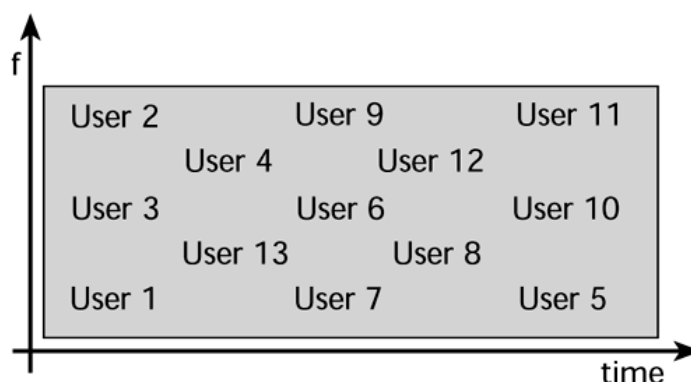
Στα σχήματα 32 και 33 μπορούμε να δούμε παραστατικότερα πως λειτουργεί η CDMA:



Frequency reuse factor=7

CDMA
Universal frequency reuse

CDMA



TIA/EIA-95B

1.25MHz channels
800/1900MHz
Cellular/PCS Band
Full duplex
U.S.A./Asia/Europe

Σχ 4.32 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας στη CDMA

Σχ 4. 33 CDMA

Υπάρχουν 2 γενιές CDMA. Η πρώτη γενιά έχει εύρος ζώνης 1.25 MHz. Η δεύτερη γενιά CDMA γνωστή και ως **Wideband CDMA (WCDMA)**, λειτουργεί με εύρος ζώνης 5, 10 ή 15 MHz. Η WCDMA μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερη πυκνότητα χρηστών, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και είναι περισσότερο ασφαλής από την CDMA.

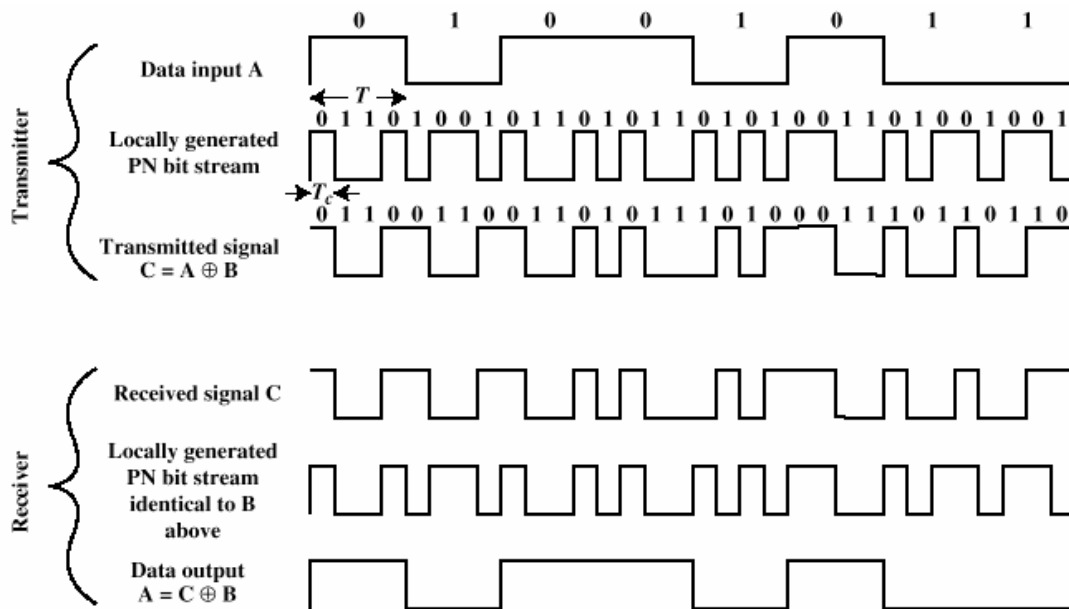
Στην CDMA δεν απαιτείται χρονικός συγχρονισμός, άρα και μηχανισμοί χρονισμού (clocking devices) όπως στην TDMA. Είναι ιδιαίτερα ανθεκτική στις παρεμβολές. Παρέχει σαφώς μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις FDMA και TDMA . Έχει απόδοση φάσματος 10-20 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με ένα αναλογικό δίκτυο. Μειονέκτημα της CDMA το ότι περικλείει πολύπλοκους μηχανισμούς ελέγχου ισχύος.

5.6 Τεχνικές ευρέος φάσματος (Spread Spectrum Techniques)

Με τη χρήση των τεχνικών ευρέος φάσματος μπορούμε να επιτύχουμε τη κωδικοποίηση των εκπομπών, που είναι απαραίτητη για τη CDMA. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι το είναι 'άπλωμα' του εύρους ζώνης του σήματος. Λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης του σήματος η φασματική πυκνότητα ισχύος του είναι χαμηλότερη, το σήμα στο κανάλι φαίνεται ουσιαστικά σαν θόρυβος. Το 'άπλωμα' του σήματος στη συχνότητα γίνεται συνδυάζοντας το σήμα με κάποιο κώδικα (Code Division Multiple Access) ανεξάρτητο του σήματος. Υπάρχουν δύο τεχνικές spread spectrum η **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)** και η **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**.

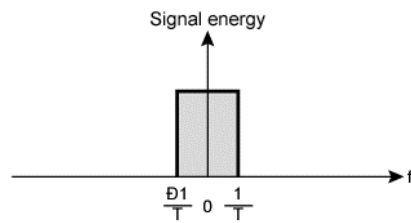
5.6.1 Direct Sequence

Η πιο διαδεδομένη spread spectrum τεχνική. Το σήμα πριν την εκπομπή του πολλαπλασιάζεται με μια ψευδοτυχαία ακολουθία bits, ή chips όπως λέγονται. Στο δέκτη το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται πάλι με την ίδια ψευδοτυχαία ακολουθία και έτσι απομονώνουμε το αρχικό σήμα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται καλύτερα πως διαμορφώνεται/αποδιαμορφώνεται το σήμα μετάδοσης στη DSSS:

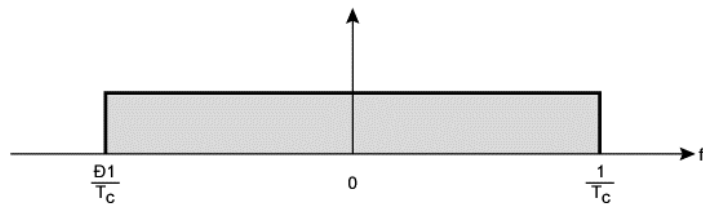


Σχ. 4.34 Παράδειγμα DSSS

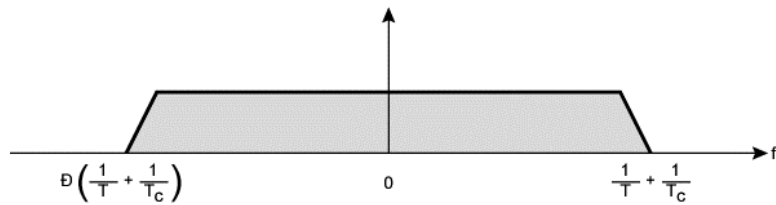
Στο σχήμα 35 βλέπουμε πιο παραστατικά το άπλωμα του σήματος στη συχνότητα όταν εφαρμόζουμε DSSS:



(a) Spectrum of data signal



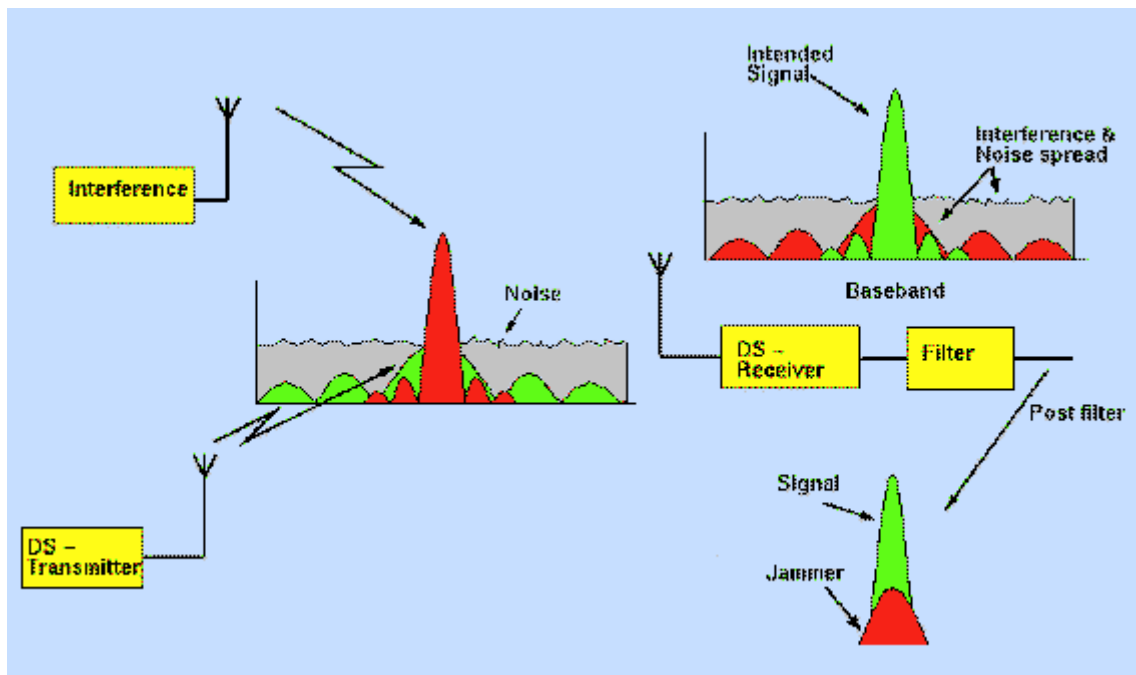
(b) Spectrum of pseudonoise signal



(c) Spectrum of combined signal

Σχ. 4.35 «Άπλωμα» του σήματος στη συχνότητα με DSSS

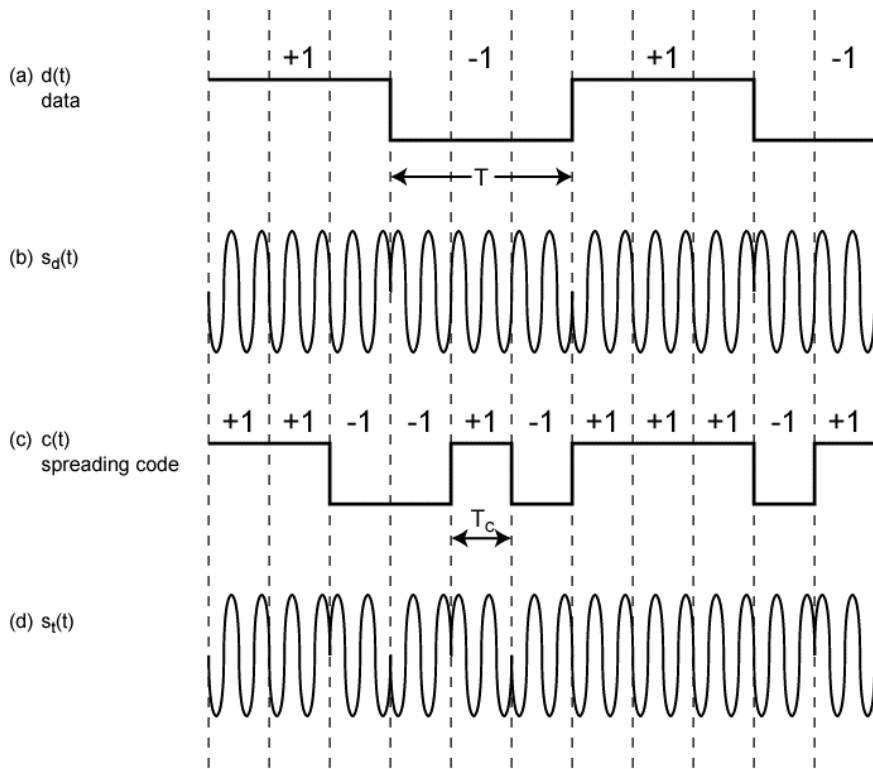
Η γνώση της ψευδοτυχαίας ακολουθίας στο δέκτη μας δίνει τη δυνατότητα να ξεχωρίσουμε το σήμα από το θόρυβο και λοιπές παρεμβολές, έτσι αντιμετωπίζονται προβλήματα παρεμβολών, παρά το γεγονός ότι η ισχύς του σήματος μπορεί να μη ξεπερνά αυτή του θορύβου.



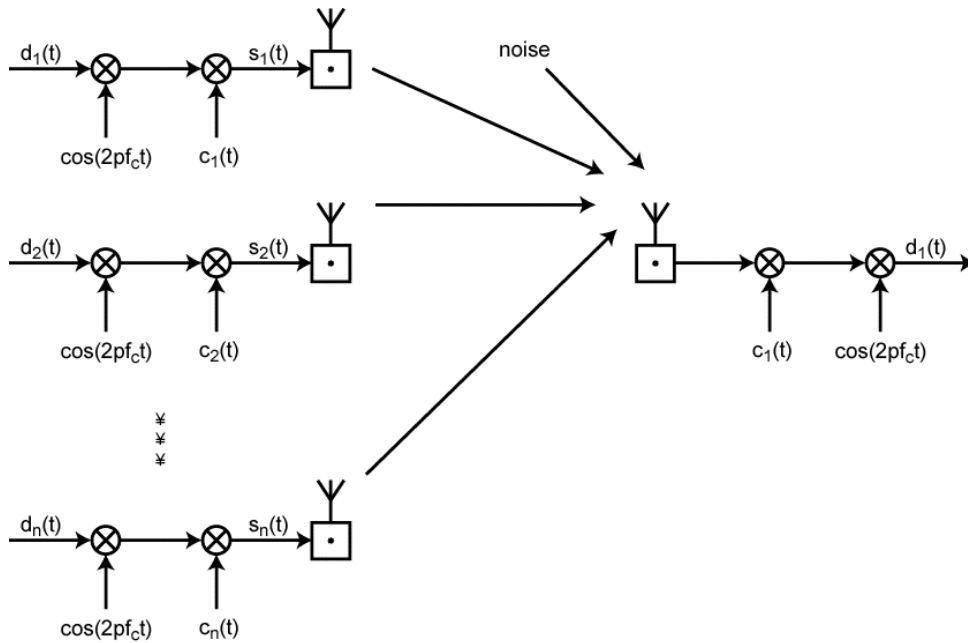
Σχ. 4.36 Αντιμετώπιση παρασιτικών εκπομπών στη DSSS

Το κύριο πρόβλημα στη DSSS είναι το φαινόμενο Near-Far. Αυτό συμβαίνει όταν ένας 'άσχετος' χρήστης βρίσκεται πιο κοντά στο δέκτη απ' ό,τι ο χρήστης του οποίου την εκπομπή θέλουμε να λάβουμε. Τότε είναι πιθανό η παρεμβολή από τον άσχετο χρήστη να έχει μεγαλύτερη ισχύ από το επιθυμητό σήμα ακόμα και μετά το φιλτράρισμά της στο δέκτη (δες σχήμα 35).

Να σημειωθεί πως η DSSS και γενικότερα οι spread spectrum τεχνικές δεν πρέπει να συγχέονται με τις μεθόδους διαμόρφωσης. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε spread spectrum τεχνικές για τη μετάδοση σήματος διαμορφωμένου με FSK ή BPSK. Στο σχήμα 37 βλέπουμε εφαρμογή της DSSS για σήμα διαμορφωμένο με BPSK.



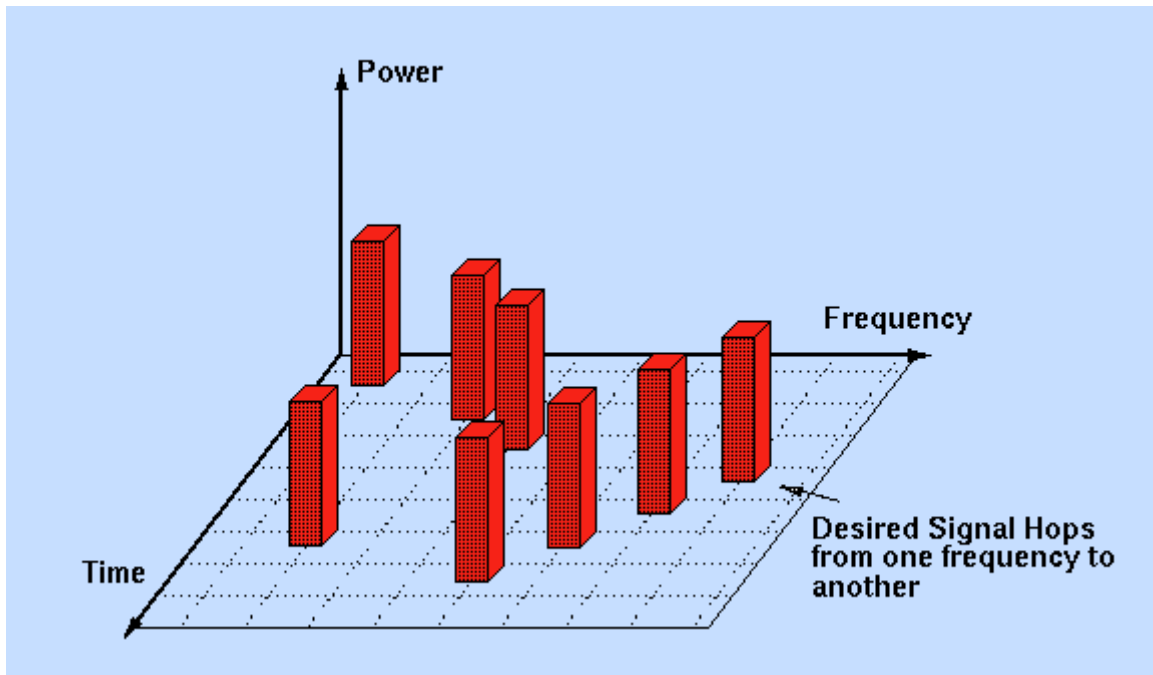
Σχ. 4.37 Εφαρμογή DSSS σε BPSK διαμορφωμένο σήμα



Σχ. 4.38 CDMA σε DSSS περιβάλλον

5.6.2 Frequency Hopping

Στη μέθοδο αυτή η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται συνεχώς σύμφωνα με μια ψευδοτυχαία ακολουθία. Η γνώση της ακολουθίας αυτής επιτρέπει την αποδιαμόρφωση του σήματος στο δέκτη.



Σχ. 4.39 Frequency Hopping

Αυτή η συνεχόμενη μετακίνηση της συχνότητας του φέροντος έχει σαν αποτέλεσμα το σήμα να είναι λιγότερο ευαίσθητο σε παρεμβολές, αφού παρεμβολή σε μια συγκεκριμένη συχνότητα θα επηρεάσει ένα μικρό τμήμα των μεταδιδόμενων bits.

5.6.3 Πλεονεκτήματα από τη χρήση Spread Spectrum Τεχνικών

- Ανοσία σε διάφορους τύπους θορύβου και στη παρεμβολή πολλαπλών διαδρομών
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκρυψη και κρυπτογράφηση σημάτων
- Πολλαπλοί χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι ευρέος φάσματος με πολύ μικρή παρεμβολή

Μειονεκτήματα τους η αυξημένη πολυπλοκότητα και οι μεγαλύτερες φασματικές απαιτήσεις.

5.6.4 Σύγκριση DSSS-FHSS

Βασικό πλεονέκτημα της DSSS έναντι της FHSS είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα που παρέχει. Όμως εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε εξωτερικούς παράγοντες (ανακλάσεις, φαινόμενο Near-Far). Προσφέρεται για point-to-multipoint κάλυψη μικρών αποστάσεων ή για point-to-point τοπολογίες μεγάλων αποστάσεων. Τυπικές εφαρμογές της DSSS έχουμε σε ασύρματα LANs εσωτερικού χώρου, point-to-point ζεύξεις μεταξύ κτιρίων, ζεύξεις μεταξύ POP (Point Of Presence) και σταθμούς βάσης κτλ.

Η FHSS αντίθετα εμφανίζει μεγάλη ανθεκτικότητα σε θορύβους, ανακλάσεις και παρεμβολές γενικότερα. Επίσης ο αριθμός των ταυτόχρονα ενεργών συστημάτων σε μια περιοχή είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τη DSSS. Η εφαρμογή της συνίσταται για κάλυψη μεγάλων περιοχών όπου είναι αδύνατη η χρήση κατευθυντικών κεραιών για τον περιορισμό παρεμβολών και θορύβου. Τυπικές εφαρμογές της σε κυψελωτά συστήματα για fixed BWA (Broadband Wireless Access) όπου είναι αδύνατη η χρήση DSSS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

6.1 Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Οι ασύρματες τεχνολογίες αντιπροσωπεύουν έναν γρήγορα αναδυόμενο τομέα όσον αφορά την ανάπτυξη και την αναγκαιότητα για την παροχή ευρείας πρόσβασης στο δίκτυο για όλες τις κοινότητες των πανεπιστημιούπολεων. Οι σπουδαστές, η σχολή και το προσωπικό θέλουν όλο και πιο ελεύθερη πρόσβαση στο δίκτυο από τις τάξεις γενικής χρήσης, τις αίθουσες συνεδριάσεων, τις αίθουσες διασκέψεων, ακόμη και τους διαδρόμους των κτηρίων των πανεπιστημιούπολεων. Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη δημιουργία κινητών υπολογιστικών εργαστηρίων που θα χρησιμοποιούν, υπολογιστές lap-top και οι οποίοι θα εξοπλίζονται με ασύρματες κάρτες Ethernet.

Table 1.1 Wireless frequency bands

Frequency band	Frequency range	Wavelength range
Extremely low frequency (ELF)	< 3 kHz	> 100,000 m
Very low frequency (VLF)	3–30 kHz	100,000–10,000 m
Low frequency (LF)	30–300 kHz	10,000–1,000 m
Mediumwave frequency (MF)	300–3,000 kHz	1,000–100 m
High frequency (HF)	3–30 MHz	100–10 m
Very high frequency (VHF)	30–300 MHz	10–1.0 m
Ultra high frequency (UHF)	300–3,000 MHz	1.0–0.1 m
Super high frequency (SHF)	3–30 GHz	10–1.0 cm
Extra high frequency (EHF)	30–300 GHz	1.0–0.1 cm

Πρόσφατα, η βιομηχανία έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην επίλυση μερικών περιορισμών για τη ευρεία υιοθέτηση των ασύρματων τεχνολογιών. Μερικοί από τους περιορισμούς ήταν οι διαφορές στην προτυποποίηση, το χαμηλό εύρος ζώνης και το υψηλό κόστος υποδομής και υπηρεσιών. Οι ασύρματες τεχνολογίες μπορούν να παρέχουν τις απαιτούμενες υπηρεσίες και να παρέχουν παράλληλα οικονομικές και αποδοτικές λύσεις. Η ασύρματη τεχνολογία υιοθετείται σε πολλές νέες εφαρμογές : στην διασύνδεση υπολογιστών, στον απομακρυσμένο έλεγχο και την ανάκτηση δεδομένων, στην παροχή ελέγχου πρόσβασης και την ασφάλεια, και είναι αναγκαία λύση για περιβάλλοντα όπου στα οποία δεν είναι εφικτή η καλωδίωση. Στο ρυθμιστικό μέτωπο, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (FCC) αναγνώρισε την αξία των μικροκυματικών συχνοτήτων και καθιέρωσε ζώνες συχνοτήτων καθώς και διαδικασίες χορήγησης αδειών για τα ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα στα 2, 4, και 11 GHz. Οι κατανομές για άλλες υπηρεσίες όπως στην ιδιωτική βιομηχανική ραδιοεπικοινωνία, στους συνδέσμους αποστολής σημάτων ραδιοφωνικής μετάδοσης (STLs), στις επιχειρήσεις μεταφορών, καθώς

και σε άλλες επιχειρήσεις έγιναν πάνω σε άλλες μικροκυματικές ζώνες συχνοτήτων.

Σήμερα, αυτές οι multihop (πολλαπλών αλμάτων) μικροκυματικές διαδρομές μεγάλων αποστάσεων έχουν αντικατασταθεί κατά ένα μεγάλο μέρος από τις οπτικές ίνες, που παρέχουν πολύ χαμηλότερες απώλειες και πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα επικοινωνιακής κίνησης. Οι δορυφορικές επικοινωνίες διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο, αν και για τη διπλής κατεύθυνσης μετάδοση φωνής και βίντεο, οι οπτικές ίνες είναι μια καλύτερη λύση δεδομένου ότι δεν υφίσταται η χρονική καθυστέρηση των $\frac{1}{4}$ δευτερολέπτων (κατά προσέγγιση) λόγω του round-trip, όταν αναμεταδίδεται το σήμα μέσω ενός δορυφόρου ο οποίος βρίσκεται σε γεωστατική τροχιά 35.700 χιλιομέτρων επάνω από τον ισημερινό της Γης.

Σήμερα, οι συχνότητες μέχρι και τα 42 GHz είναι προσβάσιμες χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία, και οι έρευνες έχουν στραφεί στις υψηλότερες συχνότητες. Τα fixed wireless ευρυζωνικά συστήματα που πραγματευόμαστε σε αυτό το βιβλίο λειτουργούν στις συχνότητες του εύρους ζώνης που προαναφέραμε. Εντούτοις, είναι προφανές από την προηγούμενη συζήτηση της εξέλιξης των ασύρματων συστημάτων, ότι οι νέοι ημιαγωγοί και η υπόλοιπη τεχνολογία για τα μικροκύματα θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη του hardware που χρησιμοποιείτε στις ασύρματες επικοινωνίες

Οι συχνότητες μέχρι τα 350 GHz αποτελούν το αντικείμενο της έρευνας και, ως ένα ορισμένο βαθμό, χρησιμοποιούνται για περιορισμένες στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές.

6.1.1 Fixed wireless

Οι τύποι σταθερών ασύρματων τεχνολογιών περιλαμβάνουν LMDS (local multipoint distribution service), MMDS (multi-channel multipoint distribution service), κυψελοειδής / PC (προσωπικό σύστημα επικοινωνιών), DBS (direct broadcast satellite), και επίγειες ψηφιακές υπηρεσίες. Οι point-to-point LMDS ασύρματες εφαρμογές περιλαμβάνουν τις συνδέσεις μεταξύ των πύργων κινητής τηλεφωνίας και των κεντρικών γραφείων, ή τις υπεραστικές συνδέσεις μεταξύ μητροπολιτικών κτηρίων με ρυθμούς δεδομένων μεταξύ 150 Mbps και 620 Mbps σε απόσταση 2 χλμ. Οι point-to-multipoint συσκευές μπορούν να μεταδώσουν πακέτα με ρυθμούς της τάξεως των 150 Mbps προς όλες τις κατευθύνσεις σε απόσταση εύρους από 1 έως 3 χλμ. Τα LMDS λειτουργούν στις συχνότητες των 24 GHz, 28 GHz, και 39 GHz –επιτυγχάνοντας ρυθμούς δεδομένων (θεωρητικά) της τάξεως των 100Mbps, με τα 45 Mbps να είναι ο ρυθμός δεδομένων που επιτυγχάνεται στην πράξη. Οι σταθερές ασύρματες επικοινωνίες εξυπηρετούν και τα δημόσια δίκτυα και τις ιδιωτικές επιχειρήσεις. Οι αρχικές point-to-point ασύρματες συνδέσεις προσέφεραν ταχύτητες της τάξεως των megabit με ρυθμούς T1/E1 για να επεκτείνουν το χαλκό στα PDH δίκτυα. Οι σημερινές ασύρματες συνδέσεις θα απαιτούν προσαρμοζόμενες ταχύτητες της τάξεως των gigabit για να

υποστηρίζουν OC-192 ρυθμούς στα σημερινά αναπτυσσόμενα δίκτυα SONET/SDH. Η MMDS τεχνολογία χρησιμοποιεί συχνότητες ανάμεσα στα 2.1GHz και 2.7GHz, σε απόσταση 50km, και με ρυθμούς από 128 Kbps μέχρι 10 Mbps. Η συγκεκριμένη τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει μια καλή εναλλακτική λύση σε σχέση με τους DSL και cable διαποδιαμορφωτές (modems).

Η Fixed wireless τεχνολογία εντούτοις ήταν αργή στο να επεκταθεί και να αναπτυχθεί και αποτελεί την τρίτη σε σειρά ευρυζωνική υπηρεσία, σε αριθμό συνδρομητών. Μερικές από τις προκλήσεις όσο αφορά την επέκταση περιλαμβάνουν την τυποποίηση της τεχνολογίας, αναπτύσσοντας μια ευρύτερη βάση κατασκευαστών υλικού εξοπλισμού (hardware), και συνεχίζοντας την τάση προς τη εδραίωση των σταθερών ασύρματων φορέων παροχής υπηρεσιών. Επίσης, η αξιοπιστία επηρεάζεται δραματικά από τις δύσκολες καιρικές συνθήκες - όπου σε ομιχλώδης συνθήκες το σήμα διαστρεβλώνεται, με αποτέλεσμα να αναγκάζονται οι προμηθευτές να εγκαταστήσουν τις συσκευές αποστολής σημάτων πιο κοντά μεταξύ τους. Οι LMDS και MMDS είναι οι χαρακτηριστικές σταθερές ασύρματες τεχνολογίες - με τις άλλες προηγούμενες καθιερωμένες ασύρματες τεχνολογίες, όπως κυψελοειδής/PCs, DBS και οι ψηφιακές επίγειες υπηρεσίες να είναι καλές εναλλακτικές λύσεις για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει μια επισκόπηση των υπάρχουσών ασύρματων τεχνολογιών και άλλων σχετικών ζητημάτων.

6.1.2 Είδη FIXED WIRELESS Δικτύων

Οι τύποι τοπολογιών, Fixed wireless δικτύων που θα συναντήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο διακρίνονται σε τέσσερις ευρείες κατηγορίες. Κάθε μία παρουσιάζεται εν συντομία στις εξής υποενότητες και πιο λεπτομερής ανάλυση γίνεται στα επόμενα κεφάλαια.

6.1.2.1 Point-to-point (PTP) δίκτυα

Τα point to point δίκτυα (PTP) αποτελούνται από έναν ή περισσότερους σταθερούς PTP συνδέσμους, υιοθετώντας συνήθως ιδιαίτερας κατευθυντικές κεραιές μετάδοσης και λήψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2. Τα δίκτυα τέτοιων συνδέσμων που είναι συνδεδεμένοι από άκρη σε άκρη, μπορούν να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις όπως στην περίπτωση του AT&T 4-gHz δικτύου συνδέσμων που διέσχισε τις Ηνωμένες Πολιτείες το 1951. Οι σύνδεσμοι που είναι διασυνδεδεμένοι από άκρη σε άκρη, αναφέρονται συχνά ως διαδοχικά (tandem) συστήματα, και η ανάλυση για την end-to-end αξιοπιστία ή διαθεσιμότητα ολόκληρου του δικτύου πρέπει να υπολογιστεί χωριστά από την διαθεσιμότητα των μεμονωμένων συνδέσμων.

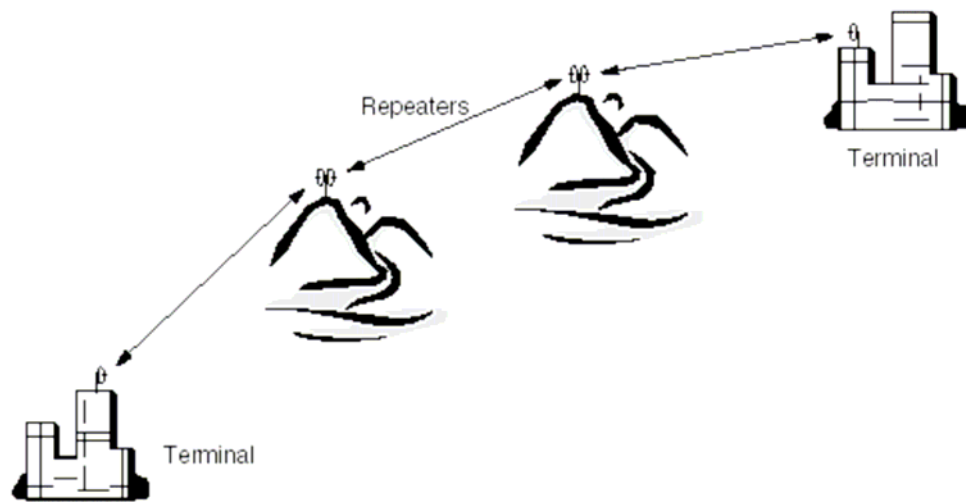


Figure 1.2 Point-to-point (PTP) network connecting two cities through mountaintop repeaters.

6.1.2.2 Point-to-multipoint (PMP) δίκτυα

Τα PMP δίκτυα χρησιμοποιούσαν μια ‘hub and spoke’ προσέγγιση για τη διανομή υπηρεσιών δεδομένων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4. Ο κόμβος (hub) είναι κάτι ανάλογο με το σταθμό βάσης σε ένα κυψελοειδές σύστημα. Αποτελείται από μια ή περισσότερες κεραιές ευρείας δέσμης ραδιοσήματος που σχεδιάζονται για να εκπέμπουν προς πολλαπλά τερματικά. Ανάλογα με τη ζώνη συχνότητας που χρησιμοποιείται, και τους ρυθμούς δεδομένων που παρέχονται στους τελικούς χρήστες, απαιτούνται αρκετοί κόμβοι για να παρέχουν υπηρεσίες - παντού - σε μια πόλη. Τα απομακρυσμένα τερματικά των τελικών χρηστών είναι μηχανικές εγκαταστάσεις στις οποίες οι κατευθυντικές κεραιές έχουν εγκατασταθεί σε θέσεις οι οποίες είναι στο LOS (line of site – εύρος κάλυψης) του κόμβου και έχουν προσανατολιστεί, από έναν τεχνικό, προς τον κόμβο.. Σε μερικές περιπτώσεις αυτό μπορεί να απαιτήσει εκτενή εργασία σε κάθε θέση τερματικού.

Η PMP αρχιτεκτονική δικτύων είναι πέραν κάθε αμφιβολίας η δημοφιλέστερη προσέγγιση στην Fixed wireless ευρυζωνική τεχνολογία. Μιμείται την τοπολογία δικτύων που χρησιμοποιείται επιτυχώς για δεκαετίες στα καλωδιακά τηλεφωνικά δίκτυα, τα δίκτυα καλωδιακών τηλεοράσεων, ακόμα και στα ηλεκτρικά δίκτυα, δίκτυα φυσικού αερίου, και δίκτυα νερού όλων των ειδών. Για τις ασύρματες τεχνολογίες, το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι το κόστος της υποδομής για την κατασκευή των κόμβων που απαιτούνται για να επιτευχθεί το LOS σε ένα μεγάλο ποσοστό της υπηρεσίας.

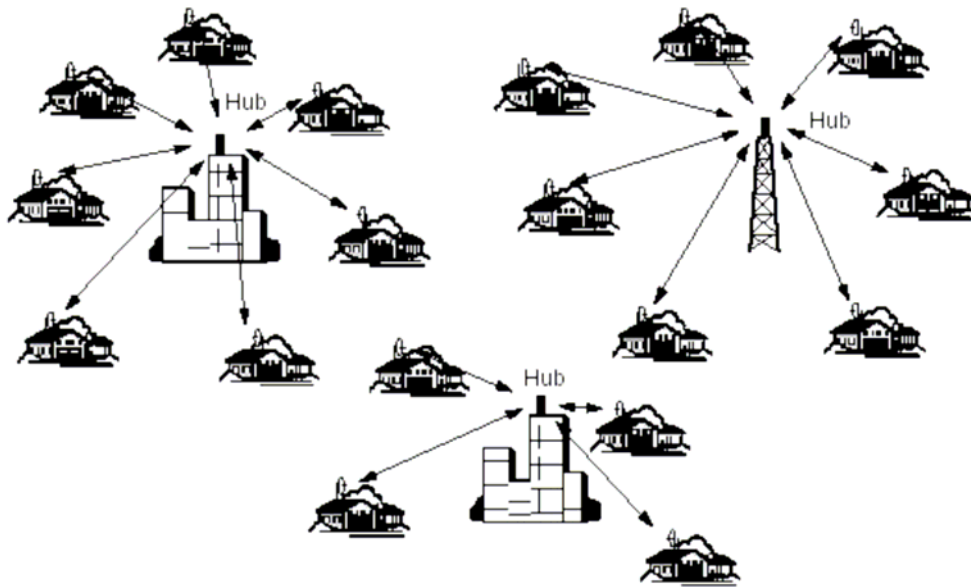


Figure 1.4 Point-to-multipoint (PMP) network.

6.1.2.3 NLOS point-to-multipoint δίκτυα

Τα non-line-of-sight (χωρίς άμεση ορατότητα) PMP δίκτυα είναι πανομοιότυπα στην τοπολογία με τα PMP δίκτυα που περιγράφονται ανωτέρω. Η διαφορά βρίσκεται στη φύση των απομακρυσμένων τερματικών. Αντί των απομακρυσμένων τερματικών που κατασκευάζονται και εγκαθίστανται (από επαγγελματίες), για να επιτύχουν την επιθυμητή απόδοση χρησιμοποιώντας μια εξωτερική κεραία, τα τερματικά τοποθετούνται αυθαίρετα (όπου πιθυμεί ο εκάστοτε χρήστης) από τον τελικό χρήστη μέσα σε ένα σπίτι ή σε ένα γραφείο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θέση αυτών των τερματικών θα είναι θέσεις που δεν έχουν καθαρό, χωρίς εμπόδια οπτικό πεδίο προς τον κόμβο του δικτύου και για το λόγο αυτό καλούνται non-line-of-sight. Η εξασθένιση του σήματος και η μεταβλητότητα του πλάτους του σήματος που εμφανίζεται κατά μήκος του ασύρματου μονοπατιού από το κόμβο του δικτύου προς τη NLOS περιοχή, αποτελούν νέες προκλήσεις για τους σχεδιαστές των συστημάτων στις προσπάθειές τους να παρέχουν μια αξιόπιστη υπηρεσία υψηλών ρυθμών δεδομένων σε κάθε τερματικό. Το μηχανικό πρόβλημα είναι παρόμοιο με το πρόβλημα παροχής υπηρεσίας στα κινητά τηλέφωνα, εντούτοις, όπως εξηγείται στα επόμενα κεφάλαια, ο μηχανικός μπορεί να εκμεταλλευτεί μερικές προηγμένες τεχνικές στα τερματικά και στο δίκτυο που δεν είναι ακόμα πρακτικές για τους μηχανικούς κυψελοειδών συστημάτων.

Εφαρμογές

Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές για όλες τις διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες. Για τους σκοπούς αυτού του κεφαλαίου, οι εφαρμογές των ασύρματων τεχνολογιών διακρίνονται στις εξής:

Μετάδοση φωνής και μηνυμάτων,
Φορητές και άλλες Internet-enabled συσκευές, και
Δικτύωση δεδομένων.

Αν και είναι μία παραδοσιακή ταξινόμηση, αυτός ο τρόπος κατηγοριοποίησης των ασύρματων τεχνολογιών περιλαμβάνει επίσης τις διαφορές τους στα μοντέλα υπολογισμού κόστους, εύρους ζώνης, περιοχές κάλυψης, κ.λπ.... Τέλος, συμπεριλαμβάνεται μία ενότητα αναφορικά με τα ζητήματα που σχετίζονται με τις ασύρματες τεχνολογίες

6.1.3 Μετάδοση φωνής και μηνυμάτων

Τα κινητά τηλέφωνα, τα μπίπερ, και τα εμπορικά διπλής κατεύθυνσης επιχειρησιακά ραδιόφωνα μπορούν να παρέχουν και τις υπηρεσίες φωνής και μηνύματος. Αυτές οι συσκευές μπορούν να βασιστούν στα αναλογικά ή ψηφιακά πρότυπα που διαφέρουν πρώτιστα στον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζονται τα σήματα και κωδικοποιούν τις πληροφορίες. Το αναλογικό πρότυπο είναι το Advanced Mobile Phone Service (AMPS). Το ψηφιακό πρότυπο είναι το Global System for Mobile Communications (GSM), το Time Division Multiple Access (TDMA – πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση στο χρόνο-), ή το Code Division Multiple Access (CDMA – πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα).

Κανονικά, οι συσκευές λειτουργούν μέσα σε δίκτυα που παρέχουν μητροπολιτική, πολιτειακή, ή εθνική κάλυψη. Αυτά τα μεγάλα και δαπανηρά δίκτυα χρησιμοποιούνται από τους φορείς όπως το AT&T, Sprint, Verizon, τοπικές τηλεφωνικές επιχειρήσεις, κ.λπ. και λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, που διατίθενται από τη FCC. Η ρυθμαπόδοση εξαρτάται από τα πρότυπα τα οποία χρησιμοποιούνται, αλλά προς το παρόν στις ΗΠΑ, αυτά τα δίκτυα λειτουργούν σε ρυθμούς της τάξεως των 16 Kbps. Τα νέα ψηφιακά πρότυπα, επίσης καλούμενα ως «Υπηρεσίες Τρίτης Γενιάς» ("Third Generation Services") ή 3G, ξεκίνησαν την λειτουργία τους το 2004, και παρέχουν 30 φορές ταχύτερους ρυθμούς μεταγωγής και προηγμένες δυνατότητες. Λόγω της ύπαρξης πολλών προτύπων, υπάρχουν ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ των δικτύων, των φορέων, και των συσκευών. Γενικά, οι χρεώσεις βασίζονται στην χρήση ανά λεπτό ή ανά αριθμό μηνυμάτων αποστολής.

6.1.4 Φορητές και άλλες Internet-enabled συσκευές

Τα κινητά τηλέφωνα (που χρησιμοποιούνται για σύνδεση στο διαδίκτυο) και Personal Digital Assistants (PDAs) αποτελούν τα νεώτερα προϊόντα που μπορούν να συνδεθούν με το Διαδίκτυο μέσω ενός ψηφιακού ασύρματου δικτύου. Τα νέα πρωτόκολλα, όπως το Wireless Application Protocol (WAP), και οι νέες γλώσσες, όπως η WML (Wireless Markup Language) έχουν αναπτυχθεί ειδικά για αυτές τις συσκευές, ώστε να μπορούν να συνδεθούν στο Διαδίκτυο. Εντούτοις, η πλειοψηφία των ισχυουσών υπηρεσιών στο Διαδίκτυο δεν έχουν βελτιστοποιηθεί

για αυτές τις συσκευές προς το παρόν, μόνο το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τα stock quotes, οι ειδήσεις, τα μηνύματα και απλές transaction-oriented υπηρεσίες είναι διαθέσιμες. Άλλοι περιορισμοί περιλαμβάνουν το χαμηλό εύρος ζώνης (λιγότερο από 14 Kbps), τη χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας, το υψηλό κόστος, την ανάγκη για επιπρόσθετο εξοπλισμό, και την υψηλή αξιοποίηση της ισχύος των μπαταριών των συσκευών. Εντούτοις, αυτός ο τύπος ασύρματης τεχνολογίας αναπτύσσεται ραγδαία, με πιο βελτιωμένα και πιο διαλειτουργικά προϊόντα.

6.1.5 Δικτύωση δεδομένων

Κάνουμε τη διαφοροποίηση μεταξύ των ‘καθαρών’ εφαρμογών δεδομένων σε **ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs)** και δεδομένων, φωνής, και βίντεο που συγκλίνουν στην **ευρυζωνική ασύρματη τεχνολογία**. Επίσης εν συντομία συζητάμε για το **Bluetooth**, μια νέα ασύρματη τεχνολογία.

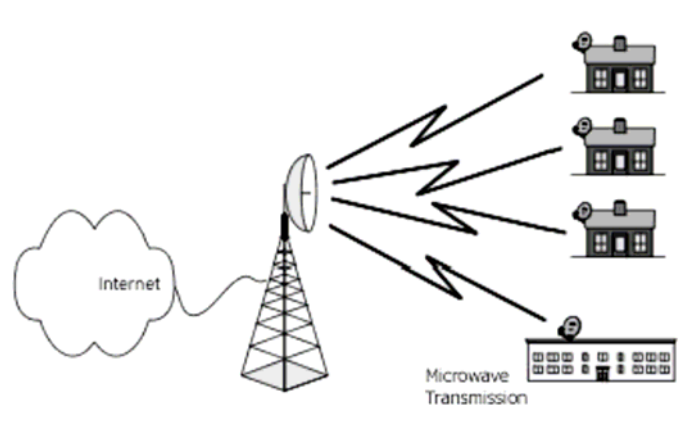
6.1.5.1 Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN)

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) εφαρμόζονται ως επέκταση στα ενσύρματα LANs μέσα σε ένα κτήριο και μπορεί να παρέχει τα τελευταία λίγα μέτρα της σύνδεσης μεταξύ ενός ενσύρματου δικτύου και του κινητού χρήστη.

Τα WLANs είναι βασισμένα στο IEEE 802.11 πρότυπο. Υπάρχουν τρία φυσικά επίπεδα για τα WLANs: δύο προδιαγραφές ραδιοσυχνοτήτων (RF - direct sequence and frequency hopping spread spectrum) και ένα υπέρυθρο (IR). Τα περισσότερα WLANs λειτουργούν στην ζώνη συχνοτήτων των 2,4 GHz που δεν απαιτεί άδεια, και παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 2 Mbps. Το νέο πρότυπο, το 802.11b είναι direct sequence μόνο, και παρέχει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 11 Mbps. Αυτήν την περίοδο το κυρίαρχο πρότυπο, υποστηρίζεται ευρέως από προμηθευτές όπως η Cisco, η Lucent, η Apple, κ.λπ... Από τα μέσα του 2002, λειτουργεί ένα νέο πρότυπο, το 802.11a, λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz (δεν απαιτείται άδεια σε αυτό το φάσμα) και παρέχει ρυθμούς μέχρι και 54 Mbps.

Οι WLAN διατάξεις ποικίλουν από -απλές, ανεξάρτητες, peer-to-peer συνδέσεις μεταξύ ενός συνόλου υπολογιστών-, μέχρι και σε πιο πολύπλοκα δίκτυα πιο σύνθετης, υποδομής. Υπάρχουν επίσης και ασύρματες λύσεις από σημείο -σε-σημείο (point-to-point) και από σημείο -σε- πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint). Μια point-to-point λύση χρησιμοποιείται για να ενώσει δύο τοπικά δίκτυα, και για να παρέχει μια εναλλακτική λύση σε σχέση με την ενσύρματη σύνδεση μεταξύ δύο γεωγραφικά απομακρυσμένων θέσεων (μέχρι και 30 μίλια). Οι λύσεις point-to-multipoint συνδέουν αρκετές, αυτόνομες εγκαταστάσεις σε μια περιοχή ή σε ένα κτήριο. Και οι point-to-point και οι point-to-multipoint λύσεις μπορούν να βασιστούν στο πρότυπο 802.11b ή σε πιο δαπανηρές λύσεις που βασίζονται στην

υπέρυθρη τεχνολογία και μπορούν να παρέχουν ρυθμούς μέχρι και 622 Mbps (ταχύτητα Oc- 12). Σε μια τυπική διάταξη WLAN, υπάρχουν δύο βασικά συστατικά:



Σημεία πρόσβασης (Access Points) - ένας σταθμός πρόσβασης σημείου/βάσης συνδέεται με ένα LAN μέσω ενός Ethernet καλωδίου. Τα σημεία πρόσβασης συνήθως τοποθετούνται σε υψηλά σημεία και λαμβάνουν, αποθηκεύουν και μεταδίδουν δεδομένα μεταξύ του WLAN και της ενσύρματης υποδομής δικτύων. Ένα σημείο πρόσβασης μπορεί να υποστηρίξει κατά μέσον όρο είκοσι χρήστες και παρέχει κάλυψη που ποικίλλει από 20 μέτρα, σε περιοχές με εμπόδια (τοιχοί, κλιμακοστάσια, ανελκυστήρες) και μέχρι 100 μέτρα σε περιοχές χωρίς εμπόδια. Σε ένα κτήριο μπορεί να χρειαστούν διάφορα σημεία πρόσβασης για να υπάρχει πλήρης κάλυψη και να επιτρέπεται στους χρήστες να μετακινούνται μεταξύ των σημείων πρόσβασης χωρίς να χάνουν τη σύνδεσή τους με το δίκτυο. Οι κεραίες WLL τοποθετούνται σε μικρούς πύργους ή στις οροφές του πελάτη και είναι στραμμένες προς έναν κεντρικό κύριο WLL πύργο που παρέχει την υπηρεσία. Σε μερικές δοκιμαστικές περιπτώσεις, οι WLL αντικαθιστούν εξολοκλήρου την παραδοσιακή καλωδίωση. Παραδείγματος χάριν, μια απομακρυσμένη κοινότητα μπορεί να μοιράζεται μία γραμμή T-3 (45 Mbps) που παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα για όλες τις ανάγκες φωνής, βίντεο, και δεδομένων.

Ασύρματος προσαρμογέας συνδέει τους χρήστες μέσω ενός σημείου πρόσβασης με το υπόλοιπο LAN. Ένας ασύρματος προσαρμογέας μπορεί να είναι μια κάρτα PC σε ένα φορητό υπολογιστή, ένας προσαρμογέας ISA ή PCI σε έναν υπολογιστή γραφείου, ή μπορεί να ενσωματωθεί πλήρως μέσα σε μια φορητή συσκευή. Οι E1/T1 ή STM-1/OC-3 διεπαφές μπορούν να συνδεθούν και στις δύο πλευρές με WLL. Όπως συμβαίνει και στο LMDS, όταν απαιτούνται διεπαφές δεδομένων, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός χρήσης δεδομένων και φωνής.

6.1.5.2 Broadband Wireless

Η ασύρματη ευρυζωνική (BW) τεχνολογία είναι μια νέα ασύρματη τεχνολογία που επιτρέπει την ταυτόχρονη ασύρματη μετάδοση φωνής, δεδομένων, και βίντεο. Το BW θεωρείται ανταγωνιστική τεχνολογία με τη Digital Subscriber Line (DSL) τεχνολογία. Εφαρμόζεται γενικά στις μητροπολιτικές περιοχές και απαιτείται line of sight μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Το BW διακρίνεται σε: **Local multi-point distribution service (LMDS)** και **Multi-channel multi-point distribution service (MMDS)**. Και οι δύο λειτουργούν στο FCC-αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων.

Η LMDS είναι μία υπηρεσία δικτύωσης υψηλού εύρους ζώνης που λειτουργεί στο εύρος των 28-31 GHz του φάσματος συχνοτήτων και έχει ικανοποιητικό εύρος ζώνης για να μεταδώσει όλα τα κανάλια της δορυφορικής τηλεόρασης, όλα τα τοπικά over-the-air κανάλια, και υπηρεσία δεδομένων με πολύ υψηλή ταχύτητα ταυτόχρονης αμφίδρομης κατεύθυνσης (full duplex). Η μέση απόσταση μεταξύ των LMDS πομπών είναι περίπου ένα μίλι..

Η MMDS λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες, στο αδειοδοτημένο εύρος συχνοτήτων των 2.5 GHz. Η MMDS παρέχει ευρύτερη κάλυψη από την LMDS, μέχρι 35 μίλια, αλλά έχει χαμηλότερη ρυθμαπόδοση. Η ασύρματη ευρυζωνική υπηρεσία απαιτεί δαπανηρό εξοπλισμό και υποδομές. Εντούτοις, καθώς υιοθετείται ευρύτερα, αναμένεται ότι το κόστος υπηρεσιών θα μειωθεί.

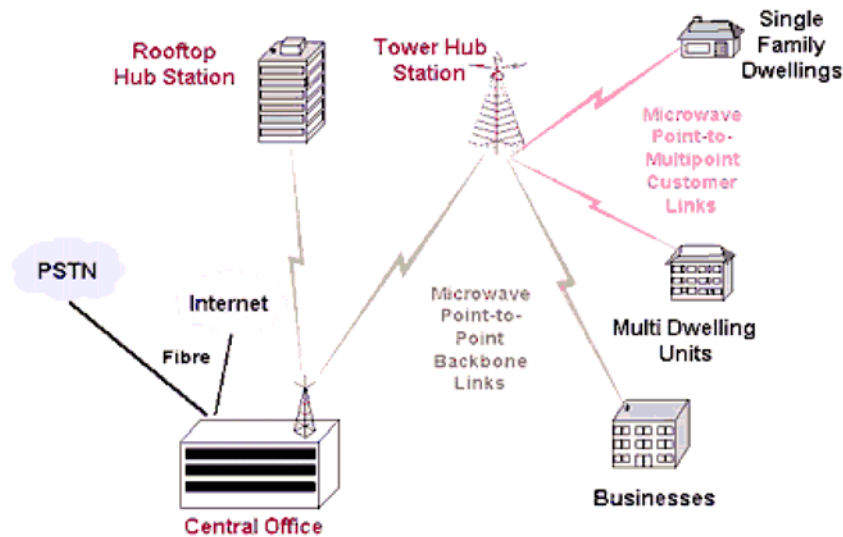
6.1.6 Τεχνολογίες LMDS και MMDS: Fixed Wireless Options in Telecom

Η LMDS και η MMDS έχουν τις ιστορικές ρίζες τους στην τηλεόραση. Ο πρόδρομος της MMDS, η πολυσημειακή υπηρεσία διανομής (MDS), καθιερώθηκε από τη Federal Communications Commission (FCC) το 1972. Η επιτροπή αυτή σκέφτηκε αρχικά ότι η MDS θα χρησιμοποιούνταν πρώτιστα στη μετάδοση επιχειρησιακών δεδομένων. Εντούτοις, η υπηρεσία έγινε όλο και περισσότερο δημοφιλής για τη μετάδοση ψυχαγωγικών προγραμμάτων. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς ραδιοφωνικής μετάδοσης, των οποίων οι μεταδόσεις λαμβάνονται παγκοσμίως, η MDS είχε σχεδιαστεί με σκοπό να φθάσει μόνο σε ένα κοινό, οι οποίοι θα ήταν συνδρομητές.

Το 1983 η Επιτροπή επανεκχώρησε οκτώ κανάλια από την ITFS (instructional television fixed service) στην MDS. Αυτά τα οκτώ κανάλια αποτελούν την MMDS. Η MDS υπηρεσία και τα κανάλια MMDS χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με τα κανάλια ITFS για να παρέχουν ψυχαγωγικά προγράμματα στους συνδρομητές. Αυτή η υπηρεσία είναι γνωστή ως ασύρματη καλωδίωση (wireless cable).

6.1.6.1 LMDS

Local Multipoint Distribution Service (LMDS)



Η LMDS είναι ένα σταθερό ευρυζωνικό, point-to-multipoint, μικροκυματικό σύστημα στο οποίο απαιτείται οπτική επαφή. Λειτουργεί σε μια υψηλή συχνότητα (χαρακτηριστικά μέσα σε προσδιορισμένες ζώνες εύρους 24-40GHz), με πολύ υψηλούς ρυθμούς. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού που απαιτείται (και της ισχύος που απαιτείται για να μεταδοθούν τα σήματα) και οι δύο τεχνολογίες θεωρούνται απαγορευτικά ακριβές για το καταναλωτικό κοινό. Επομένως, οι LMDS χειριστές αρχικά θα στοχεύουν στις επιχειρήσεις και τους χειριστές δικτύων, αν και η καταναλωτική αγορά είναι πιθανό να ανακάμψει με τη πάροδο του χρόνου καθώς το κόστος της CPE θα μειωθεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι η CPE κοστίζει \$5.000 για LMDS στο εύρος συχνοτήτων των 26 GHz. Η LMDS εφαρμόζεται με την εγκατάσταση μικρών κεραιών στα τοπικά κτήρια και τους πύργους, με σκοπό να εξυπηρετήσουν την τοπική περιοχή. Οι κυψελωτές περιοχές συνδέονται μεταξύ τους με οπτικές ίνες καλώδια ή με ράδιο-συνδέσεις. Στη συνέχεια, οι πελάτες συνδέονται με το δίκτυο μέσω μιας μικρής κεραίας (πίατο) 30 εκατ. που είναι στραμμένη προς το κοντινότερο κυψελωτό δίκτυο. Μία 'μονάδα πομποδέκτη' ("Transceiver Unit") εγκαθίσταται σε κάθε πελάτη για να έχει δυνατότητα λήψης και μετάδοσης σημάτων. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας δεδομένων όπως το ATM και το IP μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κοινού με την LMDS τεχνολογία. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της LMDS (και άλλων ασύρματων τεχνολογιών) είναι ότι είναι μία ραγδαία αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Σε σύγκριση με τη σταθερή ενσύρματη τεχνολογία, όχι μόνο είναι πιο φθηνή, αλλά επιπλέον δεν απαιτείται χρόνος για τις εκσκαφές ώστε να περαστούν τα καλώδια.

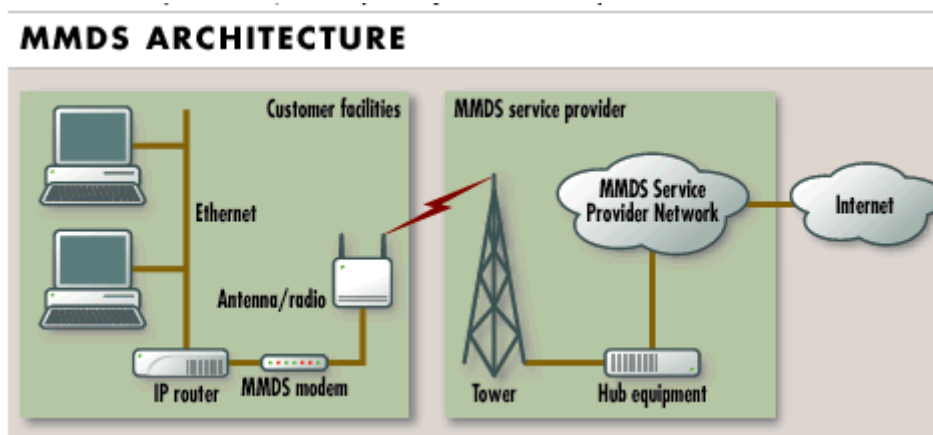
Ωστόσο, η LMDS τεχνολογία απαιτεί οπτική επαφή (για την επικοινωνία) και είναι ευαίσθητη στη βροχόπτωση και τις δύσκολες καιρικές συνθήκες γενικά.

Γιατί LMDS;

Μια περίπτωση στην οποία είναι χρήσιμη η χρήση LMDS τεχνολογίας είναι όταν μία μεγάλη επιχείρηση έχει κτήρια που είναι εξαπλωμένα σε μια περιοχή. Εντούτοις, σε ένα τμήμα της περιοχής αυτής διέρχεται ένας αυτοκινητόδρομος. Σε αυτό το παράδειγμα δεν είναι οικονομικά αποδοτικό να εγκατασταθούν γραμμές εδάφους κάτω από τον αυτοκινητόδρομο για να επιτραπεί η επικοινωνία στο άλλο μισό της περιοχής. Τα ασύρματα LMDS μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιαδήποτε πλευρά του αυτοκινητόδρομου για να παρέχουν δυνατότητες επικοινωνίας που δεν ήταν προηγουμένως εφικτές. Επιπλέον, η ασύρματη αυτή τεχνολογία μπορεί να εγκατασταθεί και μέσα σε κάθε κτήριο παρέχοντας άμεση εσωτερική επικοινωνία μέσα στην επιχείρηση χωρίς να χρησιμοποιούν το πάροχο σταθερής τηλεφωνίας της περιοχής.

6.1.6.2 MMDS

Η MMDS επιτρέπει αμφίδρομη κατεύθυνσης μετάδοση φωνής, δεδομένων και τηλεοπτικής ροής. Λειτουργεί σε χαμηλότερη συχνότητα σε σχέση με την LMDS (στο εύρος ζώνης των 2- 10GHz) και επομένως έχει μεγαλύτερο εύρος και απαιτεί λιγότερο ισχυρό σήμα σε σχέση με την LMDS. Η MMDS είναι ένα πιο απλοποιημένο και φθηνότερο σύστημα για να κατασκευασθεί..



Κατά συνέπεια, η CPE είναι φθηνότερη με αποτέλεσμα να έχει μια ευρύτερη πιθανή προσπελάσιμη αγορά. Είναι επίσης λιγότερο ευαίσθητη στη βροχή - οι παρεμβολές που προκαλούνται από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες μπορεί να υποβαθμίσουν την ποιότητα του μικροκυματικού σήματος. Εντούτοις, το εύρος ζώνης που προσφέρεται από την LMDS τεχνολογία, την καθιστά ως την πιο βιώσιμη επιλογή.

Οι παλαιότερες εφαρμογές χρησιμοποιούσαν τις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης, αλλά η προσεχής τεχνολογία βασίζεται στην VOFDM (Vector Orthogonal Frequency Division Multiplexing) διαμόρφωση, όπου ο δέκτης συνδυάζει τα ανακλώμενα σήματα για να παραγάγει ένα ισχυρότερο σήμα. Αυτό επιτρέπει την non-line-of-sight (χωρίς οπτική επαφή) λειτουργία και, σύμφωνα με την Sprint, θα αυξηθεί η κάλυψη από 60 τοις εκατό σε 90 τοις εκατό των κτηρίων σε μια περιοχή κάλυψης. Θα απλοποιήσει επίσης την εγκατάσταση των κεραιών επειδή δεν θα πρέπει πλέον να ευθυγραμμιστούν με τόσο μεγάλη ακρίβεια. Η OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) επίσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα ταχύτητας, το οποίο επιτυγχάνεται επειδή το φέρον χρησιμοποιεί συχνότητες ορθογωνικές μεταξύ τους. Επειδή κάθε υπό-φέρον μεταφέρει μόνο ένα τμήμα του φορτίου των δεδομένων, μπορεί να χρησιμοποιήσει πιο μεγάλες περιόδους συμβόλων, το οποίο καθιστά το σήμα λιγότερο ευαίσθητο στην διασυμβολική παρεμβολή (λόγω αντανάκλασεων των σημάτων). Το πλεονέκτημα της OFDM, είναι ότι αποτελεί τη βάση άλλων ασύρματων τεχνολογιών υψηλής απόδοσης, όπως το IEEE 802.11a, ένα νέο ασύρματο LAN πρότυπο που παρέχει ταχύτητες της τάξεως των 54 Mbps.

Λόγω των ασύρματων συνδέσεων αναδύονται ζητήματα όσον αφορά την ασφάλεια. Οι προμηθευτές δεν χρησιμοποιούν τεχνικές κρυπτογράφησης. Αν και μόνο ένας ιδιαίτερα εξειδικευμένος χάκερ θα μπορούσε να υποκλέψει την επικοινωνία, οι πελάτες που αναπτύσσουν ευαίσθητες εφαρμογές θα πρέπει να εξετάσουν τις από άκρη σε άκρη μεθόδους ασφάλειας, όπως είναι τα VPN. Άρα θα έπρεπε να πράξουν όπως ακριβώς θα έκαναν για άλλους τύπους συνδέσεων με το Διαδίκτυο, οι περισσότεροι εκ των οποίων βέβαια δεν είναι ούτε αυτοί ασφαλείς.

Τεχνολογία

Οι LMDS και MMDS τεχνολογίες μοιράζονται διάφορα κοινά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα αν και διαφέρουν από τον έναν κατασκευαστή στον άλλον, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητές τους. Ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι ένας πομποδέκτης σταθμού βάσης (συσκευή μετάδοσης και λήψης σημάτων), ένας πομποδέκτης για τον πελάτη και μία CPE μονάδα διεπαφής δικτύου (NIU) ή κάρτα.

Για την προς τα κάτω (downstream) κυκλοφορία προς τον πελάτη, ο σταθμός βάσης μετατρέπει -το ψηφιακό bitstream (αλληλουχία bit) που περιέχει τη φωνή, τα δεδομένα και τις πληροφορίες- σε μικροκύματα που μεταδίδονται μέσω μίας μικρής κεραίας στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Τα μικροκύματα αναδιαμορφώνονται έπειτα πάλι σε ένα ψηφιακό bitstream από το NIU και παραδίδονται στον τελικό χρήστη. Η διαδικασία αντιστρέφεται για την προς τα πάνω κυκλοφορία (upstream). Όταν ο σταθμός βάσης λαμβάνει το σήμα μικροκυμάτων και το έχει μετατρέψει σε ένα ψηφιακό bitstream, αυτό δρομολογείται μέσω, ή "επιστρέφεται", στο ευρύτερο δίκτυο, μέσω του οποίου τα δεδομένα ή η κλήση παραδίδονται στον προορισμό τους.

Αντίθετα από τα κυψελοειδή συστήματα χαμηλότερης συχνότητας, τα LMDS και MMDS απαιτούν την ύπαρξη οπτικής επαφής ανάμεσα στον σταθμό βάσης και στους πομποδέκτες που βρίσκονται στις εγκαταστάσεις των πελατών. Αυτό είναι μία απαραίτητη προϋπόθεση για οποιοδήποτε σύστημα λειτουργεί πάνω από τα 2-3,5 GHz. Ο σταθμός βάσης συνδέεται με τον μεταγωγέα του WAN (WIDE AREA NETWORK) ή με το διαδικτύο (POP) μέσω, είτε μιας καλωδίωσης μεγάλης χωρητικότητας (συνήθως οπτική ίνα), είτε ασύρματα. Ομοίως, στις εγκαταστάσεις του πελάτη, το σήμα μπορεί να παραδοθεί στα τερματικά τελικών χρηστών με οποιοδήποτε τρόπο περιγράψαμε πριν (οπτική ίνα ή ασύρματα).

Πλεονεκτήματα

Τα ασύρματα συστήματα επεκτείνονται για να εκπληρώσουν διάφορες λειτουργίες. Σε ένα επίπεδο δικτύου είναι κατάλληλοι και για την πρόσβαση και για την backbone υποδομή. Είναι γενικά αποδεκτό, εντούτοις, ότι στην αγορά πρόσβασης είναι που υπερισχύει σε σχέση με τις εναλλακτικές λύσεις καλωδιώσεων. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των LMDS/MMDS είναι:

- Η ταχύτητα της επέκτασης του δικτύου είναι πολύ γρηγορότερη με τα ασύρματα συστήματα που επιτρέπουν τη ραγδαία και πρόωρη είσοδο στην αγορά.
- Οι δαπάνες για την είσοδο, την επέκταση και την αναβάθμιση είναι πολύ χαμηλότερες απ' ό,τι για τις εναλλακτικές λύσεις των καλωδιώσεων, για τις οποίες οι μηχανολογικές δαπάνες (καλωδίωση και σκάψιμο) είναι σημαντικά υψηλότερες
- Οι δαπάνες συντήρησης, διαχείρισης και λειτουργίας είναι χαμηλότερες. Τα ασύρματα συστήματα μπορούν να εφαρμοσθούν πολύ γρηγορότερα, επιτρέποντας μια γρηγορότερη απόσβεση στην επένδυση
- Οι scalable αρχιτεκτονικές παρέχουν εκτεταμένη κάλυψη και υπηρεσίες ανάλογα με το επίπεδο ζήτησης
- Μόνο μια δικτυακή αρχιτεκτονική απαιτείται για να παρασχεθεί μια πλήρη ακολουθία αλληλεπιδραστικών υπηρεσιών φωνής, βίντεο και δεδομένων που μπορούν να επεκταθούν όποτε και όπως επιθυμεί ο πελάτης

Bluetooth

Το Bluetooth είναι μια προδιαγραφή τεχνολογίας για τις χαμηλού κόστους, και περιορισμένου φάσματος ασύρματες συνδέσεις, μεταξύ φορητών PCs, κινητών τηλεφώνων, και άλλες φορητές συσκευές, και για τη σύνδεση στο Διαδίκτυο. Το Bluetooth Special Interest Group (SIG) καθοδηγεί την ανάπτυξη της τεχνολογίας, την φέρνει στην αγορά και περιλαμβάνει διαφημιστικές επιχειρήσεις όπως η 3Com, Ericsson, IBM, Intel, Lucent, Motorola, Nokia, και πάνω από 1.800

Adopter/Associate 128 επιχειρήσεις μέλη. Το Bluetooth παρέχει κάλυψη μέχρι και δέκα μέτρων στη μη αδειοδοτημένη ζώνη των 2.4GHz. Επειδή τα 802.11 WLANs λειτουργούν επίσης στην ίδια ζώνη, υπάρχουν ζητήματα παρεμβολής που πρέπει να εξετασθούν. Η τεχνολογία και τα προϊόντα Bluetooth άρχισαν να διατίθενται το 2001, αλλά η διαλειτουργικότητα φαίνεται να είναι ένα μεγάλο πρόβλημα

Σημαντικά ζητήματα για τις ασύρματες τεχνολογίες

Όπως με οποιαδήποτε σχετικά νέα τεχνολογία, υπάρχουν πολλά ζητήματα που έχουν επιπτώσεις στην εφαρμογή και τη χρησιμοποίηση των ασύρματων δικτύων. Υπάρχουν κοινά και συγκεκριμένα ζητήματα ανάλογα με τον τύπο του ασύρματου δικτύου. Μερικοί από τους κοινούς παράγοντες περιλαμβάνουν την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και τα φυσικά εμπόδια που περιορίζουν την κάλυψη των ασύρματων δικτύων, ενώ άλλοι είναι πιο συγκεκριμένοι, όπως τα πρότυπα, η ασφάλεια δεδομένων, η ρυθμιαπόδοση, η ευκολία στη χρήση, κ.λπ.

6.2 Ευρυζωνικές Τεχνολογίες

Όλες οι παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεόρασης και ραδιοφώνου με τις οποίες έχουμε μεγαλώσει, χρησιμοποιούν την αναλογική μετάδοση για τη παροχή σήματος που μπορεί να μετατραπεί σε εικόνα ή ήχο. Έχουμε καλύψει ήδη τα προβλήματα που προκύπτουν με την αναλογική μετάδοση, έτσι είναι θέμα χρόνου τα ακουστικά και τηλεοπτικά σήματα ραδιοφωνικής μετάδοσης να μεταδίδονται ψηφιακά (όπως και είναι στις μέρες μας).

Πριν από χρόνια έγιναν προσπάθειες να μεταδοθεί ο ψηφιακός ήχος μέσω του δορυφόρου, παρέχοντας ήχο ποιότητας όπως αυτό του CD, στο σπίτι ή στο αυτοκίνητό μας. Η HDTV (high definition television) παρέχει βίντεο κινηματογραφικής ποιότητας και ήχο ποιότητας όπως του Cd στο καθιστικό μας.

Θα χρειαστεί να περάσουν κάποια χρόνια μέχρι αυτές οι νέες τεχνολογίες ραδιοφωνικής μετάδοσης να ωριμάσουν αρκετά ώστε να αντικαταστήσουν την παραδοσιακή αναλογική τηλεόραση και το ραδιόφωνο. Οι πρόσφατες προσπάθειες από τη Federal Communications Commission (FCC) για να κάνουν τη HDTV ένα προτυποποιημένο σύστημα μέχρι το έτος 2008, καλύπτονται από πολύ σκεπτικισμό.

6.2.1 Ψηφιακή ραδιομετάδοση

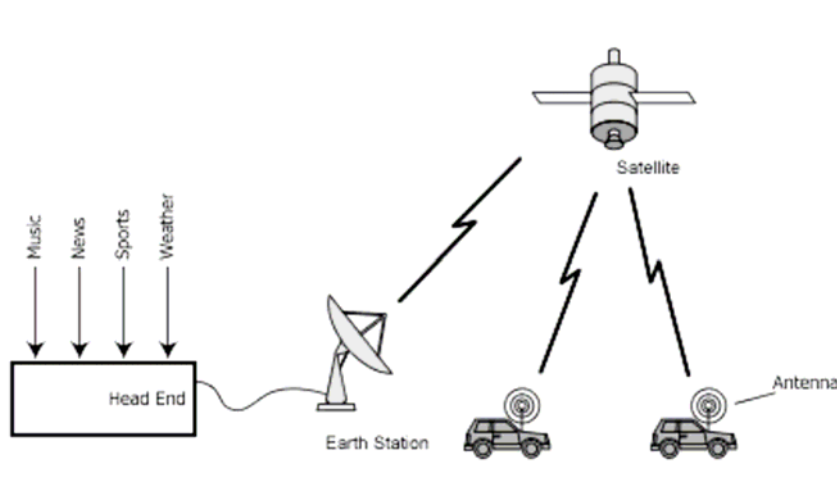
Το δορυφορικό ραδιόφωνο είχε συζητηθεί από το 1992 όταν η Federal Communications Commission (FCC) διέθεσε την συχνότητα των 2,3 GHz για την Digital Audio Radio Service (DARS), επίσης γνωστή ως δορυφορικό ραδιόφωνο. Πολύ σύντομα, τρεις επιχειρήσεις θα αρχίσουν τη μετάδοση μουσικής από το διάστημα μέσω των δορυφόρων. Οι τρεις επιχειρήσεις είναι:

- Sirius Satellite Radio— Ψηφιακή ραδιοφωνική μετάδοση στις ΗΠΑ.
- XM Satellite Radio— Ψηφιακή ραδιοφωνική μετάδοση στις ΗΠΑ.
- Worldspace— Ψηφιακή ραδιοφωνική μετάδοση στην Νότια Αμερική, στην Ασία και την Αφρική.

Οι αρχές για το ψηφιακό δορυφορικό ραδιόφωνο περιλαμβάνουν έναν αυτοκινούμενο δέκτη καθώς επίσης και έναν επιτραπέζιο δέκτη. Ένας uplink σταθμός εδάφους θα μεταδώσει ψηφιακή μουσική ποιότητας Cd, συζήτηση, και τις ειδήσεις στον δορυφόρο σε ύψος 22.300 μιλίων επάνω από τη γη για τη λήψη της σε ολόκληρες τις Ηνωμένες Πολιτείες. Λόγω του μεγάλου ίχνους της δορυφορικής λήψης, θα είστε σε θέση να οδηγείτε σε ολόκληρη τη χώρα χωρίς να πρέπει να αλλάξετε τον ραδιοφωνικό σας σταθμό. Οι τρεις επιχειρήσεις που αναπτύσσουν αυτήν την τεχνολογία υπόσχονται πάνω από 100 κανάλια (η κάθε μια) συνεχούς στερεοφωνικού ήχου (Cd-ποιότητας) με λίγες ή καθόλου διαφημίσεις.

Επίσης διαμορφώνονται συμφωνίες με τους παραδοσιακούς παρόχους για την παροχή υπηρεσιών. Το BBC, CNN, και το Weather Channel (Κανάλι Καιρού) είναι μερικά παραδείγματα των παραδοσιακών ραδιοφωνικών υπηρεσιών που μεταδίδουν ραδιοφωνικά μέσω του δορυφόρου

Δορυφορική ραδιομετάδοση.



Για περίπου \$10 μηνιαίως, οι συνδρομητές θα αποκωδικοποιούν ένα κρυπτογραφημένο σήμα που θα τους επιτρέπει να λαμβάνουν ψηφιακό δορυφορικό ραδιόφωνο. Πολλοί κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν συνάψει συμφωνίες με τους προμηθευτές δορυφορικού ραδιοφώνου για τα μελλοντικά

μοντέλα τους. Οι κατασκευαστές συμπεριλαμβανομένων των Sony, Sharp, και Pioneer έχουν αρχίσει επίσης την ανάπτυξη των δεκτών και για το αυτοκίνητο και για την χρήση στο σπίτι. Το ψηφιακό δορυφορικό ραδιόφωνο έχει λαμπρό μέλλον μπροστά του και τα πρώτα δείγματα γραφής έχουν ήδη φανεί..

6.2.1.1 Ιστορική αναδρομή της High Definition Television (HDTV)

- 1987 The FCC indicates that HDTV standards should be compatible with SDTV service.
 - 1988 The FCC receives 23 different proposals for potential HDTV service.
 - 1990 The FCC requests simultaneous broadcasting of HDTV and SDTV services.
 - 1993 The FCC narrows down the ensuing technology to four contenders and creates a "grand alliance" among all four of them.
 - 1995 The HDTV standard is tested and adopted.
-
- 1987 η FCC δείχνει ότι τα πρότυπα HDTV πρέπει να είναι συμβατά με την υπηρεσία SDTV.
 - 1988 η FCC λαμβάνει 23 διαφορετικές προτάσεις για την πιθανή HDTV υπηρεσία.
 - 1990 η FCC ζητά την ταυτόχρονη ραδιοφωνική αναμετάδοση των υπηρεσιών HDTV και SDTV.
 - 1993 η FCC δημιουργεί μια 'μεγάλη συμμαχία' μεταξύ των τεσσάρων ανταγωνιστών.
 - 1995 το πρότυπα HDTV δοκιμάζονται και υιοθετούνται.

6.2.2 High Definition Television

Η HDTV έχει περίπου διπλάσια οριζόντια και κάθετη ανάλυση από τα τρέχοντα αναλογικά συστήματα τηλεοπτικής ραδιοφωνικής μετάδοσης 525-γραμμής. Το πρόβλημα με τη HDTV δεν είναι η ίδια η τεχνολογία αλλά η συμβατότητά της με τα υπάρχοντα πρότυπα. Το 1957, η συμβατότητα ήταν ένα σημαντικό ζήτημα όταν εισήχθη αρχικά η έγχρωμη τηλεόραση. Το τυποποιημένο τηλεοπτικό (SDTV) σήμα ευκρίνειας έπρεπε να είναι συμβατό με τους και δέκτες λευκού και μαύρου χρώματος.

Η συμβατότητα μεταξύ SDTV και της HDTV είναι πιο σύνθετη. Καταρχήν, υπάρχει το εύρος ζώνης: Η HDTV απαιτεί 20 MHz, ενώ η SDTV απαιτεί 6 MHz. Δεύτερον: η SDTV έχει έναν λόγο διάστασης 4/3 (σχεδόν τετραγωνικό), ενώ η HDTV έχει ένα 16/9 ευρύ (letterbox) σχήμα. Τρίτον: η SDTV χρησιμοποιεί τη μετάδοση αναλογικών σημάτων, και η HDTV χρησιμοποιεί τη μετάδοση

ψηφιακών σημάτων. Τέταρτον: οι γραμμές HDTV ανιχνεύονται διαδοχικά και δεν συμπλέκονται όπως στην SDTV.

Λόγω αυτών των ζητημάτων, η HDTV είναι ταυτόχρονη ραδιοφωνική μετάδοση μαζί με ένα σήμα SDTV (σε διαφορετικές συχνότητες). Ο σχεδιαστικός στόχος της HDTV είναι να παρασχεθεί μεγαλύτερη συμβατότητα με τους υπολογιστές παρά με την υπάρχουσα SDTV τυποποίηση. Η HDTV προσφέρει 60 πλαίσια το δευτερόλεπτο, το οποίο είναι δύο φορές η ανάλυση της SDTV. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα συνεισφέρει στην ομαλή κίνηση και στην ευκρίνεια των σημάτων με ποιότητα όπως στις ταινίες. Επίσης δεν πρέπει να παραλείψουμε την ψηφιακή ραδιοφωνική μετάδοση των 5,1 καναλιών AC3 που συμπεριλαμβάνεται με το τηλεοπτικό σήμα.

Η HDTV είναι διαθέσιμη μέσω του ψηφιακού δορυφόρου ραδιοφωνικής μετάδοσης (DBS) και από τους προμηθευτές καλωδιακής τηλεόρασης. Πρέπει να ελέγξετε είτε με τον δορυφορικό προμηθευτή σας είτε με τον προμηθευτή καλωδίων για να καθορίσετε τη συμβατότητα HDTV.

Θυμάστε τις προηγούμενες συζητήσεις μας σχετικά με την αναλογική και ψηφιακή μετάδοση; Η μετάδοση αναλογικών σημάτων υπόκειται στο θόρυβο και τη διαστρέβλωση ενώ η μετάδοση ψηφιακών σημάτων γίνεται σχετικά χωρίς θόρυβο και χωρίς διαστρέβλωση. Παραδείγματος χάριν, μια ραδιοφωνική μετάδοση HDTV που προέρχεται από το Μανχάτταν θα φανεί με τόση ευκρίνεια στην πόλη του Τζέρσεϋ, του Νιου Τζέρσεϋ (ανατολικό Νιου Τζέρσεϋ) όσο και στο Phillipsburg, του Νιου Τζέρσεϋ (δυτικό Νιου Τζέρσεϋ). Μια ραδιοφωνική μετάδοση SDTV δεν μπορεί να ληφθεί καθαρά (ίσως και καθόλου) στο Phillipsburg, του Νιου Τζέρσεϋ. Τα ψηφιακά σήματα είναι είτε on είτε off, επομένως μη καθοδηγούμενος θόρυβος μετάδοσης δεν έχει επιπτώσεις στο σήμα HDTV. Ένα εξαιρετικά αδύνατο ψηφιακό σήμα HDTV δεν θα λειτουργήσει καθόλου.

Τα αρχικά σχέδια, που είχαν εκδοθεί από τη FCC, απαιτούσαν το κλείσιμο της SDTV μέχρι το έτος 2008. Το αν αυτό θα συμβεί είναι βασισμένο κατά ένα μεγάλο μέρος στο πόσο γρήγορα η HDTV θα υιοθετηθεί από εμάς. Οι ραδιοφωνικές μεταδόσεις HDTV είναι διαθέσιμες από τις επιχειρήσεις καλωδίων και τις δορυφορικές επιχειρήσεις.

6.3 Ασύρματες Ευρυζωνικές Τεχνολογίες

6.3.1 Wi-Fi

Το Wi-Fi προέρχεται από τα αρχικά των «Wireless Fidelity» (Ψηφιακή Πιστότητα) και έχει επικρατήσει σαν όρος για το υψηλής συχνότητας ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN). Βασικά

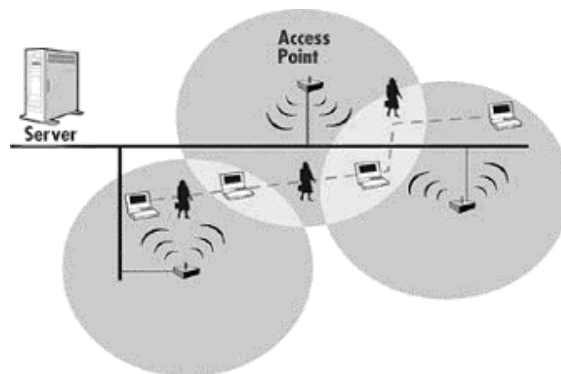
αποτελεί ένα ασύρματο τρόπο διασύνδεσης, ενώ δίνει την δυνατότητα σύνδεσης και με το Internet.

Οι ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν ή να επεκτείνουν ένα κοινό ενσύρματο δίκτυο (Ethernet) και επιτρέπουν στον κινητό χρήστη την ασύρματη μετάδοση και λήψη δεδομένων.

Τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLANs) ακολουθούν το πρότυπο IEEE 802.11, το πρώτο πρότυπο για ασύρματη δικτύωση το οποίο αναπτύχθηκε. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα τα οποία είναι συμβατά με το πρότυπο IEEE 802.11 ονομάζονται και δίκτυα Wi-Fi.

Τα ασύρματα δίκτυα 802.11 αποτελούνται από τις κάτωθι τέσσερις βασικές μονάδες:

- Σημείο πρόσβασης (Access Point - AP): Το AP είναι η μονάδα που παίζει το ρόλο γέφυρας μεταξύ του ενσύρματου και του ασύρματου δικτύου, μετατρέποντας κατάλληλα τα πλαίσια που ανταλλάσσονται μεταξύ αυτών. Επιτελεί και πολλές άλλες λειτουργίες στο ασύρματο δίκτυο που θα αναφερθούν στη συνέχεια.
- Σύστημα διανομής (Distribution System): Το σύστημα διανομής ενώνει τα διάφορα AP του ίδιου δικτύου, επιτρέποντάς τους να ανταλλάσσουν πλαίσια. Το 802.11 δεν προσδιορίζει τον τρόπο που θα γίνεται αυτό.
- Ασύρματο μέσο μετάδοσης (Wireless Medium): Έχουν οριστεί διάφορα φυσικά στρώματα που χρησιμοποιούν είτε ραδιοσυχνότητες είτε υπέρυθρες ακτίνες για τη μετάδοση των πλαισίων μεταξύ των σταθμών του ασύρματου δικτύου.
- Σταθμοί (Stations): Οι σταθμοί που ανταλλάσσουν πληροφορία μέσω του ασυρμάτου δικτύου συνήθως είναι φορητές συσκευές (για παράδειγμα laptops ή PDAs) χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο.



Η βασική δομική μονάδα κάθε 802.11 δικτύου αποκαλείται Basic Service Set (BSS) και αποτελείται από μία ομάδα σταθμών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα όρια του BSS καθορίζονται από την περιοχή ραδιοκάλυψης, που ονομάζεται Basic Service Area (BSA). Ένας σταθμός σε ένα BSS μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο σταθμό στο ίδιο BSS.

Όσον αφορά στην αρχιτεκτονική - τοπολογία τους τα δίκτυα αυτά εμφανίζονται με δύο μορφές. Τη δομημένη (Infrastructure) και την τυχαία (Ad-hoc).

Τα πιο κοινά WLANs λειτουργούν στη μη αδειοδοτημένη περιοχή συχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical) των 2,4 GHz και στην UNII (Unlicensed National Information Infrastructure) μπάντα των 5 GHz.

- Τα IEEE 802.11b WLANs λειτουργούν στη ζώνη 2,4 - 2.4835 GHz.
- Το πρότυπο IEEE 802.11a χρησιμοποιεί την περιοχή των 5 GHz UNII. Αυτή η περιοχή έχει εύρος 300 MHz και είναι χωρισμένη σε δύο υποπεριοχές. Η χαμηλότερη υποπεριοχή επεκτείνεται από 5,15 MHz ως 5,35 MHz. Η ανώτερη υποπεριοχή είναι από 5.725 MHz ως 5.825 MHz.

Στο φυσικό επίπεδο προδιαγράφονται δύο τεχνικές διαμόρφωσης (Απλωμένου Φάσματος):

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Και στις δύο τεχνικές υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης 1 και 11Mbps στην ζώνη συχνοτήτων 2.4 - 2.4835GHz. Στην ζώνη συχνοτήτων 5GHz η τεχνική η οποία χρησιμοποιείται είναι η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). Οι ρυθμοί μετάδοσης μπορούν να αγγίξουν τα 54Mbps.

Με σκοπό τη βελτίωση και την εξέλιξη του προτύπου δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια των χρόνων, εξελίξεις του προτύπου που διαφορετικά ονομάζονται και υποπρότυπα. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι:

- IEEE 802.11a: Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 5 GHz και OFDM. Ταχύτητα μικρότερη από 54Mbps.
- IEEE 802.11b (Χρησιμοποιείται στην Ελλάδα): Χρησιμοποιεί τη ζώνη των 2.4 GHz και DSSS. Ταχύτητα μικρότερη από 11M bps
- IEEE 802.11e: Παρέχει εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS).
- IEEE 802.11f: Κινητικότητα των σταθμών μέσα σε ένα IP δίκτυο (Intra - network Handover).
- IEEE 802.11g: Επεκτείνει το 802.11b ώστε να προσεγγίζει ταχύτητες που αγγίζουν τα 54Mbps.
- IEEE 802.11i: Πρότυπο το οποίο μελετά θέματα ασφάλειας στα WLANs.
- IEEE 802.11h: Η ομάδα αυτή θα προσπαθήσει να εισάγει στο 802.11a την δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο συγκρούσεων.

Μία παρεμφερή τεχνολογία που ακούγεται όλο και περισσότερο τον τελευταίο καιρό είναι η Ultra - Wideband (UWB). Πρόκειται για μία τεχνολογία η οποία ενσωματώνει την ευχρηστία και την κινητικότητα των ασύρματων επικοινωνιών και των δικτύων υψηλών ταχυτήτων. Μέσω της τεχνολογίας UWB, οι διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές στο γραφείο ή στο σπίτι θα μπορούν να συνδέονται πολύ γρήγορα και εύκολα προσφέροντας πολύ μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει σχεδιαστεί για σύνδεση συσκευών σε μικρές αποστάσεις.

Ένα άλλο ενδιαφέρον σημείο στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων είναι η συμβατότητα των διαφόρων συσκευών. Έτσι λοιπόν, έχει δημιουργηθεί ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός με την ονομασία Wi-Fi Alliance του οποίου μέλημα είναι ο έλεγχος της συμβατότητας Wi-Fi προϊόντων διαφορετικών κατασκευαστών. Για τον λόγο αυτό έχει υιοθετηθεί και το logo που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, το οποίο γνωστοποιεί στον καταναλωτή ότι το προϊόν που σκοπεύει να αγοράσει είναι συμβατό με την Wi-Fi τεχνολογία και δεν θα συναντήσει προβλήματα σε περίπτωση που προσπαθήσει να συνδεθεί ασύρματα με συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών από την δική του.



Συνολικά, ανάμεσα στα πλεονέκτημα της W-LAN τεχνολογίας ξεχωρίζουμε την ευκολία υλοποίησης και το μικρό κόστος και για τον σταθμό βάσης καθώς και για τον χρήστη. Επίσης, είναι ελκυστικό καθώς προσφέρεται ένα σύνολο χαρακτηριστικών που εγγυώνται ασφάλεια πρόσβασης και μετάδοσης (ταυτοποίηση χρήστη, κρυπτογραφημένη μετάδοση) αλλά και δυνατότητες για υπηρεσίες περιαγωγής (roaming), όπου ένας συνδρομητής ενός τοπικού δικτύου μπορεί να συνδεθεί σε ένα άλλο W-LAN (π.χ. η περίπτωση των W-LAN που έχουν υλοποιηθεί σε αεροδρόμια). Όπως και στην περίπτωση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, απαιτούνται για την υπηρεσία roaming συμφωνίες μεταξύ των ιδιοκτητών τέτοιων δικτύων ή μέσω ειδικών εταιριών περιαγωγής (roaming brokers).

6.3.2 WiMAX

Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16 γνωστό και σαν WiMAX, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση (με σταθερούς ρυθμούς) ευρείας ζώνης. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα, έτσι και το 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις.

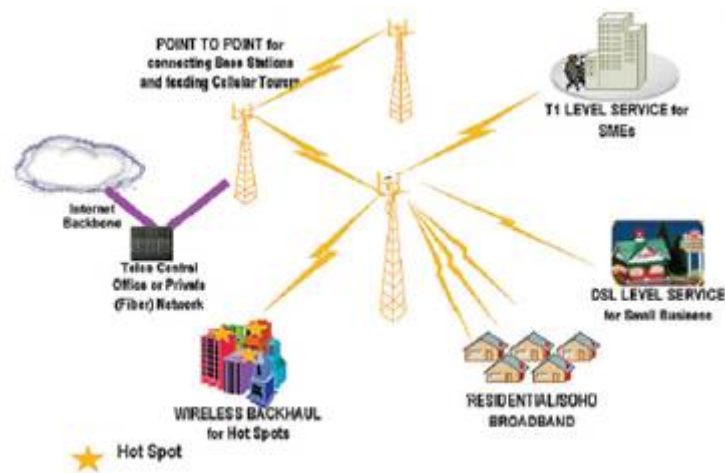
Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάνα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 72 Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet υπολογίζεται στα 50 Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50 Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής φυσικά με ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50 Mbps.

Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως Point-to-Multipoint (PTM) συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point to point συνδέσεις. Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυδιάδευσης ειδικότερα στις συχνότητες πάνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί.

Παραλλαγές του προτύπου, που στοχεύουν στους κινητούς χρήστες (802.16e) και στην παροχή QoS (802.16b) είναι ήδη σε εξέλιξη. Διάφοροι προμηθευτές chip, συμπεριλαμβανομένης και της Intel, εργάζονται στο 802.16a ενσωματωμένο πυρίτιο, και σε χαμηλού κόστους μονάδες συνδρομητών και αναμένεται στο τέλος του 2005 να είναι ευρέως διαθέσιμα σημεία πρόσβασης (Access Points - AP). Αρκετοί προμηθευτές που έχουν ασχοληθεί με εξοπλισμό για ευρείας ζώνης ασύρματη πρόσβαση, έχουν εκδηλώσει το ενδιαφέρον τους για το WiMAX και έτσι δραστηριοποιούνται στην κατασκευή προϊόντων συμβατών με το εν λόγω πρότυπο.

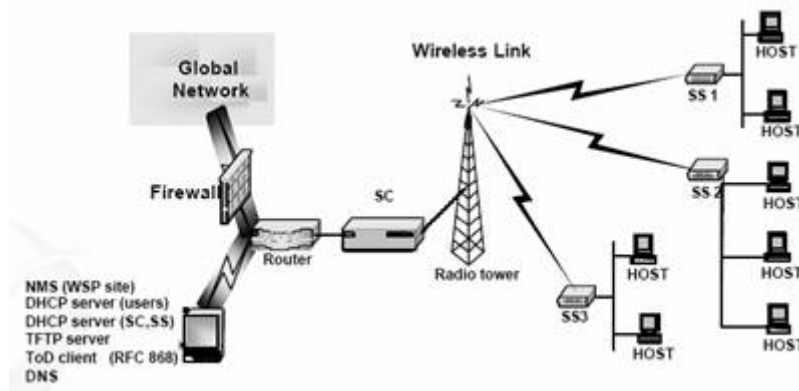
Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMAX βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα που απασχολούσαν του τεχνικούς δικτύων σήμερα. Τρεις είναι οι βασικότερες χρήσεις του:

- **Δίκτυο κορμού στα κυβελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας.** Η εισαγωγή του προτύπου αυτού αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μιας και αποτελεί μια οικονομικότερη πρόταση, αν συγκριθεί με την οπτική ίνα, για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.
- **Broadband on Demand.** Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11 σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.
- **Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο τα καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας.** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συμπλήρωμα δικτύων οπτικών ινών σε τμήματα του εδάφους στα οποία το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό.



Οι **ταχύτητες μετάδοσης** του προτύπου εξαρτώνται από την εκάστοτε ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Συνήθεις διαμορφώσεις είναι η 64 QAM η οποία μπορεί να εξασφαλίσει και τη μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης, η 16 QAM και η QPSK η οποία μπορεί να εξασφαλίσει μεγάλη κάλυψη του συστήματος.

Το πρότυπο IEEE 802.16 παρέχει υψηλού επιπέδου **ποιότητα υπηρεσίας**. Το επίπεδο MAC του προτύπου είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει στους χρήστες, όταν οι ίδιοι το επιθυμούν, εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης και ταυτόχρονα κίνηση best effort σε χρήστες που καλύπτονται από το ίδιο base station κάτι που το πρότυπο IEEE 802.11 δεν μπορούσε να εξασφαλίσει. Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι δύο χρήστες καλύπτονται από το ίδιο Base Station, είναι δυνατό ο ένας χρήστης να έχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και ο δεύτερος χρήστης να δέχεται και να στέλνει απλή IP κίνηση best effort κάτι που με το πρότυπο 802.11 δεν ήταν δυνατό. Δηλαδή χρήστες που βρισκόταν στην κάλυψη ενός Access Point είχαν την ίδια ποιότητα υπηρεσίας.



Την **ασφαλή μετάδοση** των δεδομένων στο WiMAX αναλαμβάνει ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης DES (Data Encryption Standard, Πρότυπο Κωδικοποίησης Δεδομένων) και συγκεκριμένα μια παραλλαγή του αλγορίθμου ο Triple DES. Το DES αναπτύχθηκε το 1970 από το Αμερικανικό Εθνικό Γραφείο Προτύπων. Η βασική ιδέα ήταν η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου κρυπτογράφησης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (και να βελτιωθεί) από διάφορες εταιρείες ή οργανισμούς. Το DES ανήκει στην οικογένεια των συμμετρικών αλγορίθμων και κάνει χρήση κλειδιών με μήκος 56 bit. Ο "κλασικός" αλγόριθμος DES είναι πλέον ξεπερασμένος, αφού με τη χρήση ενός σύγχρονου υπολογιστή μπορεί να παραβιαστεί σχετικά εύκολα. Στο μεταξύ, εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές επάνω στο DES, μπορούμε να αυξήσουμε σημαντικά την ασφάλειά του. Με τη μέθοδο Triple - DES, για παράδειγμα, το μήνυμα κωδικοποιείται τρεις φορές, με τρία διαφορετικά κλειδιά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην αρχική του έκδοση το πρότυπο IEEE 802.16 λειτουργούσε στην ζώνη συχνοτήτων 10-66 GHz. Στις παραπάνω συχνότητες η επικοινωνία μεταξύ δύο σταθμών επιτυγχάνεται μόνο όταν οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται σε συνθήκες οπτικής επαφής. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο υποπρότυπο **IEEE 802.11 c**. Η ανάγκη για επικοινωνία

μεταξύ σταθμών που δεν βρίσκονται σε οπτική επαφή ήταν το κίνητρο για τη δημιουργία του υποπροτύπου **IEEE 802.16 a**. Τον Ιανουάριο του 2003 το πρότυπο επεκτάθηκε ώστε να λειτουργεί και στις συχνότητες από 2-11 GHz όπου στις συχνότητες αυτές ήταν δυνατή η δημιουργία συνδέσεων χωρίς οπτική επαφή πομπού - δέκτη. Το υποπρότυπο το οποίο περιγράφει τη διαδικασία αυτή ονομάστηκε IEEE 802.16 a. Τα πρώτα προϊόντα WiMAX τα οποία σήμερα είναι διαθέσιμα στην αγορά ακολουθούν στην μεγαλύτερή τους πλειοψηφία το υποπρότυπο αυτό.

Καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών που διαδίδονται πάνω από ένα ασύρματο δίκτυο ολοένα και αυξάνει, η ποιότητα υπηρεσίας πάνω από τέτοια δίκτυα γίνεται ένας πολύ καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση video σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από το δίκτυο συνθήκες πολύ χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ποιότητα υπηρεσίας ορίστηκε το υποπρότυπο **IEEE 802.16 d**.

Η ένωση των υποπροτύπων IEEE 802.11 a, c, d όρισε το πρότυπο **IEEE 802.16-2004** το οποίο περιγράφει τη συνολική λειτουργικότητα των επιμέρους υποπροτύπων που προαναφέρθηκαν για συχνότητες λειτουργίας 2-66 GHz.

Το πρότυπο IEEE 802.26-2004 ορίζει την επικοινωνία χρηστών οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα κελί το οποίο καλύπτεται από ένα base station . Όταν κάποιος χρήστης κινηθεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός περιοχής κάλυψης του base station η σύνδεση χάνεται. Το υποπρότυπο **IEEE 802.16 e** εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών από ένα base station σε άλλο. Στο υποπρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός χρήστης μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120 Km / h . Ωστόσο η παραπάνω τιμή είναι ενδεικτική - πειραματική, καθώς μέχρι τη στιγμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο προϊόν στην αγορά συμβατό με το IEEE 802.16 e υποπρότυπο που να πιστοποιεί την προαναφερθείσα τιμή.

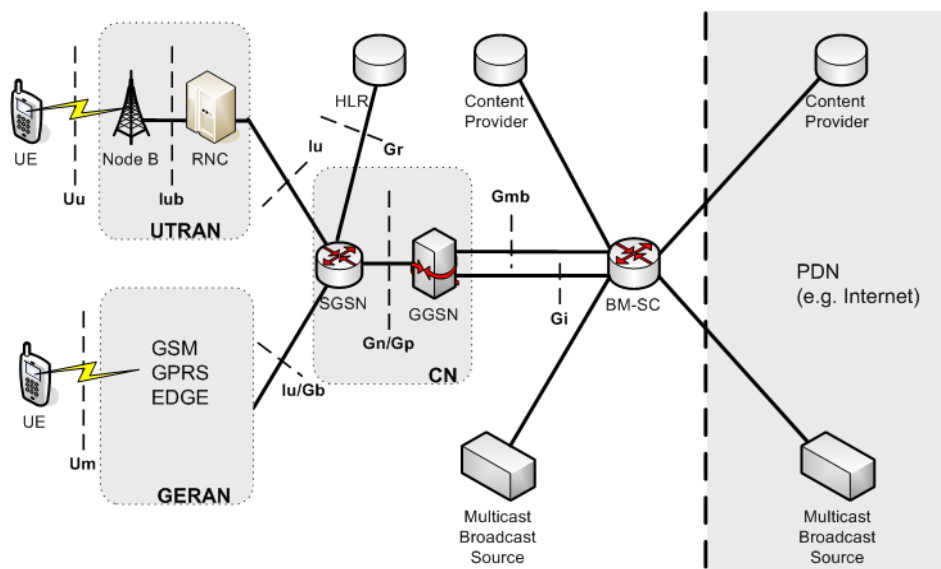
6.3.3 3G/UMTS

Ο όρος UMTS προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων "Universal Mobile Telecommunications System" (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών). Πρόκειται για την εξέλιξη σε σχέση με την χωρητικότητα, την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ύπαρξη νέων υπηρεσιών, των κινητών δικτύων δεύτερης γενιάς. Σήμερα, περισσότερα από εξήντα 3G/UMTS δίκτυα που χρησιμοποιούν την WCDMA τεχνολογία λειτουργούν σε 25 χώρες. Για την οργάνωση του όλου εγχειρήματος έχει θεσπιστεί ειδικός μη κερδοσκοπικός οργανισμός με την ονομασία Third Generation Partnership Project (3GPP) του οποίου μέλημα είναι η παρακολούθηση και η καθοδήγηση των εξελίξεων στην συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των UMTS δικτύων ξεχωρίζουμε τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων και την ταυτόχρονη υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων και φωνής. Πιο συγκεκριμένα, το UMTS δίκτυο στην αρχική του φάση, θεωρητικά προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 384 kbps σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται αυξημένη κινητικότητα του χρήστη. Αντίθετα, όταν ο χρήστης παραμένει ακίνητος οι ρυθμοί μετάδοσης αυξάνουν κατά πολύ φθάνοντας την τιμή των 2 Mbps.

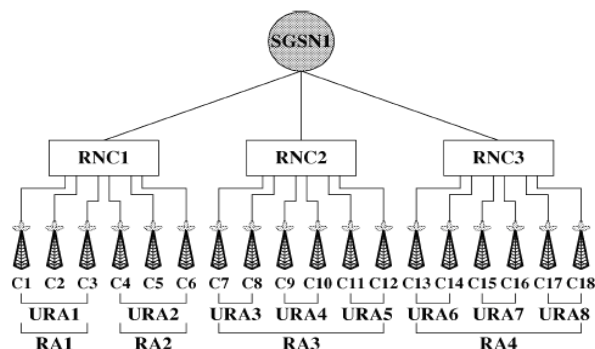
Εκτιμάται ότι στο μέλλον θα υπάρξει περαιτέρω αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Ήδη, ο 3GPP έχει θέσει σαν standard δύο νέες τεχνολογίες. Πρόκειται για το High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) και το High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες ουσιαστικά αποτελούν εξέλιξη του UMTS, αφού υπόσχονται ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων έως και 14,4 Mbps στο downlink και 5.8 Mbps στο uplink.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός UMTS δικτύου καθώς και διάφορα άλλα σχετικά θέματα όπως η διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από δύο βασικές οντότητες: το δίκτυο κορμού (CN - core network) και το δίκτυο επίγειας ασύρματης πρόσβασης (UTRAN - UMTS terrestrial radio-access network). Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των τηλεφωνημάτων καθώς και για τις συνδέσεις για μεταφορά δεδομένων με εξωτερικά δίκτυα. Αντίθετα, το UTRAN είναι υπεύθυνο για οτιδήποτε σχετίζεται με το ασύρματο μέρος του δικτύου. Το CN αποτελείται από δύο domain: α) circuit -switched (CS - μεταγωγή κυκλώματος), β) packet-switched (PS - μεταγωγή πακέτου). Το CS domain παρέχει πρόσβαση στο PSTN/ISDN, ενώ το PS domain παρέχει πρόσβαση στα IP δίκτυα. Στο εξής μας ενδιαφέρει το PS domain. Έτσι λοιπόν, το PS μέρος του UMTS δικτύου αποτελείται από δύο GPRS κόμβους υποστήριξης: τον gateway GPRS support node (GGSN) και τον serving GPRS support node (SGSN). Ο SGSN συνδέεται με τον GGSN μέσω της διεπαφής Gn και με το UTRAN μέσω της διεπαφής Iu. Το UTRAN αποτελείται από τον ελεγκτή ασύρματης πρόσβασης (RNC - radio network controller) και το Node B το οποίο αποτελεί την βάση που προσφέρει κάλυψη στο αντίστοιχο κελί. Το Node B συνδέεται με τον εξοπλισμό του χρήστη (user equipment - UE) μέσω της διεπαφής Uu (βασισμένο στην τεχνολογία W-CDMA) και με το RNC μέσω της διεπαφής Iu. Επιπλέον, υπάρχει και ένας άλλος κόμβος σχετιζόμενος με τις υπηρεσίες broadcast/multicast (BM-SC - broadcast/multicast service center), ο οποίος λειτουργεί σαν το σημείο εισόδου για την παραλαβή των δεδομένων για εσωτερικές πηγές. Τα παραπάνω παρουσιάζονται καλύτερα στο σχήμα που ακολουθεί:



Προτού ένας χρήστης είναι σε θέση να ανταλλάξει δεδομένα με ένα εξωτερικό PDN (Public Data Network), πρέπει να εγκαθιδρύσει μία εικονική σύνδεση με αυτό το PDN. Από την στιγμή που ο συγκεκριμένος κινητός χρήστης γίνει γνωστός στο δίκτυο, τα πακέτα μεταφέρονται μεταξύ αυτού και του δικτύου, βασισμένα στο packet data protocol (PDP), το οποίο αποτελεί το πρωτόκολλο του επιπέδου δικτύου του UMTS. Ένα στιγμιότυπο του PDP ονομάζεται PDP context και περιέχει όλες τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την σύνδεση με το εξωτερικό δίκτυο όπως τις διευθύνσεις αποστολέα και παραλήπτη καθώς και την ποιότητα της υπηρεσίας. Ένα PDP context εγκαθιδρύεται για όλες τις εφαρμογές που κατευθύνονται προς ή προέρχονται από μία IP διεύθυνση. Μία ενεργοποίηση ενός PDP context ουσιαστικά αποτελεί μία διαδικασία αίτησης - απάντησης μεταξύ του κινητού χρήστη (UE) και του GGSN. Μία επιτυχής PDP context ενεργοποίηση οδηγεί στην δημιουργία δύο GPRS tunneling protocol (GTP) συνόδων για τον εκάστοτε χρήστη. Η πρώτη GTP σύνοδος δημιουργείται μεταξύ του GGSN και του SGSN πάνω από την διεπαφή Gn, ενώ η δεύτερη δημιουργείται μεταξύ του SGSN και του RNC πάνω από την διεπαφή Iu. Τα IP πακέτα τα οποία προορίζονται για μία εφαρμογή, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα GTP contexts, προσαρτώνται σε αυτά και μέσω του PDP μεταφέρονται στο

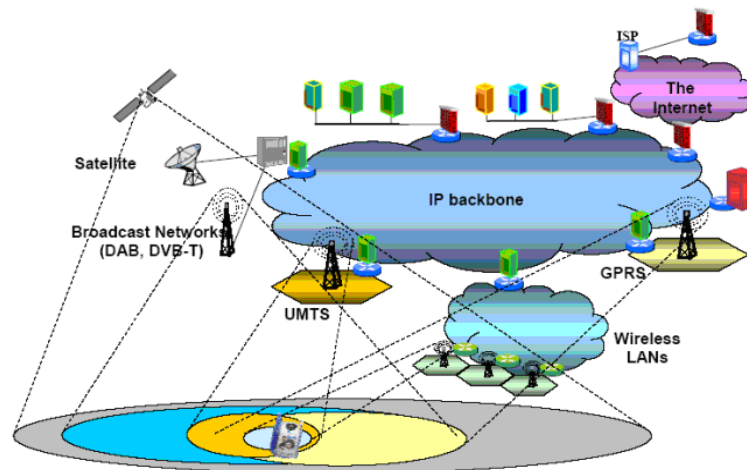
αντίστοιχο SGSN. Το SGSN ανακτά τα IP πακέτα, ζητά το κατάλληλο PDP context βασισμένο στο UE και στο PDP και προωθεί τα πακέτα στο κατάλληλο RNC. Παράλληλα, το RNC διατηρεί έναν φορέα ασύρματης πρόσβασης (RAB - radio access bearer). Αντίστοιχα με τα PDP context, ένα RAB context επιτρέπει στο RNC να ανακτήσει την ταυτότητα του αποστολέα που έχει συσχετιστεί με ένα GTP. Αφού πλέον, το RNC έχει ανακτήσει το πακέτο, το προωθεί στο κατάλληλο Node B. Τέλος, χρησιμοποιείται ένας tunnel endpoint identifier (TEID) στις διεπαφές Gn και Iu έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωρισθεί το τέλος του tunnel στον κόμβο που δέχεται τα πακέτα.



Στην συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διαχείριση της κινητικότητας των UE (λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο αντίστοιχο σχήμα). Έτσι λοιπόν, στο PS domain του UMTS, τα κελιά ομαδοποιούνται σε περιοχές δρομολόγησης (RAs - routing areas), ενώ τα κελιά σε μία περιοχή δρομολόγησης χωρίζονται περαιτέρω σε UTRAN registration areas (URAs). Επιπλέον, η διαχείριση της κινητικότητας (MM - mobility management) των κινητών χρηστών χαρακτηρίζεται από δύο μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων: την μηχανή διαχείρισης της κινητικότητας (MM) και την radio resource control (RRC). Η μηχανή packet MM (PMM) του PS domain του UMTS εκτελείται μεταξύ του SGSN και του UE και είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο στο επίπεδο του CN, ενώ η μηχανή RRC εκτελείται μεταξύ του UTRAN και του UE και είναι υπεύθυνη για τον σχετικό έλεγχο στο επίπεδο του UTRAN. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, αφότου ένα UE συνδεθεί στο PS domain, η μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων PMM βρίσκεται σε μία από τις εξής δύο καταστάσεις: PMM idle ή PMM connected. Αντίστοιχα η μηχανή RRC μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις εξής τρεις καταστάσεις: RRC idle, RRC cell - connected και RRC URA connected. Σημειώνεται ότι όταν δεν υπάρχει ροή δεδομένων μεταξύ του UE και του CN, το UE βρίσκεται στις καταστάσεις PMM idle και RRC idle αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή το UTRAN δεν έχει καμία πληροφορία για το UE και το UE παρακολουθείται μόνο από το αντίστοιχο SGSN στο επίπεδο RA. Όταν ύστερα ξεκινήσει μία σύνδεση μεταξύ του UE και του SGSN, το UE μεταβαίνει στην κατάσταση PMM connected. Από την στιγμή που η σύνδεση στο PS λάβει χώρα, αυτόματα ξεκινά και μία RRC σύνδεση μεταξύ του UE και του αντίστοιχου RNC που το εξυπηρετεί. Σε αυτή την περίπτωση η RRC μηχανή για το συγκεκριμένο UE μεταβαίνει στην κατάσταση RRC cell - connected. Όταν κάτι τέτοιο συμβεί, το SGSN παρακολουθεί το UE με ακρίβεια μέσω του αντίστοιχου RNC που εξυπηρετεί το UE. Το συγκεκριμένο RNC είναι υπεύθυνο να παρακολουθεί το κελί όπου το UE βρίσκεται κάθε στιγμή. Σημειώνεται ότι τα πακέτα μπορούν να ληφθούν από το UE μόνο όταν βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση. Στην PMM connected/RRC cell - connected κατάσταση, αν το UE δεν έχει μεταδώσει/λάβει πακέτα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, η RRC μηχανή μεταβαίνει στην κατάσταση RRC URA connected. Σε αυτή την περίπτωση, η RRC σύνδεση διατηρείται ακόμη, ενώ το UE παρακολουθείται από το RNC που το εξυπηρετεί. Η συγκεκριμένη μετάβαση δεν επηρεάζει καθόλου την κατάσταση της PMM μηχανής για το συγκεκριμένο UE. Στην PMM connected / RRC URA connected κατάσταση, αν το UE μεταδώσει/λάβει ένα πακέτο, η RRC μηχανή μεταβαίνει πάλι στην κατάσταση RRC cell - connected. Αντίθετα, αν οι πόροι για τις συνδέσεις στο PS και RRC επίπεδο αποδεδμευτούν (για παράδειγμα όταν μία σύνοδος επικοινωνίας ολοκληρωθεί) ή αν κανένα πακέτο δεν έχει μεταδοθεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, η RRC μηχανή αρχικά μεταβαίνει στην RRC cell -

connected κατάσταση και μετά στην RRC idle κατάσταση. Σε αυτή την περίπτωση, η PMM μηχανή αντίστοιχα μεταβαίνει στην PMM idle κατάσταση. Τέλος, όταν ένα UE δεν μπορεί να εντοπιστεί από το δίκτυο, η κατάστασή του χαρακτηρίζεται σαν PMM detached.

Η τεχνολογία εξελίσσεται διαρκώς και παρά το γεγονός ότι η τρίτη γενιά δεν είναι ακόμη σε πλήρη λειτουργία, η ακαδημαϊκή εξερεύνηση της 4G κινητής επικοινωνίας έχει ήδη ξεκινήσει. Καταρχήν η τρίτη γενιά ασφαλώς ήταν το βασικότερο βήμα για την επίτευξη των προσωπικών τηλεπικοινωνιών, αλλά ωστόσο δεν κατάφερε να τις κάνει πραγματικότητα.



Η τέταρτη γενιά θα προσεγγίσει περισσότερο τις προσωπικές επικοινωνίες παρέχοντας επικοινωνία οποιαδήποτε μορφής, σε κάθε χώρο και χρόνο, με οποιονδήποτε. Θα απαιτήσει επίσης καλή απόδοση επικοινωνίας, που θα αφορά κυρίως media παρά φωνή. Στις εφαρμογές τα τερματικά της τέταρτης γενιάς δε θα παρέχουν μόνο ομιλία ή εικόνα αλλά επιπλέον θα προειδοποιεί και θα ενημερώνει το χρήστη. Τα τερματικά μπορεί ακόμα να γίνουν μέρος του ανθρώπινου σώματος, ενημερώνοντας το χρήστη για την πίεσή του, τη θερμοκρασία του κ.α. Όπως υπολογίζεται η γενιά αυτή θα κάνει την εμφάνισή της στα επόμενα 5 χρόνια.

6.4 Δορυφορικές Επικοινωνίες

Η δορυφορική μετάδοση δεδομένων και γενικότερα πληροφοριών αποτελεί μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ραδιομετάδοσης. Η ιδέα της χρήσης ενός τεχνητού γήινου δορυφόρου στο διάστημα σαν επικοινωνιακό κόμβο μεταξύ δύο επίγειων απομακρυσμένων σταθμών ανήκει στον συγγραφέα βιβλίων επιστημονικής φαντασίας Arthur C. Clarke. Στο προφητικό του άρθρο "Extra -Terrestrial Relays" (*Wireless World* 1945), ο συγγραφέας προτείνει την ειρηνική χρήση των όπλων V2, που χρησιμοποιήθηκαν στο Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, σαν μέσα για την εγκατάσταση ραδιοσταθμών αναμετάδοσης στο διάστημα. Οι σταθμοί αυτοί θα τοποθετούνταν σε τροχιά σε ύψος 35.860 km από την επιφάνεια της γης και έτσι θα κινούνταν σύγχρονα με αυτήν. Με αυτό τον τρόπο οι επίγειοι σταθμοί θα έβλεπαν μόνιμα το διαστημικό δορυφορικό σταθμό στο ίδιο σημείο. Σαν πηγή ενέργειας θα χρησιμοποιείτο ο ήλιος ενώ τρεις δορυφόροι σε αυτή την τροχιά κάλυπταν ένα ορίζοντα 120°, και επομένως όλη τη γη.

Σήμερα ξέρουμε ότι η ιδέα του A. Clarke έχει γίνει πραγματικότητα. Οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι καλύπτουν με άνεση τις απαιτήσεις εκπομπής σημάτων ευρείας ζώνης συχνοτήτων.

6.4.1 Η εξέλιξη των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας

Ο πρώτος δορυφόρος που τέθηκε σε τροχιά ήταν ο Sputnik 1 της τότε ΕΣΣΔ. Ουσιαστικά ήταν μια σφαίρα διαμέτρου 58 εκατοστών που από τις 4 Οκτωβρίου του 1954 και για 21 μέρες εξέπεμπε δεδομένα τηλεμετρίας για το διάστημα στα 20 και 40 MHz. Ακολούθησαν οι ΗΠΑ με τον Explorer I (31 Ιανουαρίου 1958) που τέθηκε σε ελλειπτική τροχιά 360/2500 km. Τα δεδομένα τηλεμετρίας που εξέπεμψε για πέντε μήνες οδήγησαν στην ανακάλυψη των ζωνών Van Allen. Ακολούθησε η εκτόξευση του Score και του Telstar I. Ο τελευταίος μάλιστα χρησιμοποιήθηκε πειραματικά για τη μετάδοση τηλεφωνίας και τηλεοπτικού σήματος.

Τα πρώτα δορυφορικά συστήματα δεν ήταν και τόσο βιώσιμα, καθώς η σχετικά μικρή ισχύς των πυραύλων που εκτόξευαν τους δορυφόρους τους έθετε σε τροχιά σε τροχιά σε ύψος όχι μεγαλύτερο των 10 km από την επιφάνεια της γης. Η χαμηλή τροχιά είχε σαν αποτέλεσμα ο δορυφόρος να περιστρέφεται ταχύτερα από τη γη, πράγμα που δημιουργούσε προβλήματα στους επίγειους σταθμούς αφού αυτοί έπρεπε να περιστρέφονται για να τον παρακολουθούν.

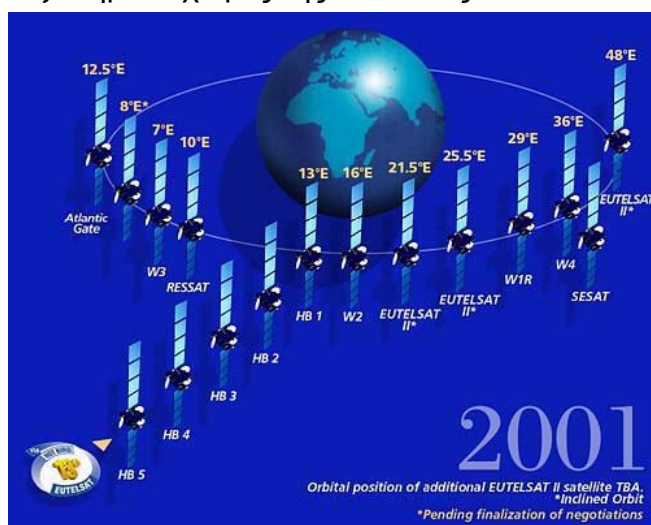
Ο πρώτος γεωσύγχρονος δορυφόρος ο SYNCOM I τέθηκε σε τροχιά το 1963 σε ύψος 35.786 km. Καθώς οι γεωσύγχρονοι δορυφόροι περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα με τη γη, φαίνονται ακίνητοι από αυτή, πράγμα που απλοποιεί την κατασκευή του σταθμού εδάφους. Το 1964 ο δορυφόρος της ίδιας σειράς ο SYNCOM III, χρησιμοποιείται για την κάλυψη των Ολυμπιακών Αγώνων του Τόκιο. Η ιδέα του A. Clarke είχε υλοποιηθεί.

Τα θετικά αποτελέσματα από την χρήση των Telstar και SYNCOM ενθάρρυναν την εμπορική εκμετάλλευση των δορυφορικών συστημάτων με την ίδρυση της πρώτης

εμπορικής ένωσης των COMSAT, στις ΗΠΑ το 1963. Ωστόσο η λειτουργία των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων δεν είναι εθνική αλλά παγκόσμια υπόθεση. Το 1964 με απόφαση των Ηνωμένων Εθνών ιδρύεται ο Διεθνής Συνασπισμός Τηλεπικοινωνιών μέσω Δορυφόρου, ο INTELSAT. Στόχος του είναι η σχεδίαση, ανάπτυξη, κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία ενός παγκοσμίου εμπορικού δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών για παροχή υπηρεσιών χωρίς διακρίσεις. Σήμερα ο INTELSAT περιλαμβάνει 140 χώρες ως μέλη, στα οποία ανήκουν από κοινού οι δορυφορικοί σταθμοί διαστήματος και η διαχείριση του δορυφορικού δικτύου με παροχή υπηρεσιών όπως τηλεφωνίας και τηλεοπτικών προγραμμάτων μεταξύ ΗΠΑ και Ευρωπαϊκών χωρών.

Στη συνέχεια ακολούθησε η ίδρυση και άλλων τέτοιων συνασπισμών με κυριότερους τον INTERSPUTNIK για την εξυπηρέτηση της πρώην ΕΣΣΔ και 14 άλλων σοσιαλιστικών χωρών. Ένας ακόμη Διεθνής οργανισμός ιδρύθηκε το 1979, ο INMARSAT για την παροχή κινητών (mobile) δορυφορικών υπηρεσιών (δηλαδή σε κινούμενους αποδέκτες) στον αέρα, τη θάλασσα και τη γη.

Εκτός από τους παγκόσμιους δορυφορικούς οργανισμούς, έχουν ιδρυθεί και διατηρούν σε λειτουργία αντίστοιχα δορυφορικά συστήματα, αρκετοί “τοπικοί” οργανισμοί όπως; ο ARABSAT στον οποίο συμμετέχουν οι Αραβικές χώρες, ο AUSSAT που εξυπηρετεί την Αυστραλία και τη Νέα Γουϊνέα, ο EUTELSAT που παρέχει υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών, ραδιοπλοήγησης, μετεωρολογίας και έρευνας διαστήματος στις Ευρωπαϊκές χώρες, και ο ASIASAT που εξυπηρετεί χώρες της ΝΑ Ασίας.



Σχ. 6.1 Το δορυφορικό σύστημα της EUTELSAT όπως ήταν το 2001

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών σε μεγάλες ηπειρωτικές και διηπειρωτικές αποστάσεις, όπου όμως αρχίζουν να εκτοπίζονται από τα οπτικά συστήματα. Κύρια πλεονεκτήματά τους είναι τα ακόλουθα:

- ◆ Η απόσταση μεταξύ των επικοινωνούντων επίγειων σταθμών δεν παίζει κανένα ρόλο.
- ◆ Το κόστος χρήσης είναι ανεξάρτητο της απόστασης των συνδεδεμένων σταθμών.
- ◆ Είναι η μόνη λύση για την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, δύσβατων περιοχών όπου η χρήση καλωδιακών συστημάτων είναι αδύνατη ή έχει εξαιρετικά υψηλό κόστος.

Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνονται:

♦ Μεγάλος χρόνος μετάδοσης. Για να σταλεί και να επιστρέψει ένα σήμα στη γη απαιτούνται περίπου 300 ms, πράγμα που δημιουργεί πρόβλημα στην επικοινωνία μεταξύ Ηλεκτρονικών υπολογιστών.

♦ Έλλειψη ασφάλειας στην πληροφορία που παρέχει ο δορυφόρος. Για το λόγο αυτό τα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούν εξειδικευμένες τεχνικές κρυπτογράφησης

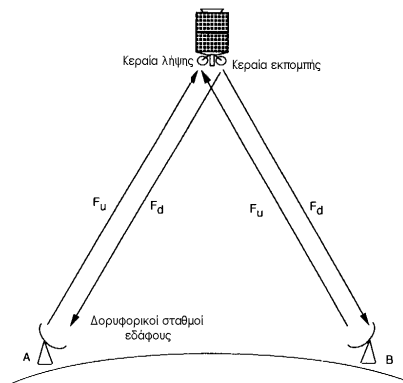
♦ Υψηλό κόστος της τοποθέτησης σε τροχιά καθώς και περιορισμένος χρόνος ζωής των δορυφορικών σταθμών (7 - 10 χρόνια).

Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων η κυριαρχία τους την τελευταία δεκαετία, ιδίως με την ανάπτυξη των οπτικών ινών αμφισβητήθηκε. Σήμερα ωστόσο παρατηρείται μια επιπλέον ανάπτυξη τους που οφείλεται στη παροχή κινητών υπηρεσιών (mobile) και μετάδοση ψηφιακών δεδομένων ευρείας ζώνης.

6.4.2 Το δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας

Ένα δορυφορικό δίκτυο στην πιο απλή του μορφή αποτελείται από δυο επίγειους σταθμούς που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δορυφόρου όπως φαίνεται στο Σχ. 8.2

Για να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος στο δορυφόρο όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, η συχνότητα εκπομπής από το δορυφόρο στον επίγειο σταθμό



Σχ. 6.2 Βασικό δορυφορικό δίκτυο.

που καλείται *συχνότητα κάτω ζεύξης* f_d (downlink) είναι πάντα μικρότερη από τη *συχνότητα άνω ζεύξης* f_u (uplink), που είναι η συχνότητα εκπομπής του επίγειου σταθμού προς το δορυφόρο. Οι συχνότητες αυτές είναι διαφορετικές για να αποφεύγεται η αλληλο-παρεμβολή και είναι τάξης των GHz.

Η τεχνολογία των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων βασίζεται στην τεχνολογία των ραδιοσυστημάτων. Η διαχείριση ωστόσο ζεύξεων εξαιρετικά μεγάλων αποστάσεων (που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη

εξασθένιση και χρονική καθυστέρηση του μεταδιδόμενου σήματος) και η απαίτηση για αποκατάσταση επικοινωνίας ενός ή πολλών με πολλούς τερματικούς σταθμούς (point/multipoint to multipoint), εισάγουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία θα αναδειχθούν κατά την περιγραφή των κύριων μερών ενός δορυφορικού συστήματος, τα οποία είναι:

- Δορυφορικός σταθμός διαστήματος
- Δορυφορικός σταθμός εδάφους
- δορυφορική ζεύξη και πρόσβαση
- Παρεχόμενες Υπηρεσίες
-

6.4.3 Δορυφορικός σταθμός Διαστήματος

Ο δορυφορικός σταθμός διαστήματος είναι ουσιαστικά ο δορυφόρος και όλες οι διατάξεις που του επιτρέπουν να λειτουργεί, να διατηρεί μια καθορισμένη τροχιά και να

χρησιμεύει σαν τηλεπικοινωνιακός αναμεταδότης. Ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος λοιπόν είναι ένας ραδιοσταθμός που βρίσκεται έξω από την ατμόσφαιρα της γης για 5 έως 18 χρόνια, λαμβάνει ραδιοσήματα από επίγειους σταθμούς, τα ενισχύει και τα επανεκπέμπει σε άλλους επίγειους σταθμούς. Πριν προχωρήσουμε με την περιγραφή των βασικών συστημάτων που περιλαμβάνει ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος, κρίνεται σκόπιμο να παραθέσουμε κάποιες πληροφορίες που σχετίζονται με την τροχιά του και την τεχνικές εκτόξευσης, δεδομένου ότι αυτές αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος του κόστους του.

6.4.4 Τροchioθέτηση δορυφόρων και είδη τροχιών

Οι θέσεις που κατέχει ο δορυφόρος κατά τη διάρκεια της ζωής του στο διάστημα αποτελούν την τροχιά του. Αυτή είναι αποτέλεσμα της Νευτώνιας γήινης έλξης, της φυγόκεντρης δύναμης από την περιστροφή του δορυφόρου και άλλων κοσμικών επιδράσεων. Η περίοδος περιστροφής T δορυφόρου σε δεδομένο ύψος h από την επιφάνεια της γης, δίνεται από την σχέση:

$$T = 2\pi \sqrt{(h + R)^3 / GM} \quad [h]$$

οπου $R = 6.378$ km η ακτίνα της γης, $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg² σταθερά του γήινου βαρυντικού πεδίου και $M = 5,94 \cdot 10^{24}$ kg η μάζα της γης.

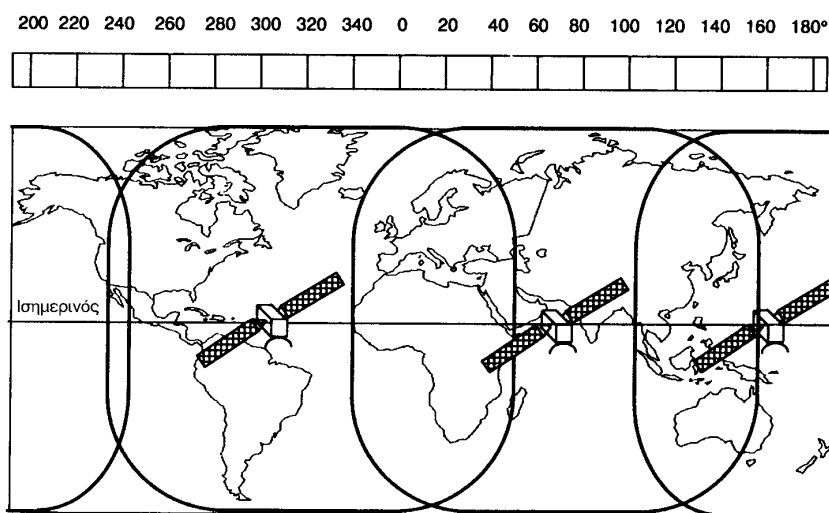
Η τροχιά ενός δορυφόρου σύμφωνα με τους νόμους του Kepler, είναι έλλειψη με μια από τις εστίες της τη γη.. Το σημείο που ο δορυφόρος πλησιάζει πιο κοντά στη γη λέγεται *περίγειο* και το σημείο μέγιστης απομάκρυνσης *απόγειο*. Η πιο συνηθισμένη κυκλική τροχιά είναι βέβαια μια ειδική περίπτωση της κυκλικής. Το σημείο που μια νοητή γραμμή από το απόγειο τέμνει τον ισημερινό λέγεται *υπο-δορυφορικό* σημείο. Η απόσταση του υπο-δορυφορικού σημείου και του ίδιου του δορυφόρου, δηλαδή το ύψος h , αποτελεί μια χαρακτηριστική παράμετρο αφού καθορίζει την περιοχή κάλυψης του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης, την καθυστέρηση του μεταδιδόμενου σήματος την εξασθένιση, αλλά και την επίδραση των ζωνών Van Allen. Στις τροχιές των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων (που περιστρέφονται κατά την ίδια φορά με τη γη) χρησιμοποιούνται τέσσερα διαφορετικά διαστήματα υψών:

I. Χαμηλή τροχιά (LEO - Low Earth Orbit): $500 \text{ km} < h < 2000 \text{ km}$. Η τροχιά αυτή ευρίσκεται κάτω από τις ζώνες Van Allen. Εξυπηρετεί επίγειους σταθμούς με μικρή RF ισχύ εξόδου, παρουσιάζει τη μικρότερη καθυστέρηση (γύρω στα 6 ms) και το μικρότερο κόστος εκτόξευσης. Η περίοδος περιστροφής είναι μικρή, οπότε ο δορυφόρος με αυτή την τροχιά είναι ορατός από ένα επίγειο σταθμό μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 10 - 12 min). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτούνται 40 με 80 δορυφόροι σε έξη ή επτά επίπεδα για παγκόσμια κάλυψη. Για περίπου το 1/3 της τροχιάς του ο LEO δορυφόρος δεν βλέπει τον ήλιο, πράγμα που σημαίνει όχι πλήρη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και επομένως μικρή διάρκεια ζωής (5 -7 χρόνια).

II. Μέση τροχιά (MEO - Medium Earth Orbit): $2000 \text{ km} < h < 12000 \text{ km}$. Η τροχιά αυτή ευρίσκεται μέσα στις ζώνες Van Allen. Παρουσιάζει καθυστέρηση μετάδοσης γύρω στα 70 ms με περίοδο περιστροφής που επιτρέπει στο δορυφόρο να είναι ορατός από ένα επίγειο σταθμό περίπου 60 min. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να

απαιτούνται 10 δορυφόροι σε δυο επίπεδα για παγκόσμια κάλυψη. Οι δορυφόροι MEO έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τους LEO αλλά απαιτούνται υψηλότερες RF ισχύεις τόσο στο δορυφόρο όσο και στους επίγειους τερματικούς σταθμούς.

III. Γεωστατική τροχιά (GEO - Geostationary Earth Orbit): $h \approx 35.800$ km. Οι δορυφόροι GEO είναι γεωσύγχρονοι, με περίοδο περιστροφής ίση με αυτή της γης ενώ το επίπεδο τροχιάς τους ταυτίζεται με αυτό του Ισημερινού της γης. Χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες σε μεγάλο ποσοστό. Πράγματι αφού παραμένουν ακίνητοι σχετικά με ένα επίγειο σταθμό οι κεραίες του σημαδεύουν με ακρίβεια και δεν χρειάζονται ειδικά συστήμα παρακολούθησης (Tracking). Με τρεις μόνο δορυφόρους μπορεί να εξασφαλιστεί παγκόσμια κάλυψη (εκτός από τις πολικές περιοχές) όπως φαίνεται στο Σχ. 8.3



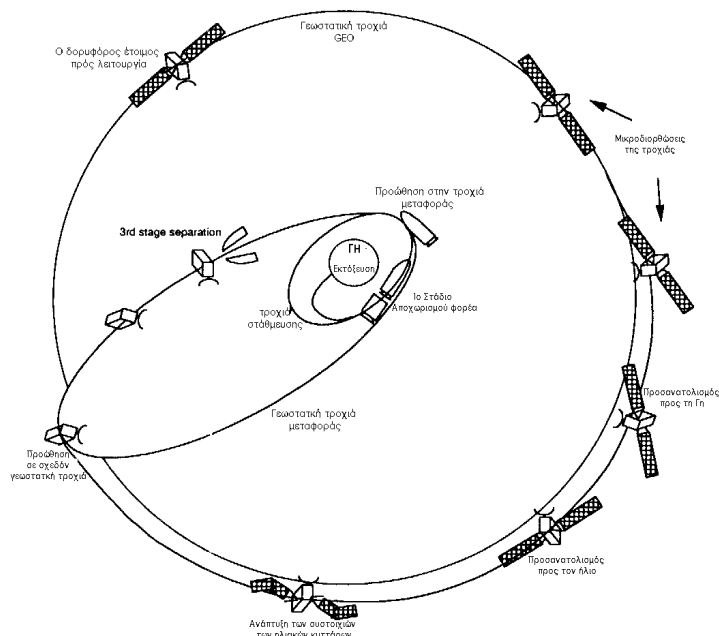
Σχ. 6.3 Παγκόσμια κάλυψη με τρεις γεωστατικούς δορυφόρους

Τα μειονεκτήματα των γεωστατικών δορυφόρων σε σχέση με τους δορυφόρους LEO και MEO, είναι βέβαια η μεγάλη χρονική καθυστέρηση του σήματος που φτάνει τα 540 ms (και για την άνω και κάτω ζεύξη). Στη τηλεφωνία αυτή η καθυστέρηση προκαλεί το φαινόμενο της ηχούς που περιορίζεται με τη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Στη ψηφιακή μετάδοση δεδομένων, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων που απαιτούν επανεκπομπή ψηφιακών πακέτων που έχουν ανιχνευτεί λάθη, χρησιμοποιούνται διατάξεις ενδιάμεσης αποθήκευσης (buffer) μεγάλης χωρητικότητας. Λόγω του μεγάλου ύψους του δορυφόρου, η εξασθένιση των μεταδιδόμενων σημάτων είναι πολύ μεγάλη, πράγμα που απαιτεί υψηλές RF ισχύεις και κεραίες μεγάλης κατευθυντικότητας, τόσο στο δορυφόρο όσο και στους σταθμούς εδάφους.

IV. Υψηλή ελλειπτική τροχιά. (HEO - Highly Elliptical Orbit): Οι δορυφόροι με αυτές τις τροχιές καλύπτουν και τις πολικές περιοχές της γης. Χρησιμοποιούνται από τα κράτη που ανήκαν στην πρώην ΕΣΣΔ, τη Κούβα και την Κίνα (Δορυφορικό σύστημα MOLNIYA) και επιτυγχάνουν τοπική κάλυψη με τρεις δορυφόρους. Έχουν μικρό κόστος εκτόξευσης, περίοδο περίπου 12 ώρες με κύριο μειονέκτημα ότι απαιτούν πολύπλοκο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης από τους σταθμούς εδάφους.

- Εκτόξευση δορυφόρων

Η εκτόξευση του δορυφόρου αποτελεί την πιο κρίσιμη ενέργεια στη δημιουργία ενός δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Η εκτόξευση σε τροχιά LEO και MEO μπορεί να γίνει σε ένα βήμα. Η εκτόξευση ωστόσο ενός δορυφόρου σε γεωστατική τροχιά απαιτεί τρία διαφορετικά στάδια όπως φαίνεται στο Σχ. 8.4.



Σχ. 6.4 Εκτόξευση και τοποθέτηση δορυφόρου σε γεωστατική τροχιά

Ο δορυφόρος μεταφέρεται πρώτα σε μια κυκλική τροχιά (τροχιά στάθμευσης) με τη βοήθεια *δορυφορικού μεταφορέα*. Στο δεύτερο στάδιο με τη βοήθεια προωστικών πυραύλων ο δορυφόρος φέρεται σε γεωστατική ελλειπτική τροχιά μετάβασης (GTO - Geostationary Transfer Orbit). Όταν βρεθεί στο απόγειο της GTO, ένας προωστικός μηχανισμός φέρνει τον δορυφόρο στην τελική GEO τροχιά.

Οι δορυφορικοί μεταφορείς μπορεί να είναι αναλώσιμοι ή μη. Στα “διαστημικά” οχήματα που μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν ανήκει το διαστημικό λεωφορείο (Space Shuttle) των ΗΠΑ και το Ρωσικό ENERGIA.



Σχ. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.1 Εκτόξευση του Ευρωπαϊκού φορέα δορυφόρων ARIANE (Σεπτέμβριος 1997).

Στους αναλώσιμους ανήκει ο Ευρωπαϊκός ARIANE ELV, οι Αμερικανικοί πύραυλοι DELTA και ATLAS, ο Κινέζικος LONG MARCH και ο Ιαπωνικός H-2. Τελειώνοντας θα σημειώσουμε ότι οι εκτοξεύσεις δορυφόρων δεν γίνονται από οποιοδήποτε σημείο της γης. Σήμερα το 50% των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων εκτοξεύεται από το Κουρου της Γαλλικής Γουιάνας το οποίο ευρισκόμενο κοντά στον ισημερινό παρέχει το πλεονέκτημα να ελαχιστοποιεί την ενέργεια

εκτόξευσης. Άλλες περιοχές εκτόξευσης είναι το ακρωτήριο Canaveral στις ΗΠΑ, η Kagoshima στην Ιαπωνία, η Taiyan στην Κίνα και το κοσμοδρόμιο του Baikonour στο Καζακστάν.

6.4.5 Τα μέρη του τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου



Σχ. 6.5 Δορυφόρος της σειράς EUTELSAT II

Ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος αποτελείται σε γενικές γραμμές από δυο μέρη: Το *σκάφος φορέα* ή *διαστημική πλατφόρμα* και το *τηλεπικοινωνιακό υποσύστημα (payload)*. Ο φορέας σε γενικές γραμμές είναι ίδιος για όλους τους δορυφόρους (μετεωρολογικούς, στρατιωτικούς) και με τη σειρά του περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- **Σκελετός υποδομής - κέλυφος**

Χρησιμεύει για τη μηχανική υποστήριξη όλων των υποσυστημάτων του δορυφόρου κατά την εκτόξευση του και όσο είναι σε τροχιά. Έχει σχήμα κυλίνδρου ή κύβου οπότε φέρει και αναδιπλούμενα “φτερά” με συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυττάρων. Ο σκελετός είναι άκαμπτος και πολύ ελαφρύς κατασκευάζεται δε από πλαστικά, ενισχυμένα με ανθρακονήματα (CFRP).

- **Υποσύστημα ελέγχου θέσης στο χώρο**

Ο δορυφόρος όσο βρίσκεται σε τροχιά, εκτός από την έλξη της γης, υφίσταται την επίδραση κοσμικών δυνάμεων (συγκρούσεις με μετεωρίτες, αστρική σκόνη). Κύριος στόχος του υποσυστήματος ελέγχου θέσης στο χώρο είναι να διατηρεί την κεραία του δορυφόρου στραμμένη πάντα προς τη γη και τις συστοιχίες των ηλιακών κυττάρων προς τον ήλιο. Η σταθεροποίηση του σώματος του δορυφόρου επιτυγχάνεται **μηχανικά**, στους μεν κυλινδρικού σχήματος με περιστροφή τους γύρω από τον άξονα αδρανείας τους (spin stabilized), στους δε κυβικού σχήματος που παρουσιάζουν μικρότερη συμμετρία με τη χρήση αδρανειακών σφονδύλων. Στη τελευταία περίπτωση ο δορυφόρος παραμένει ακίνητος στο τρισσορθογώνιο σύστημα αξόνων, που σχηματίζουν η νοητή ευθεία που τον συνδέει με τη γη, η επιτρόχιος ταχύτητά του και η κάθετος στο επίπεδο τροχιάς του (three-axis stabilized).

- **Υποσύστημα Τηλεμετρίας, Παρακολούθησης και ελέγχου (TT&C)**

Το υποσύστημα TT&C (Telemetry, Tracking & Control) με χρήση ειδικών αισθητήρων ελέγχει όλα τα υποσυστήματα του δορυφόρου και εκπέμπει συνεχώς στο σταθμό εδάφους, επαρκείς πληροφορίες για τη θέση του δορυφόρου, την κατάσταση του και τη λειτουργία του.

- **Υποσύστημα ελέγχου τροχιάς**

Με τη βοήθεια των στοιχείων που λαμβάνονται από το υποσύστημα TT&C ο σταθμός εδάφους μπορεί να κάνει μικρές διορθώσεις στην τροχιά και τη θέση του δορυφόρου. Αυτό γίνεται με τηλεέλεγχο ειδικών προωστικών μηχανισμών (εκτόνωση αερίου, που

βρίσκεται σε ειδικές δεξαμενές στο σώμα του δορυφόρου υπό πίεση, ή ενεργοποίηση μικρών ρουκετών).

- **Υποσύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας**

Η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονται τα υποσυστήματα του δορυφόρου για να λειτουργήσουν προκύπτει από συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυττάρων. Οι ηλιακές



Σχ. 6.6 Δορυφόρος της σειράς W της EUTELSAT

συστοιχίες τοποθετούνται πάνω σε αναδιπλούμενα φτερά στους δορυφόρους κυβικού σχήματος ή πάνω στο σώμα του δορυφόρου στους κυλινδρικούς. Η ηλεκτρική ισχύς που εξασφαλίζεται είναι από 1 kW έως 2 kW στην πρώτη περίπτωση και 100W έως 1kW στη δεύτερη. Οι ηλιακές συστοιχίες συνδέονται με μπαταρία NiCd έτσι ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή τροφοδοσία του δορυφόρου ακόμα και όταν τα ηλιακά κύτταρα δεν βλέπουν τον ήλιο.

- **Υποσύστημα ελέγχου θερμοκρασίας**

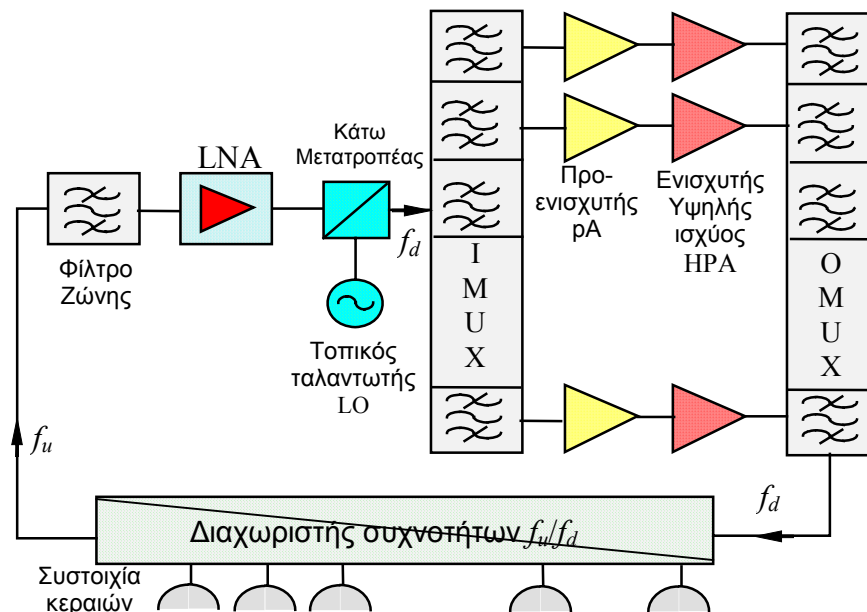
Ο δορυφόρος κινείται στο διάστημα, όπου οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγάλες. Το υποσύστημα διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία του δορυφόρου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των υποσυστημάτων του και η αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του.

Θα περιγράψουμε τώρα με περισσότερες λεπτομέρειες το υποσύστημα τηλεπικοινωνιών του δορυφόρου και θα σκιαγραφήσουμε τις λειτουργίες του.

6.4.5.1 Υποσύστημα Τηλεπικοινωνιών

Το υποσύστημα τηλεπικοινωνιών του δορυφόρου είναι πρακτικά ένας ραδιοσταθμός αναμετάδοσης. Διαχειρίζεται ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων περίπου 500 MHz, διαιρεμένο σε κανάλια πλάτους 40 με 80 MHz. Περιλαμβάνει τις κεραίες εκπομπής/λήψης, ενισχυτές υψηλής ισχύος (HPA), πολυπλέκτη εισόδου (IMUX), πολυπλέκτη εξόδου (OMUX) και τον αναμεταδότη ή *transponder* όπως συνήθως λέγεται. Στο Σχ. 8.7 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα όπου φαίνονται τα κύρια μέρη του υποσυστήματος. Σε αδρές γραμμές η λειτουργία του έχει ως εξής:

Η *συστοιχία των κεραιών* του δορυφόρου είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό σύστημα τροφοδοσίας το οποίο ξεχωρίζει την λαμβανόμενη φέρουσα συχνότητα άνω ζεύξης f_u από την εκπεμπόμενη συχνότητα κάτω ζεύξης f_d και κατανέμει τα σήματα που πρόκειται να εκπεμφθούν στις αντίστοιχες κεραίες. Όλο το λαμβανόμενο εύρος συχνοτήτων οδηγείται στους transponders όπου γίνεται η επιλογή του κάθε καναλιού. Σε κάθε κανάλι αντιστοιχεί και ένας transponder που ευθύνεται για όλη τη διαδρομή του αντίστοιχου σήματος μέσω του δορυφόρου.



Σχ. 6.7 Λειτουργικό διάγραμμα δορυφορικού υποσυστήματος τηλεπικοινωνιών

Ο transponder περιλαμβάνει τις βαθμίδες:

Φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων όπου γίνεται η επιλογή του καναλιού.

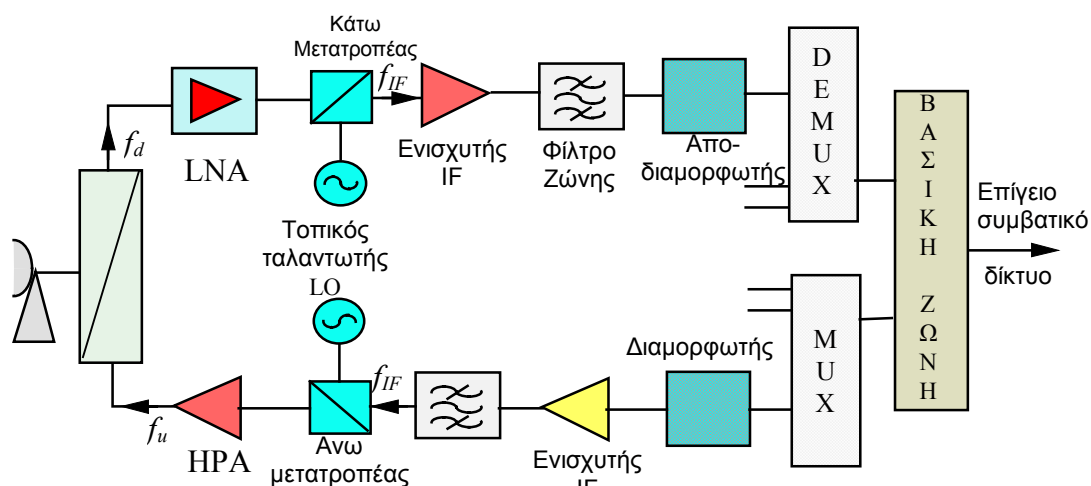
Ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA - Low Noise Amplifier). Κατασκευάζεται με τρανζίστορ τύπου FET από GaAs ή είναι παραμετρικός ενισχυτής. Είναι κατάλληλος για την ενίσχυση πολύ ασθενικών σημάτων

Κάτω μετατροπέας (downconverter). Με τη βοήθεια τοπικού ταλαντωτή μεταφέρει τα λαμβανόμενα κανάλια από την φέρουσα συχνότητα uplink f_u , στην φέρουσα συχνότητα downlink f_d . Λόγω των πολύ υψηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται, η βαθμίδα αυτή αποτελείται από ειδικά σχεδιασμένα μικροκυματικά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Αφού υποβιβαστεί η συχνότητα το σήμα κάθε καναλιού ενισχύεται και οδηγείται στον πολυπλέκτη εισόδου (IMUX) που είναι μια συλλογή από φίλτρα κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να επιλέγουν μόνο ένα κανάλι. Στην συνέχεια κάθε κανάλι περνά στην βαθμίδα προενίσχυσης (pA) και εν συνεχεία στη βαθμίδα ενισχυτή υψηλής ενίσχυσης (HPA). Ο ενισχυτής αυτός είναι μια μικροκυματική λυχνία οδεύοντος κύματος TWT όταν απαιτούνται ισχείς πάνω 10 W, ή ενισχυτής στερεάς κατάστασης (SSPA - Solid State Power Amplifier) για ισχύ μέχρι 10 W. Τα ενισχυμένα σήματα οδηγούνται κατόπιν στον πολυπλέκτη εξόδου (OMUX) αποκόπτονται οι αρμονικές συχνότητες που προέκυψαν από την ενίσχυση, συνδυάζονται τα κανάλια και εκπέμπονται από τις κεραίες του δορυφόρου. Σημειώνεται ότι οι βαθμίδες που περιγράψαμε, υπάρχουν στο δορυφόρο εις διπλούν ώστε σε περίπτωση βλάβης να μη διακόπτεται η λειτουργία του συστήματος. Η μεταγωγή βέβαια απο τη μια βαθμίδα στην ευρισκόμενη σε αναμονή γίνεται αυτόματα.

6.4.6 Δορυφορικός σταθμός εδάφους

Ο σταθμός εδάφους είναι το μέρος του δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος το οποίο λαμβάνει και (ή) εκπέμπει φωνή, σήμα video και ψηφιακά δεδομένα μέσω δορυφόρου. Ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον τερματικό σταθμό που βρίσκεται στη γη με τη γενική έννοια, παρότι ο τελευταίος μπορεί να είναι ένα πλοίο ή ένα αεροσκάφος. Στη βασική του μορφή αποτελείται από ένα δέκτη, ένα πομπό και φυσικά τη κεραία που μπορεί να λαμβάνει και να εκπέμπει σήματα με τη βοήθεια του διαχωριστή (diplexer) και διατάξεις για το διαχωρισμό των καναλιών και τη διοχέτευση τους στο επίγειο δίκτυο. Ένα απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός δορυφορικού σταθμού εδάφους φαίνεται στο Σχ. 8.8.



Σχ. 6.8 Λειτουργικό διάγραμμα δορυφορικού σταθμού εδάφους.

Το προς εκπομπή σήμα βασικής ζώνης διαμορφώνεται αν είναι αναλογικό ή κωδικοποιείται και μετά διαμορφώνεται (Ψηφιακή διαμόρφωση φέρουσας DCM). Η φέρουσα συχνότητα f_{IF} , στη συνέχεια με τη βοήθεια του άνω μετατροπέα (up converter) μετατρέπεται στην συχνότητα άνω ζεύξης f_u . Η συχνότητα f_{IF} είναι 70 MHz ή 140 MHz

ανάλογα με το εύρος ζώνης του transponder. Ακολουθεί ενίσχυση του σήματος με τη βοήθεια ενισχυτή υψηλής ισχύος (HPA). Ο ενισχυτής HPA είναι συνήθως μια λυχνία οδεύοντος κύματος (TWT) ή μια κλύστρον αν για το εκπεμπόμενο σήμα απαιτείται ισχύς από 100 W έως 3 kW. Για εφαρμογές που απαιτούν μικρότερη ισχύ χρησιμοποιούνται ενισχυτές FET σε GaAs ή μικροκυματικές δίοδοι IMPATT.

Το RF σήμα που λαμβάνεται από το δορυφόρο στη φέρουσα συχνότητα f_d είναι βέβαια πολύ ασθενές. Έτσι μετά την κεραία ακολουθεί ένα ενισχυτής LNA, η συχνότητα f_d υποβιβάζεται στον κάτω μετατροπέα στην f_{IF} και γίνεται η αποδιαμόρφωση και στη συνέχεια η αποκωδικοποίηση και η διόρθωση λαθών (αν το σήμα είναι ψηφιακό).

Εν γένει οι σταθμοί εδάφους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

◆ **Μεγάλοι σταθμοί εδάφους.** Χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών στο κοινό σε διεθνές επίπεδο. Λέγονται και πύλες (gateway ή hub) και ουσιαστικά συνδέουν το δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με το επίγειο τηλεφωνικό καθώς και με δίκτυα δεδομένων. Οι κεραίες που χρησιμοποιούν έχουν διάμετρο μέχρι και 30 m.

◆ **Μικροί σταθμοί εδάφους.** Είναι ουσιαστικά οι μεμονωμένοι χρήστες με κεραίες διαμέτρου από 1.8 έως 4.5 m που ονομάζονται VSAT (Very Small Antenna Terminal) και οι USAT (Ultra Small Antenna Terminal) με διαμέτρους από 0.2 έως 1.2 m. Σε αυτούς παρέχονται συνδρομητικές υπηρεσίες (TV, δεδομένα με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης)

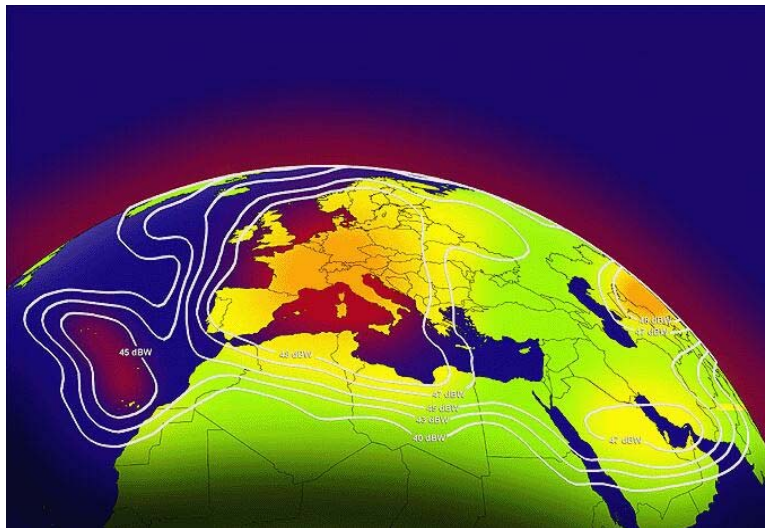
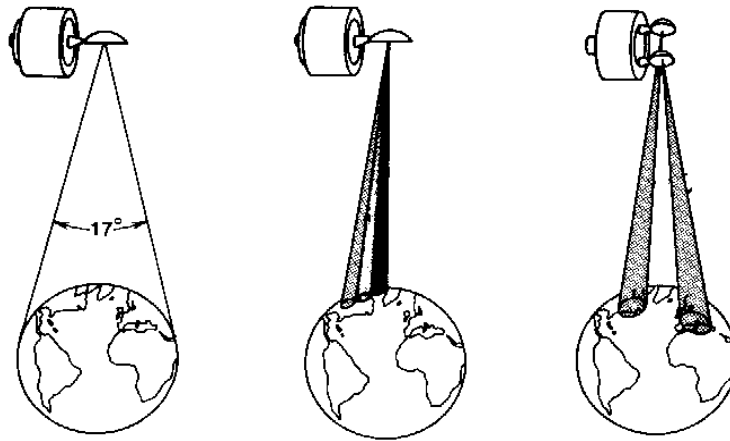
◆ **Κινητοί σταθμοί εδάφους.** Είναι πλοία, αεροσκάφη και τώρα τελευταία προσωπικά κινητά τηλέφωνα.

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι το βασικό λειτουργικό διάγραμμα που παρουσιάστηκε στο Σχ. 8.8 δεν ισχύει για όλες τις περιπτώσεις. Για παράδειγμα σε ένα VSAT σταθμό γίνεται μόνο λήψη, ενώ όταν έχουμε μετάδοση δεδομένων μόνο εκπομπή.

6.4.6.1 Γεωγραφική κάλυψη - Δορυφορικό ίχνος (satellite footprint)

Το δορυφορικό ίχνος είναι ουσιαστικά τμήμα της επιφάνειας της γης όπου το downlink σήμα δορυφόρου διαθέτει την απαραίτητη ισχύ ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί. Το σχήμα και οι διαστάσεις του ίχνους ή της γεωγραφικής περιοχής που 'φωτίζεται' από το δορυφόρο, καθορίζεται από την κεραία και βέβαια από την ισχύ εξόδου του transponder. Στο Σχ. 8.10α παρουσιάζονται μερικοί τύποι δορυφορικής γεωγραφικής κάλυψης.

Πολλές φορές είναι πιο χρήσιμο να έχουμε στη διάθεσή μας τις ισοϋψείς καμπύλες του EIRP του δορυφόρου στην επιφάνεια της γης. Τότε με τη βοήθεια της σχέσης 8.2β υπολογίζεται εύκολα η λαμβανόμενη ισχύς στο σταθμό εδάφους. Οι τιμές του EIRP στην επιφάνεια της γης εκφράζονται συνήθως σε dBW. Στο Σχ. 8.10β φαίνονται οι ισοϋψείς καμπύλες του EIRP, για το δορυφόρο HOTBIRD2 της EUTELSAT.



Σχ. 6.9 Δορυφορική γεωγραφική κάλυψη. α) “Παγκόσμια” (global) ζώνη κάλυψης και περιορισμένες ζώνες κάλυψης τύπου “κηλίδας” (spot). β) Ισοϋψείς καμπύλες του EIRP του δορυφόρου HOTBIRD2 της EUTELSAT που χρησιμοποιεί και ο ΟΤΕ.

6.4.6.2 Παράμετροι Δορυφορικής ζεύξης - τεχνικές μετάδοσης και δορυφορικές υπηρεσίες

6.4.7 Δορυφορικές μπάντες συχνότητων

Από τις σπουδαιότερες παραμέτρους μιας δορυφορικής ζεύξης είναι οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες. Η επιλογή της συχνότητας παίζει μεγάλο ρόλο στην απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα η οποία βέβαια πρέπει να είναι “διαφανής” για να επιτευχθεί η δορυφορική ζεύξη. Σήμερα οι μικροκυματικές συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι:

- ♦ Η συχνότητα των 4 GHz (3.7 - 4.2 GHz) για τη κάτω ζεύξη σε συνδυασμό με τη συχνότητα των 6 GHz (5.925 - 6.425 GHz) για την πάνω ζεύξη. Οι συχνότητες αυτές ανήκουν στην μικροκυματική μπάντα C.

♦ Η συχνότητα των 12 GHz (10.95 - 11.2 GHz) και (11.45 - 11.7 GHz) για την κάτω ζεύξη σε συνδυασμό με τη συχνότητα των 14 GHz (14.0 - 14.5 GHz) για την πάνω ζεύξη. Οι συχνότητες αυτές ανήκουν στην μικροκυματική μπάντα Ku.

♦ Κατόπιν από διεθνείς συμφωνίες διατέθηκε για χρήση και μια τρίτη μπάντα στα 17 GHz για την f_d και στα 30 GHz για την f_u . Οι συχνότητες αυτές ανήκουν στην μικροκυματική μπάντα Ka.

6.4.8 Ισολογισμός ισχύος μιας δορυφορικής ζεύξης

Ο υπολογισμός του ισολογισμού ισχύος μιας ζεύξης καταλήγει στον υπολογισμό του λόγου S/N στο δέκτη που αποτελεί και δείκτη της αξιοπιστίας της ζεύξης. Κατά τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του δέκτη και του πομπού αλλά και του μέσου διάδοσης που στην προκειμένη περίπτωση είναι η γήινη ατμόσφαιρα.

Από τη σχέση (8.2δ) προκύπτει ότι αν η ισχύς που εκπέμπεται από το δορυφόρο είναι P_t , η λαμβανόμενη ισχύς P_r στο δέκτη (λίγο πριν τον ενισχυτή LNA) θα είναι:

$$P_r = G_t G_r \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R^2} P_t = \frac{G_t G_r}{L_{fs}} P_t \quad (8.3\alpha)$$

$$L_{fs} = \frac{16\pi^2 R^2}{\lambda^2} \quad (8.3\beta)$$

όπου G_t και G_r οι κατευθυντικές απολαβές της κεραίας του δορυφόρου και του σταθμού εδάφους αντίστοιχα, λ το χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος και L_{fs} μια παράμετρος που εκφράζει τις απώλειες του ελεύθερου χώρου. Όπως φαίνεται από την σχέση (8.3β) οι απώλειες αυτές αυξάνονται όταν αυξάνεται η συχνότητα εκπομπής. Αυτό εξηγεί το γιατί επιλέγεται η συχνότητα downlink πάντα μικρότερη από τη συχνότητα uplink.

Στην πραγματική κατάσταση εκτός από τις απώλειες του ελεύθερου χώρου πρέπει να συνυπολογιστούν οι απώλειες μεταξύ πομπού και κεραίας L_{ft} , οι απώλειες λόγω της ιονόσφαιρας και της ατμόσφαιρας L_{ga} , οι απώλειες λόγω βροχής L_r και λόγω αποπροσανατολισμού της κεραίας L_p , και τέλος οι απώλειες μεταξύ κεραίας και δέκτη L_{fr} .

Οι συνολικές απώλειες θα είναι:

$$L = L_{fs} \cdot L_{ft} \cdot L_{ga} \cdot L_r \cdot L_p \cdot L_{fr} \quad (8.4\alpha)$$

και η σχέση (8.3α) γίνεται:

$$P_r = \frac{G_t G_r}{L} P_t \quad (8.4\beta)$$

Ο λόγος S/N η καλύτερα ο λόγος της ισχύος της φέρουσας συχνότητας προς τον θόρυβο, C/N αφού δεν έχει γίνει ακόμη αποδιαμόρφωση, προκύπτει από τις σχέσεις (8.2ε) και (8.4β).

$$\frac{C}{N} = \frac{G_t G_r}{LkTB} P_t \quad (8.5)$$

B το εύρος ζώνης του λαμβανόμενου σήματος και T η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας του δέκτη.

6.4.9 Τεχνικές μετάδοσης

Οι τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές ζεύξεις δεν έχουν λόγο να είναι διαφορετικές από αυτές που χρησιμοποιούνται στα επίγεια συμβατικά συστήματα τηλεπικοινωνιών. Η μέθοδος ωστόσο που προτιμάται συνήθως για την μετάδοση αναλογικού σήματος είναι η διαμόρφωση FM που αποτελεί τον καλύτερο ίσως συμβιβασμό μεταξύ της απαιτούμενης στάθμης σήματος και του RF εύρους ζώνης. Για τη μετάδοση ψηφιακού σήματος διαμορφώνεται απευθείας η φέρουσα συχνότητα με χρήση τεχνικών *κλειδώματος ολίσθησης φάσης* (PSK).

- **Μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access - MA)**

Στην πράξη μια ζεύξη τις περισσότερες φορές πρέπει να είναι αμφίδρομη. Επιπλέον επειδή το φάσμα συχνοτήτων που διαθέτει ο δορυφόρος είναι πολύ ακριβό θα πρέπει να εκμεταλλεύεται πλήρως και καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Με λίγα λόγια το δορυφόρο πρέπει να τον χρησιμοποιούν περισσότεροι από ένας δορυφορικοί σταθμοί εδάφους και να επιτυγχάνονται πολλαπλές ζεύξεις δύο δρόμων.

Η πρόσβαση σε ένα δορυφορικό σταθμό εδάφους επιτυγχάνεται με τις συμβατικές μεθόδους πολυπλεξίας. Η πρόσβαση μιας ομάδας δορυφορικών σταθμών εδάφους στον ίδιο δορυφόρο γίνεται με τις τεχνικές της *πολλαπλής πρόσβασης*. Η πολλαπλή πρόσβαση είναι μια παραλλαγή της πολυπλεξίας εξειδικευμένη για τις δορυφορικές επικοινωνίες. Θα μπορούσε να οριστεί ως οποιαδήποτε τεχνική με την οποία μια ομάδα επίγειων δορυφορικών σταθμών αποκαθιστά επικοινωνιακές ζεύξεις με τη βοήθεια των φασματικών καναλιών του δορυφόρου. Πολλαπλή πρόσβαση είναι λοιπόν η πολυπλεξία των RF σημάτων πληροφορίας στα κανάλια του δορυφόρου.

Υπάρχουν τρεις βασικές μορφές πολλαπλής πρόσβασης:

- ♦ **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA Frequency Division MA).**

Εδώ κάθε ζεύξη απαιτεί ένα μέρος b από την μπάντα συχνοτήτων B του transponder. Αν το b είναι ίδιο για κάθε ζεύξη τότε ο δορυφόρος μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα $n = B/b$ ζεύξεις. Κάθε κανάλι b εκχωρείται προσωρινά και τουλάχιστον όσο διαρκεί η ζεύξη.

- ♦ **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA Time Division MA).** Με την τεχνική αυτή, κάθε ζεύξη j αποκαθίσταται κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος t_j (χρονοθυρίδα) κάθε T_F sec. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μετάδοση κατά ριπάς. Όλο το φάσμα συχνοτήτων του transponder είναι κοινό για όλες τις ζεύξεις και ο χρόνος διαιρείται σε διαστήματα T_F (περίοδος πλαισίου). Αν ο χρόνος t_j είναι ίδιος για όλες τις ζεύξεις τότε ο δορυφόρος μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα $n = T_F/t_j$ ζεύξεις. Η τεχνική TDMA απαιτεί έλεγχο και συγχρονισμό των σταθμών εδάφους του δορυφορικού συστήματος.

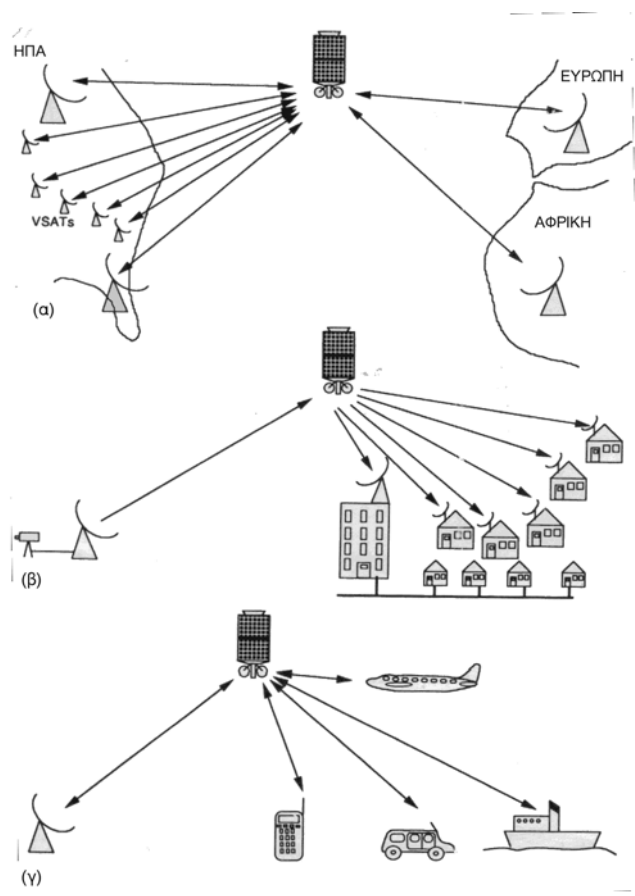
- ♦ **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA Code Division MA).**

Χρησιμοποιείται όταν έχουμε μετάδοση ψηφιακών σημάτων. Με την τεχνική αυτή μια ομάδα σταθμών εδάφους χρησιμοποιεί όλο το φάσμα συχνοτήτων του transponder *συνεχώς*. Τα σήματα τους κωδικοποιούνται με τη βοήθεια κατάλληλων κωδίκων και έτσι ώστε η πληροφορία από ένα πομπό να μπορεί να ανακτηθεί μόνο από δέκτη κατάλληλα συγχρονισμένο, που γνωρίζει τον κώδικα. Με την τεχνική αυτή αποφεύγεται η

συμφόρηση στο δορυφόρο και χρησιμοποιείται και στα στρατιωτικά δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών.

6.4.10 Υπηρεσίες που παρέχονται από ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα

Οι επικοινωνίες μέσω δορυφόρου καλύπτουν όλο το τηλεπικοινωνιακό φάσμα υπηρεσιών (μετάδοση φωνής, τηλεοπτικού σήματος, ψηφιακών δεδομένων, τηλεμοιοτυπίας κλπ). Οι υπηρεσίες που παρέχονται από ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα, όπως παραστατικά παρουσιάζεται στο Σχ. 8.13 διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες.



Σχ. 6.10 Σχηματική αναπαράσταση των δορυφορικών υπηρεσιών. α) Σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες (FSS), β) Δορυφορικές υπηρεσίες άμεσης εκπομπής (ραδιοφωνία- τηλεόραση) και γ) Κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (MSS)

- **Σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες (FSS - Fixed Satellite Services)**

Στα δίκτυα FSS τα σήματα αναμεταδίδονται μεταξύ ακίνητων επίγειων σταθμών, οι οποίοι είναι εν γένει μεγάλου μεγέθους, ιδιαίτερα σύνθετοι και υψηλού κόστους. Οι σταθμοί αυτοί συνδέονται με το συμβατικό επίγειο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και μια υπηρεσία FSS προορίζεται για κάλυψη τηλεπικοινωνιακών αναγκών σε μεγάλες αποστάσεις. Οι υπηρεσίες FSS περιλαμβάνουν τηλεφωνία, τηλεγραφία/telex, τηλεόραση, μετάδοση δεδομένων, ολοκληρωμένες υπηρεσίες ISDN και μετάδοση

επειγόντων περιστατικών (πχ πολέμων, φυσικών καταστροφών κλπ). Μια ειδική περίπτωση είναι και η υπηρεσία VSAT όπου τερματικοί σταθμοί VSAT επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δορυφόρου.

- **Δορυφορικές υπηρεσίες άμεσης εκπομπής (DBS - Direct Broadcast Satellite Services)**

Στα δίκτυα DBS ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά προγράμματα μεταδίδονται άμεσα από ένα κεντρικό δορυφορικό σταθμό εδάφους μέσω δορυφόρου σε ένα σταθμό εδάφους “μόνο λήψης”. Αυτός μπορεί να είναι ένας σταθμός παροχής καλωδιακής τηλεόρασης (**CATV**) ή ένας απλός οικιακός δορυφορικός δέκτης με κεραία διαμέτρου μέχρι 1m. (υπηρεσία **DTH** - Direct To the Home).

- **Κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (MSS - Mobile Satellite Services)**

Στα δορυφορικά δίκτυα MSS τα σήματα αναμεταδίδονται μέσω δορυφόρου μεταξύ ενός μεγάλου δορυφορικού σταθμού εδάφους (συνήθως συνδεδεμένου με το εσυμβατικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο) και μικρών κινούμενων σταθμών προσαρμοσμένων σε πλοία, αεροσκάφη και οχήματα. Αυτό τον τύπο υπηρεσιών προσφέρουν οι οργανισμοί INMARSAT (εξυπηρέτηση κυρίως των αναγκών της ναυσιπλοίας και αεροπλοίας) και εν μέρει ο EUTELSAT.

Στο MSS δίκτυο πρέπει να προσθέσουμε και τις πρόσφατες υπηρεσίες δορυφορικής κινητής τηλεφωνίας. Από τα μέσα του 1998 λειτουργεί το πρώτο δορυφορικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας το IRIDIUM. Υποστηρίζεται από 66 LEO δορυφόρους (σε ύψος 780 km) και 12 επίγειους σταθμούς. Πρακτικά μπορεί ένας συνδρομητής να καλέσει και να δεχθεί κλήση από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου. Μέχρι τον Αύγουστο του 1999 η Iridium LCC είχε μόνο 20000 πελάτες, γεγονός που καθιστά το μέλλον του IRIDIUM επισφαλές. Ωστόσο σήμερα βρίσκονται σε εξέλιξη τρία ακόμη πανομοιότυπα προγράμματα, που φιλοδοξούν να έχουν καλύτερη τύχη. Είναι το GLOBSTAR (52 LEO δορυφόροι), το ICO (10 MEO δορυφόροι) και το TELEDESIC (288 δορυφόροι).

Πέρα από αυτές τις υπηρεσίες που αφορούν κυρίως τις τηλεπικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί και οι κάτωθι:

- ♦ **Δορυφορική υπηρεσία ραδιοεντοπισμού και ραδιοπλοήγησης (GPS).** Οι δορυφόροι της χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της γεωγραφικής θέσης ή την παροχή υπηρεσιών που σχετίζονται με τη θέση. Η ακρίβεια που προσφέρεται είναι της τάξης των αστρονομικών μεθόδων.

- ♦ **Μετεωρολογική δορυφορική υπηρεσία.** Με κατάλληλα εξοπλισμένους δορυφόρους η υπηρεσία αυτή συγκεντρώνει μεγάλες ποσότητες μετεωρολογικών δεδομένων από όλο τον κόσμο σε μικρό χρονικό διάστημα και έτσι γίνεται δυνατή και με μεγάλη ακρίβεια η πρόγνωση των καιρικών συνθηκών.

- ♦ **Δορυφορική Υπηρεσία έρευνας διαστήματος και εξερεύνησης της γης.** Η υπηρεσία αυτή χρησιμοποιεί δορυφόρους για επιστημονική έρευνα, που ανάλογα με το σκοπό της, ευρίσκονται κοντά ή μακριά από τη γη και είναι επανδρωμένοι ή μη.

6.4.11 Οι δορυφορικές υπηρεσίες στην Ελλάδα

Ο Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών Ελλάδος είναι ιδρυτικό μέλος του INMARSAT που όπως έχομε αναφέρει εξυπηρετεί την εθνική και διεθνή επικοινωνία μεταξύ πλοίων και ξηράς. Ο ΟΤΕ για αυτό το σκοπό χρησιμοποιεί τα συστήματα INMARSAT -A και INMARSAT-C και INMARSAT-M/B/phone που επιπλέον προσφέρουν και ανεπτυγμένες υπηρεσίες τηλεφωνίας και μετάδοσης δεδομένων.

Η χώρα μας δεν διαθέτει δικό της δορυφόρο. Οι δορυφορικές μας επικοινωνίες εξυπηρετούνται από 12 δορυφορικούς σταθμούς εδάφους των οποίων οι κεραίες στοχεύουν δορυφόρους των οργανισμών INTELSAT, EUTELSAT και INMARSAT. Οι σταθμοί αυτοί ευρίσκονται στα κέντρα δορυφορικών επικοινωνιών των Θερμοπυλών και της Νεμέας και στο κτίριο ΝΥΜΑ στην Αθήνα. Στο τελευταίο ευρίσκεται ένας σταθμός εδάφους για την εξυπηρέτηση διεθνών ψηφιακών κυκλωμάτων υψηλής ταχύτητας και ένας αυτοκινούμενος σταθμός εδάφους που εξυπηρετεί τηλεοπτικές ανάγκες σε συνεργασία με τα συστήματα EUTELSAT και INTELSAT.

Technology and Maximum Bandwidth

Technology	Maximum Bandwidth
Fibre Optics	10 Gbps (and beyond with DWDM)
Laser	1 Gbps
<i>Ethernet</i>	<i>1 Gbps</i>
<i>ATM</i>	<i>622 Mbps (and beyond)</i>
Microwave	155 Mbps
Satellite	155 Mbps (experimental 622 Mbps)
LMDS	100 Mbps
VDSL	52 Mbps
Cable modems	30 Mbps
ADSL	9 Mbps
HDSL	2 Mbps
E1 leased line	2 Mbps
ISDN PRI	2 Mbps
<i>Frame Relay</i>	<i>2 Mbps, 45 Mbps — specs up to 622 Mbps</i>
ISDN BRI	128 Kbps
Analog modems	56 Kbps

6.5 Οπτικά Τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Τα τελευταία χρόνια μια καινούργια τεχνολογία φαίνεται να κυριαρχεί στην ενσύρματη μεταφορά πληροφορίας, αυτή των Οπτικών Επικοινωνιών. Μιλάμε πλέον για τα οπτικά συστήματα επικοινωνίας, που σε σχέση με τα συμβατικά χρησιμοποιούν ως φορέα “φως” ορατό ή μη (**οπτική ζώνη** του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μήκη κύματος από 0.4 μm έως 3 μm). Ως μέσο μεταφοράς της πληροφορίας αντί των κλασσικών χάλκινων γραμμών μεταφοράς (δυσύρματες γραμμές - ομοαξονικά καλώδια) χρησιμοποιούνται πολύ λεπτές (με διάμετρο όσο μιας τρίχας) ίνες από γυαλί.

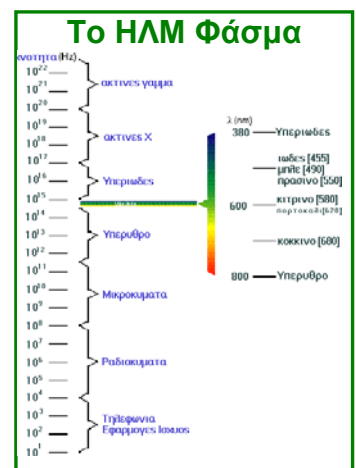
Οι **οπτικές ίνες** (Optical fibers) όπως θα ονομάζονται στο εξής οι ίνες αυτές, είναι τα πλέον κατάλληλα μέσα για την οδήγηση της οπτικής δέσμης που μεταφέρει την πληροφορία σε ψηφιακή μορφή. Είναι καθολικά αποδεκτό ότι χωρίς την οπτική ίνα δεν θα υπήρχαν οι οπτικές επικοινωνίες, ενώ ακόμη και σήμερα τα υπάρχοντα οπτικά συστήματα δεν αξιοποιούν πλήρως τις δυνατότητές της. Ένα μεγάλο μέρος της σύγχρονης έρευνας αποσκοπεί στην ανάπτυξη νέων διατάξεων και τεχνικών για την πλήρη εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών της.

Τα οπτικά συστήματα καθιερώθηκαν με την εγκατάσταση του TAT-8 (όγδοη υπερατλαντική ζεύξη Ευρώπης – ΗΠΑ, 1988) και σήμερα επεκτείνονται στα τοπικά και στα δίκτυα μεγάλων αποστάσεων.

6.5.1 Η εξέλιξη των οπτικών συστημάτων επικοινωνίας

Η χρήση του φωτός για τη μεταφορά πληροφορίας δεν είναι ασφαλώς μια καινούργια ιδέα. Πολύ ενωρίς ο άνθρωπος χρησιμοποίησε οπτικές τεχνικές για να μεταδώσει πληροφορίες σε κοντινές ή μακρινές αποστάσεις. Από τα σήματα καπνού και τις φρυκτωρίες και αργότερα τον οπτικό τηλέγραφο φτάνουμε στον ηλεκτρικό τηλέγραφο, το τηλέφωνο και τις ραδιοφωνικές ζεύξεις, στα μικροκύματα, στα radar, την τηλεόραση, τα τηλέτυπα και τις δορυφορικές επικοινωνίες. Όμως, σχετικά γρήγορα φάνηκε ότι τα ραδιοηλεκτρικά κύματα δεν θα επαρκούσαν για πολύ για την κάλυψη των αναγκών της ανθρωπότητας, αφού η ζήτηση για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες ολοένα αυξανόταν. Το πρόβλημα του συνωστισμού των τηλεπικοινωνιακών καναλιών ήταν αδύνατο πλέον να ξεπεραστεί αξιοποιώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης από τα ραδιοηλεκτρικά κύματα. Εδώ αρχίζουν οι προσπάθειες για την αξιοποίηση του τεράστιου εύρους ζώνης, που προσφέρει η οπτική περιοχή (υπέρυθρο, ορατό και υπεριώδες) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

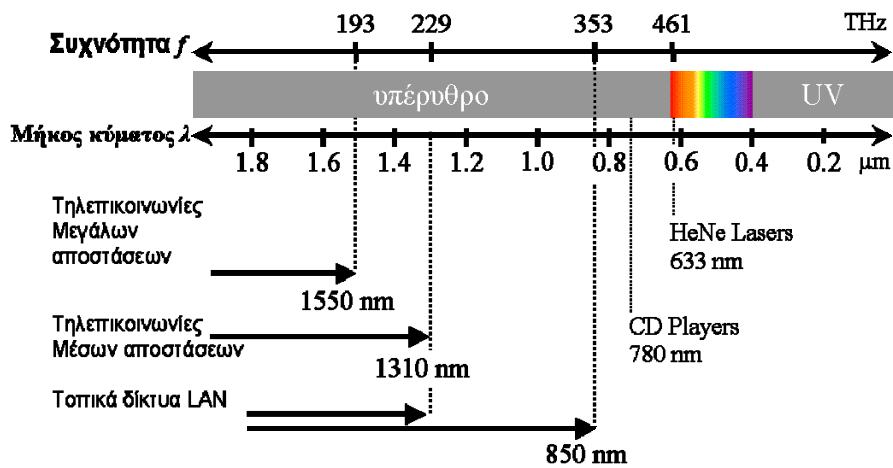
Έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε τους πρακτικούς λόγους που οδηγούσαν τους τηλεπικοινωνιακούς μηχανικούς σε όλο και υψηλότερες συχνότητες. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η χωρητικότητα πληροφορίας του, που πρακτικά καθορίζει το ρυθμό πληροφορίας (bps) ή το πλήθος των «σημάτων πληροφορίας» που μπορεί να μεταδώσει με



συγκεκριμένο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N). Είναι γνωστό ότι η χωρητικότητα πληροφορίας μιας ζεύξης είναι ανάλογη με το εύρος ζώνης της διαμορφωμένης φέρουσας συχνότητας, που διαθέτει η ζεύξη. Η διαμόρφωση είναι μια διαδικασία απαραίτητη για τη μεταφορά της πληροφορίας και έχει ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του φάσματος της φέρουσας συχνότητας, σε έκταση τουλάχιστον διπλάσια από το εύρος συχνοτήτων που έχει το σήμα διαμόρφωσης.

Πράγματι αν f_c η συχνότητα του φέροντος και f_m η μέγιστη συχνότητα του σήματος πληροφορίας, για να επιτύχουμε τη μετάδοσή της χωρίς παραμόρφωση, πρέπει να διαθέσουμε στη ζεύξη εύρος ζώνης από $f_c - f_m$ έως $f_c + f_m$ δηλαδή $2 f_m$. Έτσι για τη μετάδοση ενός τηλεοπτικού καναλιού που απασχολεί συνήθως ένα εύρος συχνοτήτων 5 MHz, με φέρουσα συχνότητα $f_c = 150$ MHz, πρέπει να αφιερώσουμε τη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 145 MHz έως 155 MHz. Αυτό το φασματικό εύρος μεγαλώνει, όταν χρησιμοποιήσουμε τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης (πρακτικά είναι πολλαπλάσιο του ρυθμού σηματοδότησης). Παρατηρώντας το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, βλέπουμε ότι όλες μαζί οι κλασσικές τηλεπικοινωνιακές ζώνες (μακρά, μεσαία, βραχεία, υπερβραχεία και μικροκύματα) διαθέτουν μια έκταση συχνοτήτων $B = 30$ GHz που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη μετάδοση $n = \frac{B}{2f_m}$ σημάτων

πληροφορίας.



Σχήμα 5.4.1 Το χρησιμοποιούμενο φάσμα συχνοτήτων στις οπτικές επικοινωνίες

Τα οπτικά συστήματα λειτουργούν λίγο πιο κάτω από τη συχνότητα του ορατού φωτός γύρω στα 1.55 μm και 1.3 μm . Χρησιμοποιώντας σαν φέρουσα την αντίστοιχη συχνότητα των 193 THz και εκμεταλλευόμενοι το 5-10% του φάσματος γύρω από αυτήν όπως και στις συμβατικές τηλεπικοινωνίες, το διαθέσιμο εύρος ζώνης προκύπτει ως $B \approx 30.000$ GHz, αυξάνοντας τον αριθμό των τηλεπικοινωνιακών καναλιών που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα, κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον 1000. Αυτό βέβαια είναι ένα θεωρητικό όριο και αφορά μόνο τη φέρουσα συχνότητα. Όπως θα δούμε στην

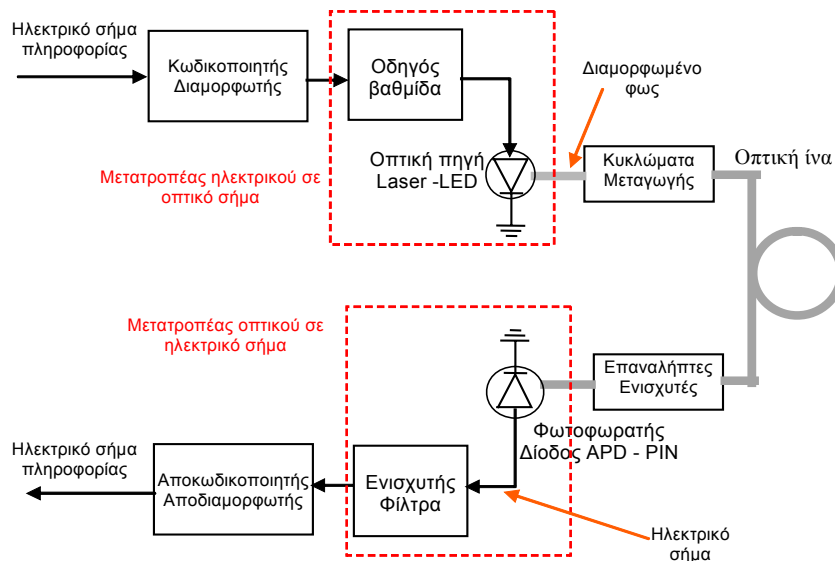
υλοποίηση ενός οπτικού συστήματος συμμετέχουν διάφορες διατάξεις που περιορίζουν σημαντικά το εύρος ζώνης B , το οποίο όμως παραμένει αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των συμβατικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Συνεπώς δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι αν αξιοποιηθεί η οπτική ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, υπερκαλύπτονται οι ανάγκες της ανθρωπότητας για επικοινωνία και πληροφόρηση τουλάχιστον για το άμεσο μέλλον.

Το έναυσμα για τη χρήση του οπτικού φάσματος αποτελεί η ανακάλυψη του laser γύρω στα 1960. Το laser είναι μια μονοχρωματική πηγή στην οπτική περιοχή, με σταθερά κυματικά χαρακτηριστικά, εξαιρετική πυκνότητα ακτινοβολίας, κατευθυντικότητα και με δυνατότητα διαμόρφωσης στις υψηλές συχνότητες. Δεδομένου ότι αρχικά η τεχνολογία δεν διέθετε τις κατάλληλες διατάξεις διαμόρφωσης και φώρασης του φωτός, η κινητοποίηση των ερευνητών και των μηχανικών ήταν πρωτοφανής. Ανακαλύπτονται νέα υλικά και εξελίσσονται για τηλεπικοινωνιακή χρήση φωτοδίοδοι, φωτοτρανζίστορ, φωτο-FET και άλλα είδη φωτοπηγών όπως οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι ή LED.

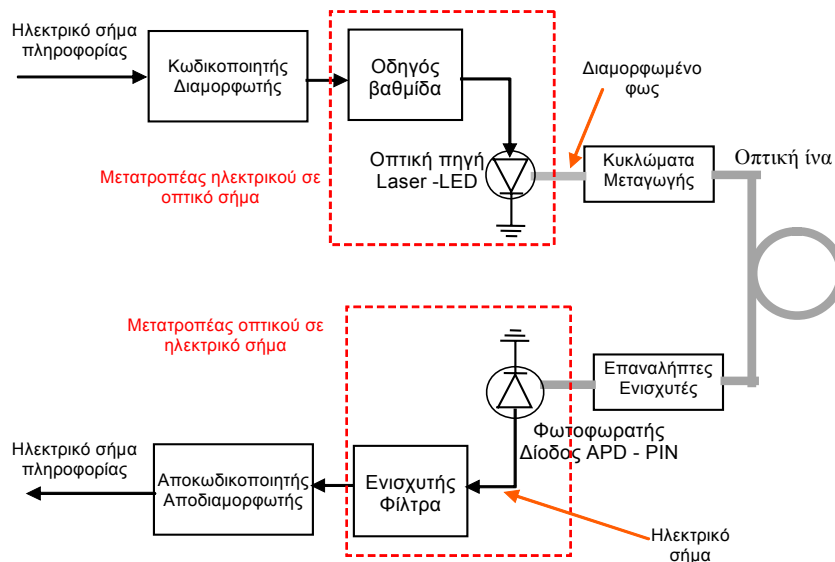
Τα πρώτα οπτικά συστήματα είναι ασύρματα. Οι ακτίνες laser ταξιδεύουν ελεύθερα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιώντας διατάξεις φακών εστίασης και καθρεπτών. Τα προβλήματα είναι πολλά. Δυσκολία στην εστίαση της φωτεινής δέσμης, εξάρτηση από την κατάσταση της ατμόσφαιρας και απαραίτητη η οπτική επαφή πομπού δέκτη. Έτσι οι έρευνες στρέφονται στην ανακάλυψη ενός καταλλήλου μέσου μεταφοράς για το οπτικό φέρον. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 παρουσιάζεται στα εργαστήρια της Αγγλικής Standard Telecommunications Labs ένα απλό οπτικό σύστημα που χρησιμοποιεί σαν μέσο μεταφοράς του οπτικού φέροντος συνεχή ίνα από γυαλί. Οι πρώτες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνταν ήδη στην ιατρική για την κατασκευή ενδοσκοπίων, αλλά δεν ήταν κατάλληλες για χρήση στις τηλεπικοινωνίες. Εμφάνιζαν μεγάλη εξασθένηση της τάξης των 1000 dB/Km, (δηλαδή η ισχύς του σήματος εξόδου είναι 10^{100} φορές μικρότερη από την ισχύ του σήματος εισόδου μετά από διαδρομή ενός km) τη στιγμή που τα ομοαξονικά καλώδια των συμβατικών ενσύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων εμφάνιζαν αντίστοιχα εξασθένηση της τάξης των 5-10 dB/Km. Οι κατασκευαστές με κατάλληλες τεχνικές (απομακρύνοντας τις διάφορες προσμείξεις και κυρίως τα ιόντα υδροξυλίου) περιορίζουν την εξασθένηση στα 20 dB/Km. Μέχρι το 1975 η εξασθένηση έγινε 2 dB/Km και το 1980 0.25 dB/Km (δηλαδή το οπτικό σήμα χάνει μόλις το 5% της ισχύος του μετά από διαδρομή ενός km!). Το μέσο μεταφοράς των οπτικών συστημάτων είχε πλέον βρεθεί. Παράλληλα η ανάπτυξη των νέων υλικών οδηγεί στην κατασκευή ημιαγωγικών πηγών laser και φωτοφωρατών με διαστάσεις συγκρίσιμες με τα χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος 0.8 – 1.6 μm . Σήμερα η έρευνα οδηγεί με σταθερά βήματα στη μονολιθική ολοκλήρωση τους, άρα και στη μαζική παραγωγή τους κατά τα πρότυπα των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

6.5.2 Το οπτικό σύστημα επικοινωνίας

Ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα οπτικών ινών δεν διαφέρει στις βασικές αρχές από το αντίστοιχο συμβατικό. Σε γενικές γραμμές ένα απλό σύστημα οπτικής επικοινωνίας παρουσιάζεται στο



Σχήμα . Η πληροφορία που πρόκειται να μεταδοθεί είναι κατ' αρχήν σε ηλεκτρική μορφή και μετατρέπεται σε οπτικό σήμα. Αυτό απαιτεί μια οπτική πηγή και το κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα οδήγησης (driver). Στη συνέχεια το οπτικό πλέον σήμα οδηγείται μέσω της οπτικής ίνας. Σε μερικά σημεία της διαδρομής είναι δυνατόν να δρομολογηθεί σε άλλα κανάλια αν χρειάζεται, με τη βοήθεια διατάξεων μεταγωγής. Στα πραγματικά συστήματα το οπτικό σήμα κατά τη διάδοσή του υφίσταται εξασθένιση δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται ίνες μεγάλου μήκους. Έτσι κατά μήκος μιας οπτικής ζεύξης τοποθετούνται ενισχυτές ή αναγεννητές ανάλογα με το αν το οπτικό φέρον έχει διαμορφωθεί αναλογικά ή ψηφιακά. Όταν το οπτικό σήμα φτάσει στον οπτικό δέκτη μετατρέπεται και πάλι σε ηλεκτρικό με τη βοήθεια ειδικής διάταξης, του φωτοφωρατή. Τα ηλεκτρικά σήματα πληροφορίας (αν έχει προηγηθεί πολυπλεξία) στη συνέχεια ενισχύονται, διαχωρίζονται και ανακτούν την αρχική τους μορφή. Στα αναλογικά οπτικά συστήματα η μεταβολή της έντασης του φωτός που εκπέμπεται από τη φωτεινή πηγή γίνεται με συνεχή τρόπο ενώ στα ψηφιακά λαμβάνονται διακεκριμένες μεταβολές της π.χ. παλμοί on-off. Η αναλογική διαμόρφωση σε ένα οπτικό σύστημα είναι λιγότερο αποτελεσματική από την ψηφιακή. Αυτό οφείλεται στο ότι στην αναλογική διαμόρφωση απαιτούνται υψηλότερες τιμές σήματος προς θόρυβο (S/N) στο δέκτη και μεγάλη γραμμικότητα, που δεν παρέχουν οι διαθέσιμες στο εμπόριο ημιαγωγικές οπτικές πηγές. Συνεπώς τα αναλογικά οπτικά συστήματα περιορίζονται σε ζεύξεις μικρών αποστάσεων και συγκεκριμένες εφαρμογές όπως η διανομή τηλεοπτικού σήματος (καλωδιακή TV).



Σχήμα 5.4.2 Το βασικό οπτικό σύστημα τηλεπικοινωνιών

Η επεξεργασία της πληροφορίας (διαμόρφωση, πολυπλεξία) και η μεταγωγή των οπτικών σημάτων κατά μήκος της οπτικής ίνας, σε μεγάλο ποσοστό των εν χρήσει συστημάτων, γίνονται σε ηλεκτρική μορφή. Παλιότερα το ίδιο συνέβαινε και με την ενίσχυση του οπτικού σήματος. Δηλαδή το οπτικό σήμα μετατρέποταν σε ηλεκτρικό, ενισχυόταν και μετατρέποταν ξανά σε οπτικό για να συνεχιστεί η μετάδοσή του δια μέσου της οπτικής ίνας. Σήμερα έχουν εγκατασταθεί συστήματα, όπου όλες οι παραπάνω διαδικασίες γίνονται σε οπτική μορφή με τη χρήση καταλλήλων διατάξεων (οπτικοί ενισχυτές, οπτικά φίλτρα), με αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους ζώνης της οπτικής ζεύξης.

Ένα οπτικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα περιλαμβάνει:

- **Οπτική ίνα.** Είναι η βάση του συστήματος και σε αυτήν οφείλονται τα πλεονεκτήματά του.
- **Ενεργά στοιχεία.** Περιλαμβάνουν τις *φωτεινές πηγές*, και τους *φωτοφωρατές*, που πραγματοποιούν τις βασικές λειτουργίες της δημιουργίας και ανίχνευσης του οπτικού σήματος καθώς και τους οπτικούς ενισχυτές που το ενισχύουν κατά τη διάρκεια της διαδρομής του στην οπτική ίνα.
- **Παθητικά στοιχεία.** Περιλαμβάνουν τους οπτικούς συνδέσμους και μεταγωγείς, τους οπτικούς διαμορφωτές και συζεύκτες που χρησιμεύουν στην επεξεργασία του οπτικού σήματος.

Στα παραπάνω θα πρέπει να προσθέσουμε και τις ηλεκτρονικές διατάξεις οδήγησης των ενεργών στοιχείων καθώς και τις ηλεκτρονικές βαθμίδες επεξεργασίας του σήματος σε ηλεκτρική μορφή. Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των επιμέρους στοιχείων ενός οπτικού συστήματος συνοψίζουμε τα πλεονεκτήματά του.

Μεγάλη χωρητικότητα πληροφορίας. Οφείλεται στη χρήση της οπτικής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Μικρό κόστος. Πράγματι το γυαλί είναι πολύ πιο φθηνό από το χαλκό και τα αποθέματα του ανεξάντλητα. Ακόμη η μικρή εξασθένιση των οπτικών ινών μειώνει τον

αριθμό των αναμεταδοτών/ενισχυτών σε μια ζεύξη μειώνοντας ακόμη περισσότερο το κόστος.

Χαμηλό βάρος και μικρό μέγεθος της οπτικής ίνας. Ένα καλώδιο οπτικών ινών ζυγίζει 4 φορές λιγότερο από ένα συμβατικό και έχει περίπου τη μισή διάμετρο.

Αναισθησία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Το γυαλί είναι διηλεκτρικό και δεν παρουσιάζει φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Ευκολία αναβάθμισης. Χρησιμοποιώντας τεχνικές WDM (που θα δούμε αργότερα), η χωρητικότητα ενός οπτικού συστήματος μπορεί να αυξηθεί κατά μια τάξη μεγέθους χωρίς αλλαγή της οπτικής ίνας.

Ασφάλεια. Είναι αδύνατον να γίνει υποκλοπή του οπτικού σήματος. Επίσης λόγω του ότι δεν έχουμε μεταφορά ηλεκτρικού σήματος, τα οπτικά συστήματα προτιμώνται σε περιοχές υψηλού κινδύνου εκρήξεων λόγω σπινθήρων (χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων κλπ.)

Είναι πλέον φανερό ότι όσον αφορά τα μέσα μετάδοσης οι οπτικές ίνες, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια οποιαδήποτε μορφής, είναι η μόνη τεχνολογία με δυνατότητες να προσφέρει λύση ικανοποιώντας την συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για εύρος ζώνης. Ακόμα και η ραδιομετάδοση (ασύρματες μικροκυματικές ζεύξεις, κυψελωτές κινητές τηλεπικοινωνίες), μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, διαθέτει περιορισμένο εύρος ζώνης, ακόμα και στην περίπτωση που έχουμε μικρές κυψέλες και ισχυρά κατευθυντικές εκπομπές.

Στην περίπτωση των οπτικών ινών υπάρχει αφθονία πρώτης ύλης. Το γυαλί είναι ανεξάντλητο και βρίσκεται παντού αντίθετα με το χαλκό και τα άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στα μεταλλικά καλώδια. Λόγω της πολύ μικρής εξασθένησης που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, τα σήματα καλύπτουν πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις ενώ επιτρέπουν και υψηλούς ρυθμούς μεταβίβασης, κατά πολύ υψηλότερους από των ομοαξονικών καλωδίων, αφού παρέχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Πράγματι, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας οπτικής ίνας ανέρχεται περίπου στα 25 THz (Σχήμα 2.5). Θεωρώντας μια συντηρητική απόδοση διαμόρφωσης της τάξης του 2.5 Hz/bit, η χωρητικότητα της ίνας αντιστοιχεί σε 10.000 Gbps, που σημαίνει ότι μπορεί για παράδειγμα να υποστηρίξει 10.000 ασυμπιεστα κανάλια ψηφιακής τηλεοράσεως υψηλής ευκρίνειας (HDTV) ή 1000 κανάλια STM-64. Η χωρητικότητα αυτή είναι ένα μέγιστο θεωρητικό όριο και στην πράξη περιορίζεται από το πλήθος των καναλιών που μεταδίδονται στην οπτική ίνα και από τις απαραίτητες αποστάσεις που πρέπει να διατηρούνται μεταξύ των καναλιών, τόσο στα συστήματα με διαίρεση μήκους κύματος όσο και στα συστήματα διαίρεσης χρόνου. Τέλος, στις γραμμές μεγάλου μήκους, τίθενται περιορισμοί από τους ενισχυτές που χρησιμοποιούνται κατά μήκος της γραμμής. Για παράδειγμα, οι οπτικοί ενισχυτές ίνας ερβίου (Er) έχουν ένα σχετικά στενό εύρος ζώνης, της τάξης των 35 nm και συνεπώς η μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα περιορίζεται στα 5.000 GHz, δηλαδή στα 2.000 Gbps.

Οι οπτικές ίνες έναντι των άλλων μέσων μετάδοσης

Μέσο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Twisted Pair Cable	φτηνό κατανοητό και οικείο εύκολα επεκτάσιμο	ευαίσθητο σε θόρυβο μικρές αποστάσεις περιορισμένο εύρος ζώνης όχι ασφαλές
Coaxial Cable	μεγάλο εύρος ζώνης μεγάλες αποστάσεις απόρροη σε παρεμβολές	μεγάλες φυσικές διαστάσεις όχι ασφαλές
Fiber Optic Cable	πολύ μεγάλο εύρος ζώνης απόρροη σε παρεμβολές μεγάλες αποστάσεις υψηλή ασφάλεια μικρό μέγεθος	δύσκολες αλλαγές και προσθήκες συγκριτικά ακριβό

Με τις οπτικές ίνες, σε αντίθεση με τη μετάδοση μέσω χαλκού ή μέσω ραδιοκυμάτων, έχουμε την δυνατότητα να πετύχουμε μικρούς ρυθμούς σφαλμάτων. Τυπικές τιμές του μέσου ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate - BER) για μετάδοση μέσω οπτικής ίνας είναι της τάξης του 10^{-9} , την στιγμή που οι αντίστοιχοι ρυθμοί για χάλκινο μέσο είναι της τάξης του 10^{-5} . Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι μικροί ρυθμοί σφαλμάτων στις οπτικές ίνες επιτυγχάνονται δίχως να απαιτείται η χρήση πολύπλοκων μεθόδων κωδικοποίησης ή διαμόρφωσης. Με τα οπτικά δίκτυα είναι συνήθως εφικτό να χρησιμοποιήσουμε μια απλή κωδικοποίηση γραμμής (line coding) τύπου NRZ (Non Return to Zero) και να παρέχουμε την κατάλληλη οπτική ενίσχυση εκεί που χρειάζεται. Αυτή η απλότητα στην μετάδοση απορρέει από δύο λόγους. Πρώτον, από το πολύ μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά κανάλι και δεύτερον, από το γεγονός ότι τα φωτόνια, σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια, δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και κατά συνέπεια αποφεύγονται φαινόμενα όπως ο κρουστικός θόρυβος. Η κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων μπορεί να παραληφθεί, αφού ο επιθυμητός ρυθμός σφαλμάτων μπορεί να επιτευχθεί ευκολότερα μέσω κατάλληλης οπτικής ενίσχυσης. Επίσης, εξαιτίας του μεγάλου διαθέσιμου εύρους ζώνης δεν είναι απαραίτητη ούτε η χρήση αλγορίθμων συμπίεσης για τη μείωση του μεγέθους των μεταφερόμενων δεδομένων. Επιπλέον στη μετάδοση με οπτικές ίνες δεν απαιτούνται απαραίτητα αλγόριθμοι κωδικοποίησης, αφού είναι πολύ δύσκολο να γίνει υποκλοπή ενός σήματος σε μία οπτική ίνα και συνεπώς παρέχουν πολύ υψηλό βαθμό ασφάλειας.

Είναι λοιπόν βέβαιο ότι τα οπτικά συστήματα σύντομα θα έχουν τον πρώτο λόγο στις τηλεπικοινωνίες, όχι μόνο στις ζεύξεις σημείου προς σημείο αλλά και στα δίκτυα μεγάλης χωρητικότητας όπου απαιτείται διακίνηση όλου και μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας.

6.5.3 Τεχνικές μετάδοσης και λήψης οπτικού σήματος

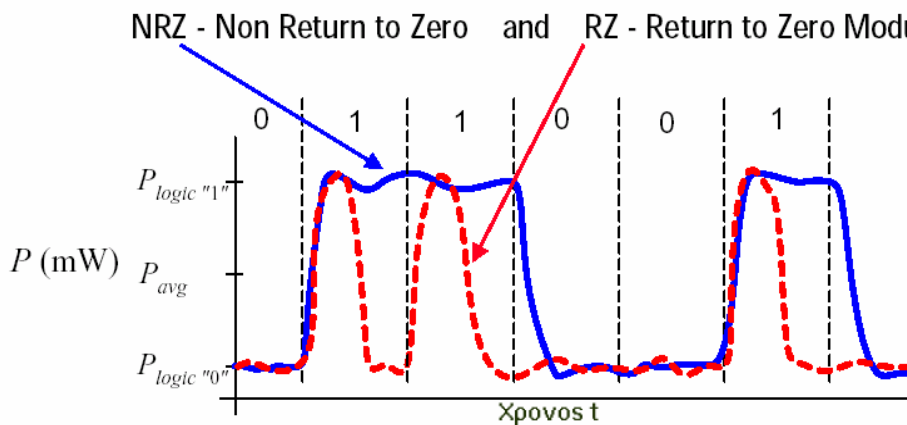
Οι μέθοδοι μετάδοσης και λήψης στα οπτικά συστήματα, δεν είναι παρά επέκταση στις οπτικές συχνότητες των αντίστοιχων μεθόδων, που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά συστήματα ραδιοσυχνοτήτων. Με τους όρους μετάδοση και λήψη εννοούμε τις μεθόδους διαμόρφωσης και φώρασης και τις μεθόδους πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα.

6.5.3.1 Σχήματα διαμόρφωσης

Οι δίοδοι laser μας παρέχουν τη δυνατότητα διαμόρφωσης οποιουδήποτε χαρακτηριστικού του παραγόμενου φωτός, δηλαδή πλάτους, φάσης ή συχνότητας. Στην πράξη το χαρακτηριστικό μέγεθος των laser που συνήθως διαμορφώνεται είναι το πλάτος της ισχύος εξόδου. Ειδικά για ψηφιακά συστήματα, η διαμόρφωση πλάτους (AM) ονομάζεται Amplitude Shift Keying (ASK) ή όπως είναι πιο γνωστή για τα laser On-Off Keying (OOK). Ωστόσο είναι δυνατόν αντί να διαμορφωθεί η οπτική φέρουσα απευθείας, να διαμορφωθεί πρώτα μια υποφέρουσα μικροκυματική συχνότητα, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της οπτικής φέρουσας.

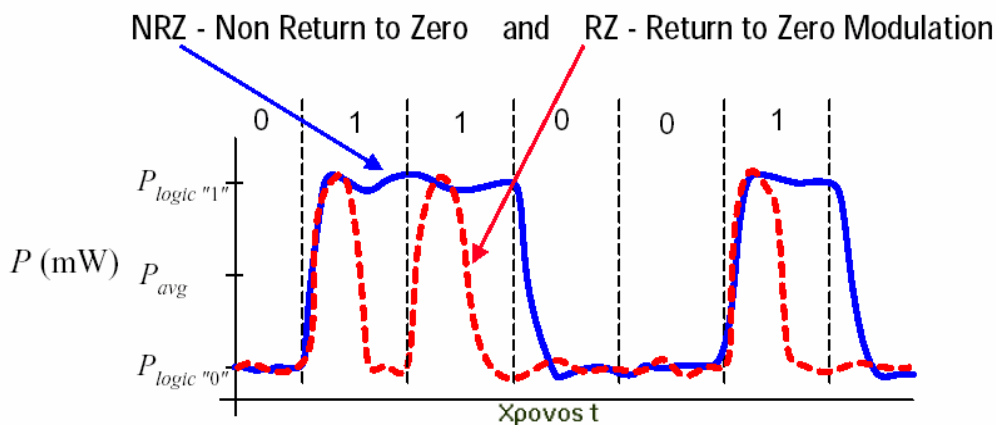
6.5.3.2 Ψηφιακό σχήμα διαμόρφωσης OOK (On Off Keying)

Ο πιο απλός τρόπος για τη μετάδοση δυαδικών ψηφιακών δεδομένων είναι να οδηγούμε με αυτά την φωτοπηγή σε κατάσταση “εντός” (On) ή “εκτός” (Off), να την αναβοσβήνουμε δηλαδή στο ρυθμό της πληροφορίας. Στη τεχνική **OOK** (On/Of Keying) οι επιδόσεις του επικοινωνιακού συστήματος χαρακτηρίζονται από το ρυθμό εσφαλμένων bit BER αντί του λόγου σήματος προς θόρυβο S/N που χρησιμοποιείται στο αναλογικό. Έτσι μια τιμή BER = 10^{-9} (ένα εσφαλμένο bit σε ένα εκατομμύριο αποσταλμένα) είναι μια τυπική τιμή στα σύγχρονα οπτικά ψηφιακά συστήματα.



Σχήμα 6.4.3 Διαμόρφωση OOK και μορφή ψηφιακών δεδομένων

Στην διαμόρφωση OOK χρησιμοποιούνται για το ψηφιακό σήμα διάφορες μορφές. Οι πιο συνηθισμένες είναι η μορφή με μη επιστροφή στο μηδέν (Non Return to Zero - NRZ) και η μορφή με επιστροφή στο μηδέν (Return to Zero - RZ).



Σχήμα 6.). Στην πρώτη περίπτωση ο παλμός για το bit 1 χρησιμοποιεί ολόκληρο το χρόνο εκπομπής του bit (bit interval) χωρίς εκπομπή παλμού για το bit 0. Στη δεύτερη περίπτωση ο παλμός για το bit 1 χρησιμοποιεί το μισό χρόνο εκπομπής του bit χωρίς εκπομπή παλμού για το bit 0. Το πλεονέκτημα του σχήματος NRZ είναι ότι χρησιμοποιεί μικρότερο εύρος ζώνης από το σχήμα RZ και για αυτό προτιμάται στις υψηλές ζεύξεις. Το σπουδαιότερο μειονέκτημα του NRZ είναι ότι σε περίπτωση μεγάλων σειρών από bit 1 ή 0 με δεδομένη την απουσία εναλλαγών ο δέκτης είναι δύσκολο να ανακτήσει το σήμα χρονισμού (bit clock).

Στην ιδανική περίπτωση η οπτική ισχύς P_0 που αποστέλλεται για τη λογική κατάσταση 0 θα είναι μηδενική. Στην πράξη όμως αυτό δεν είναι εφικτό και αποστέλλεται ισχύς που

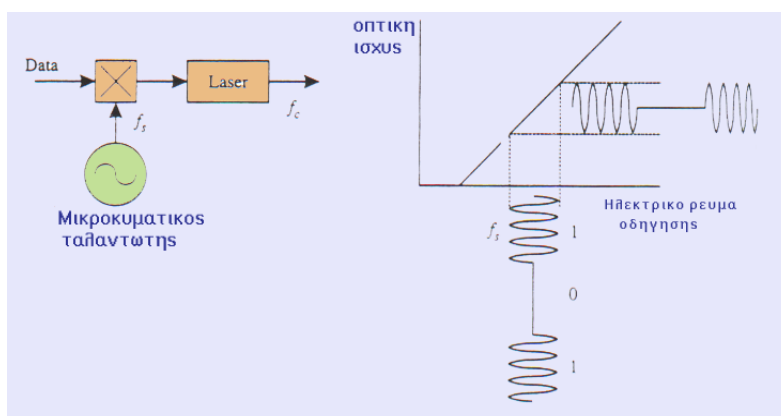
είναι αρκετά μικρότερη από την ισχύ P_1 που αντιστοιχεί στη λογική κατάσταση 1. Ορίζεται δε μια παράμετρος που ονομάζεται λόγος σβέσης (extinction ratio) r_{ex} :

$$r_{ex} = \frac{P_0}{P_1} \quad (6.1)$$

Ο λόγος σβέσης επηρεάζει σημαντικά όπως θα δούμε τις επιδόσεις ενός οπτικού συστήματος, αφού απλά καθορίζει την ευκολία με την οποία ο δέκτης μπορεί να διακρίνει το λογικό 0 από το λογικό 1.

6.5.3.3 Διαμόρφωση υποφέρουσας συχνότητας (Subcarrier modulation SCM)

Στα οπτικά συστήματα είναι δυνατόν να επιτύχουμε όλες σχεδόν τις μορφές της αναλογικής (AM, FM, PM) και της ψηφιακής διαμόρφωσης (PCM, FSK, PDM κλπ). χρησιμοποιώντας ένα υβριδικό σχήμα διαμόρφωσης με υποφέρουσα συχνότητα RF. Η μικροκυματική αυτή συχνότητα (10MHz-10GHz) διαμορφώνεται αναλογικά ή ψηφιακά με κάποια από τις συμβατικές τεχνικές AM, FM, ASK, FSK ή PSK. Στη συνέχεια με τη διαμορφωμένη υποφέρουσα, οδηγούμε τη φωτοπηγή, διαμορφώνοντας έτσι την εκπεμπόμενη οπτική ισχύ δηλαδή την οπτική φέρουσα. Στο Σχήμα 5.4.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται παραστατικά η αρχή διαμόρφωσης IM.



Σχήμα 6.4.4 Αρχή της διαμόρφωσης κατά ένταση IM

Αυτό το σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιείται για την εφαρμογή τεχνικών πολυπλεξίας. Πράγματι συνδυάζοντας πολλαπλές μικροκυματικές φέρουσες με διαφορετικές συχνότητες διαμορφώνεται η οπτική φέρουσα με το πολυπλεγμένο σύνθετο σήμα. Η φώραση στο δέκτη γίνεται όπως και στην απλή περίπτωση ΟΟΚ ενώ τα επόμενα βήματα επεξεργασίας γίνονται ηλεκτρονικά.

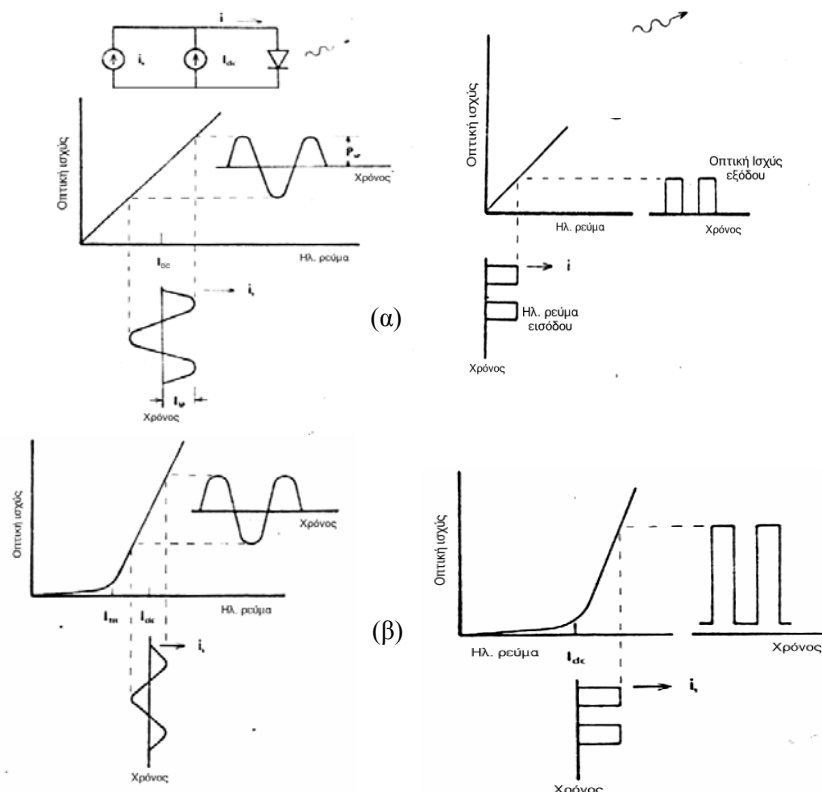
6.5.4 Μέθοδοι διαμόρφωσης

Ανάλογα με τον τρόπο που μπορεί επιτευχθεί η διαδικασία της διαμόρφωσης, στα σύγχρονα οπτικά συστήματα, διακρίνουμε δυο μεγάλες κατηγορίες: την *Άμεση διαμόρφωση* όπου η μεταβολή της ισχύος εξόδου πραγματοποιείται με μεταβολή του ρεύματος έγχυσης και την *Έμμεση ή εξωτερική διαμόρφωση*, όπου το laser λειτουργεί συνεχώς (continuous wave) και ο έλεγχος της ισχύος εξόδου γίνεται με διέλευση του φωτός από εξωτερικό διαμορφωτή.

Σήμερα η πλειοψηφία των οπτικών συστημάτων χρησιμοποιεί την άμεση διαμόρφωση και στη συνέχεια θα αναλύσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας.

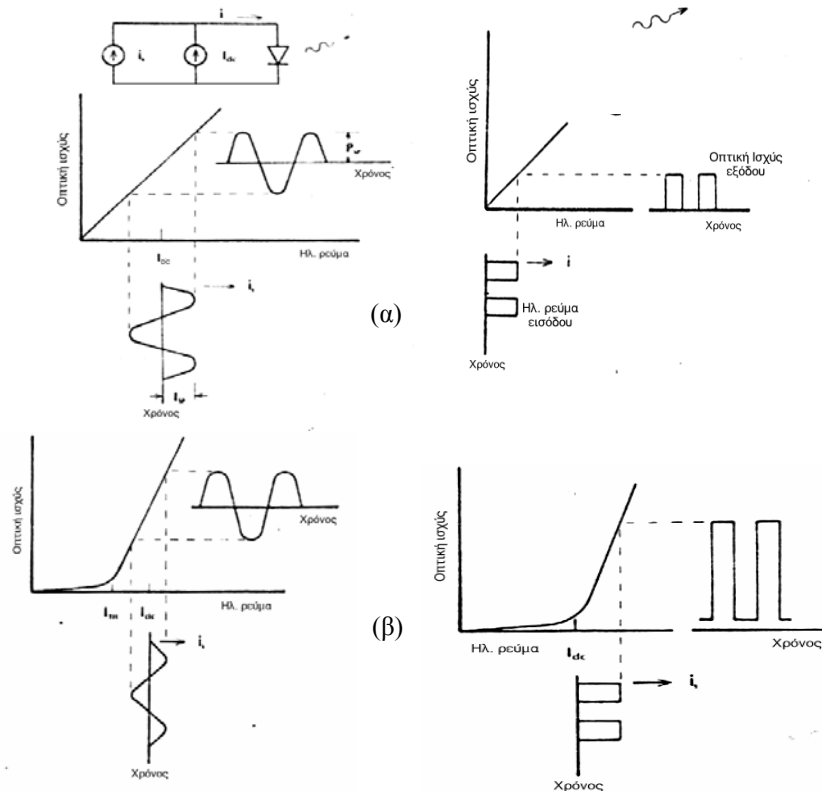
6.5.4.1 Άμεση διαμόρφωση

Με δεδομένο ότι στα οπτικά συστήματα οι χρησιμοποιούμενες φωτοπηγές είναι είτε δίοδοι LED είτε δίοδοι LASER, με την άμεση διαμόρφωση παρεμβαίνουμε στη τροφοδοσία τους (ρεύμα ή τάση). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταβάλλεται στο ρυθμό της πληροφορίας η ένταση (δηλαδή η οπτική ισχύς) της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο τα οπτικά συστήματα άμεσης διαμόρφωσης είναι γνωστά και σαν συστήματα *διαμόρφωσης κατά ένταση IM* (Intensity Modulation).



Σχήμα 6.2 Αναλογική και ψηφιακή IM διαμόρφωση δίοδων α)LED και β)Laser

ΣΤΟ



Σχήμα 6.2, παρουσιάζεται η χρήση των φωτοπηγών LED και LD στα συστήματα IM. Στα αναλογικά συστήματα IM όταν χρησιμοποιείται LED απαιτείται η πόλωση της με συνεχές ρεύμα (bias current) κατά την ορθή φορά αφού διαφορετικά ένα αρνητικό γύρισμα του σήματος θα την πόλωνε ανάστροφα και θα την έθετε εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δίοδος Laser, η προσθήκη ενός συνεχούς ρεύματος πόλωσης είναι αναγκαία για να εξασφαλίζεται η λειτουργία της φωτοπηγής αρκετά πάνω από την τιμή ρεύματος κατωφλίου I_{th} . Αντίθετα, στα αντίστοιχα ψηφιακά το ρεύμα πόλωσης αρκεί να ισούται με το ρεύμα κατωφλίου, ενώ όταν χρησιμοποιείται LED αυτό δεν είναι απαραίτητο, αφού αρκεί η φωτοπηγή να εκπέμπει (κατάσταση “1”) ή να μην εκπέμπει (κατάσταση “0”).

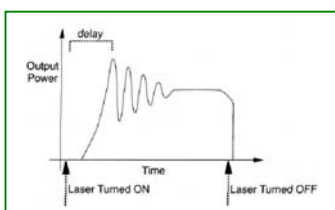
Κατά την άμεση διαμόρφωση ενός laser εμφανίζονται μία σειρά φαινομένων που είναι ανεπιθύμητα και περιορίζουν τις εφαρμογές της σε συστήματα με μέγιστο ρυθμό σηματοδότησης το πολύ 2.5 Gbps.

- **Καθυστέρηση έναυσης**

Με την εφαρμογή ενός ορθογώνιου παλμού ρεύματος, στην ιδανική περίπτωση θα επιθυμούσαμε η ισχύς εξόδου του laser να ανταποκριθεί κατά τον ίδιο τρόπο. Στην πραγματικότητα όμως η εξαναγκασμένη εκπομπή θα καθυστερήσει για ένα μικρό χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να καθυστερήσει η εκπομπή φωτεινής ισχύος. Αυτή η χρονική καθυστέρηση ονομάζεται καθυστέρηση έναυσης (turn-on delay) και για τα ημιαγωγικά laser είναι της τάξης του nsec.

- **Ταλαντώσεις αποκατάστασης**

Η έναυση ενός laser συνοδεύεται από τη δημιουργία ταλαντώσεων της οπτικής ισχύος, που φθίνουν μέχρι την αποκατάσταση της μέγιστης ισχύος εξόδου. Οι ταλαντώσεις αυτές ονομάζονται ταλαντώσεις αποκατάστασης (relaxation oscillations) και έχουν συχνότητες της τάξης των 10 GHz. Η συχνότητα



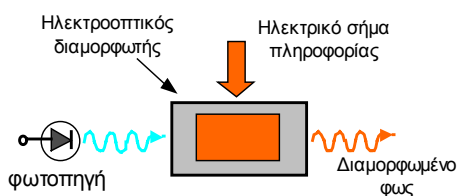
των ταλαντώσεων αποκατάστασης αποτελεί κατά προσέγγιση τη μέγιστη συχνότητα διαμόρφωσης των laser. Πρέπει να επισημανθεί ότι η απόκριση των laser δεν είναι σταθερή ανεξάρτητα από τη συχνότητα διαμόρφωσης αλλά μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνεται.

- **Τρύλλισμα (Chirping)**

Η διαμόρφωση του ρεύματος έγχυσης ενός laser προκαλεί διαμόρφωση της ισχύος εξόδου αλλά ταυτόχρονα μεταβάλλει και τη συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός. Ως αποτέλεσμα, διευρύνεται το εύρος γραμμής (linewidth) του laser, δηλαδή το εύρος της συχνότητας εκπομπής του, συναρτήσει του χρόνου. Το τρύλλισμα αποτελεί περιοριστικό παράγοντα στους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (πάνω από 10 Gbps).

6.5.4.2 Εξωτερική διαμόρφωση

Εναλλακτικά των τεχνικών διαμόρφωσης κατά φωτεινή ένταση με μεταβολή του ρεύματος οδήγησης της φωτοπηγής, η πληροφορία μπορεί να αποτυπωθεί στη φέρουσα φωτεινή δέσμη εξωτερικά. Η επέμβαση γίνεται πλέον στα κυματικά χαρακτηριστικά της φωτεινής δέσμης με τη χρήση εξωτερικών διαμορφωτών, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο ηλεκτροοπτικό φαινόμενο. Με αυτόν τον τύπο των



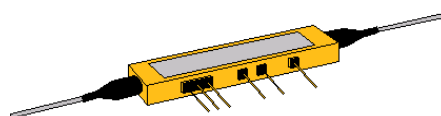
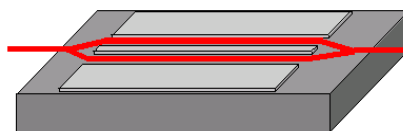
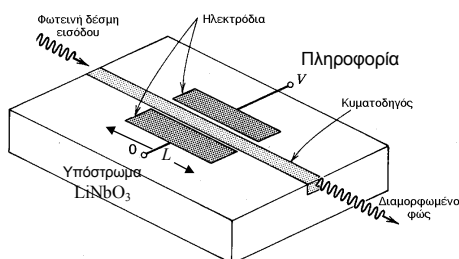
Σχήμα 6.21 Αρχή εξωτερικής διαμόρφωσης

διαμορφωτών μπορούμε να επιτύχουμε όλα σχεδόν τα σχήματα αναλογικής και ψηφιακής διαμόρφωσης, αλλά και να διαμορφώσουμε την ένταση και την πόλωση της φωτεινής δέσμης.

Οι εξωτερικοί διαμορφωτές Νιοβικού Λιθίου βρίσκονται πλέον στο εμπόριο ενώ λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών τους όσον αφορά την ταχύτητα απόκρισης και το εύρος ζώνης ($>40\text{GHz}$), φαίνεται να συμβάλλουν στην επικράτηση της εξωτερικής διαμόρφωσης στα μελλοντικά οπτικά συστήματα επικοινωνιών. Η υπόθεση αυτή ισχυροποιείται από το γεγονός ότι οι διατάξεις αυτές παρέχουν την προοπτική κατασκευής τους σύμφωνα με τις μεθόδους των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

- **Ηλεκτροοπτικοί διαμορφωτές Mach Zehnder (MZ)**

Η λειτουργία των διαμορφωτών αυτού του τύπου, βασίζεται στο ηλεκτροοπτικό φαινόμενο κατά το οποίο ο δείκτης διάθλασης μερικών υλικών αλλάζει με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.



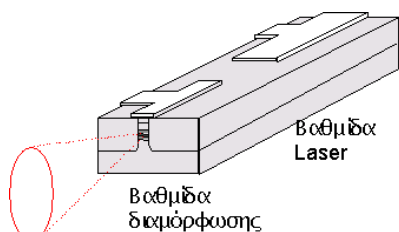
Σχήμα 6.3 Ολοκληρωμένος ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής φάσης και ηλεκτροοπτικός συμβολομετρικός διαμορφωτής Mach Zehnder (MZ)

Η απλούστερη διάταξη, που ταυτόχρονα όμως είναι και η βάση των υπολοίπων, είναι ο ηλεκτροπτικός διαμορφωτής φάσης που φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στα ηλεκτρόδια από το RF σήμα διαμόρφωσης, ο δείκτης διάθλασης του υλικού μεταβάλλεται στο ρυθμό της πληροφορίας. Έτσι προκύπτει μεταβολή της φάσης της οπτικής δέσμης, που διαδίδεται στον κυματοδηγό.

Ένας ηλεκτροοπτικός διαμορφωτής αποτελείται από δυο οπτικούς κυματοδηγούς αποτυπωμένους σε κατάλληλο υλικό (LiNbO_3 ή ημιαγωγό της ομάδας III-V δηλαδή In, Ga, As, P), πλαισιωμένους με κατάλληλη δομή ηλεκτροδίων ελέγχου.

Με την κατάλληλη διευθέτηση κυματοδηγών (Y splitter) και ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται διαμόρφωση φάσης, και τελικά διαμόρφωση πλάτους (λόγω συμβολής) του διαδιδόμενου οπτικού σήματος. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζουν μικρή γραμμικότητα και δεν είναι κατάλληλες για αναλογική μετάδοση. Μειονέκτημα ακόμη αποτελούν οι μεγάλες απώλειες εισόδου ($\sim 5\text{dB}$) και οι υψηλές τάσεις λειτουργίας ($>10\text{V}$)

- **Διαμορφωτές ηλεκτροαπορρόφησης (Electro Absorption EA)**



Σχήμα 6.4 διαμορφωτής EA

Οι διατάξεις αυτές πρόσφατα εισήχθηκαν στην αγορά. Η βαθμίδα του ημιαγωγικού laser παράγει οπτική ακτινοβολία με σταθερό τρόπο (CW) και ακολουθείται από τμήμα επίσης ημιαγωγικού υλικού του οποίου η *απορρόφηση* στην εκπεμπόμενη ακτινοβολία αλλάζει σύμφωνα με το ρυθμό του σήματος διαμόρφωσης. Εκτός από το ότι είναι πολύ μικροί σε μέγεθος, οι διαμορφωτές

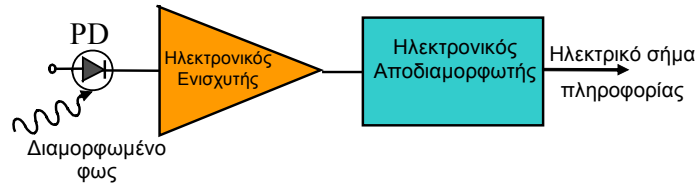
EA δεν χρειάζονται υψηλές τάσεις οδήγησης. Δημιουργούν μια μικρή διαπλάτυνση του σήματος του laser αλλά λόγω του σχετικά μικρού τους κόστους κερδίζουν συνέχεια έδαφος στις διάφορες εφαρμογές.

6.5.5 Τεχνικές φώρασης

Με τον όρο φώραση ορίζουμε την αντίστροφη διαδικασία της διαμόρφωσης, και γενικότερα την ανάκτηση της πληροφορίας στο δέκτη. Στα οπτικά συστήματα η φώραση περιλαμβάνει το στάδιο λήψης της οπτικής φέρουσας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρικό σήμα. Ακολουθεί ενίσχυση (ή αναγέννηση των παλμών) και φιλτράρισμα του ηλεκτρικού σήματος και ανάκτηση της πληροφορίας με χρήση συμβατικών μεθόδων αποδιαμόρφωσης. Για να γίνει αυτό θα πρέπει το ηλεκτρικό σήμα εξόδου να έχει επαρκή λόγο σήματος προς θόρυβο ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική τιμή για το ρυθμό σφαλμάτων bit BER (τυπικά $\text{BER} > 10^{-9}$). Η ελάχιστη οπτική ισχύς που απαιτείται στο δέκτη για να επιτύχουμε αυτό το λόγο S/N ορίζεται σαν *ευαισθησία* του δέκτη και εκφράζεται σε dBm. Στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται δυο τεχνικές η **άμεση** και η **σύμφωνη** φώραση.

6.5.5.1 Άμεση φώραση

Στους δέκτες άμεσης φώρασης η στοιχειώδης μορφή των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 6.5η μεταδιδόμενη μέσω της οπτικής ίνας δέσμη προσπίπτει κατευθείαν στο φωτοφωρατή που είναι μια φωτοδίοδος PIN ή APD. Η προσπίπτουσα φωτεινή

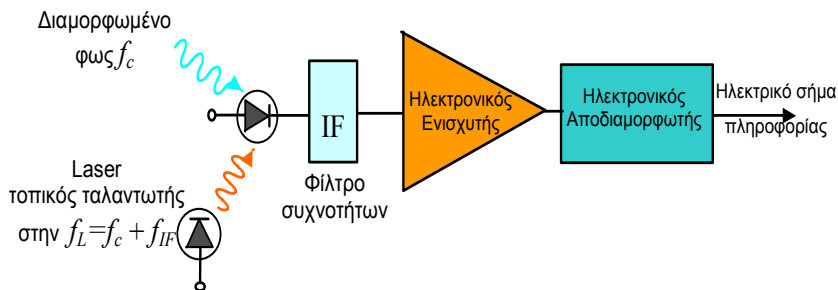


Σχήμα 6.5 Άμεση φώραση με PIN ή APD. Στη μετάδοση αναλογικού σήματος μετά τον ενισχυτή ακολουθεί ηλεκτρονικός αποδιαμορφωτής, ενώ για ψηφιακό διάταξη κατωφλίου όπου αποφασίζεται αν έγινε λήψη 0 ή 1.

ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα που περιέχει την πληροφορία. Ακολουθεί ενίσχυση του φωτορεύματος και η ανάκτηση της πληροφορίας με συμβατικούς αποδιαμόρφωση ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης που έχει προηγηθεί. Η σύμφωνη φώραση είναι πλήρως συμβατή με όλα τα σχήματα διαμόρφωσης IM και λόγω της απλότητας της χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των οπτικών συστημάτων.

6.5.5.2 Σύμφωνη Φώραση

Η αρχή λειτουργίας των συμφώνων δεκτών φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 6.6 και είναι παρόμοια με εκείνη των υπερετεροδυνων ραδιοδεκτών.



Σχήμα 6.6 Σύμφωνη φώραση με PIN ή APD (ετεροδυνος δέκτης). Στην περίπτωση που $f_{IF} = 0$ (ομόδυνος δέκτης) δεν χρειάζεται η βαθμίδα του ηλεκτρικού αποδιαμορφωτή.

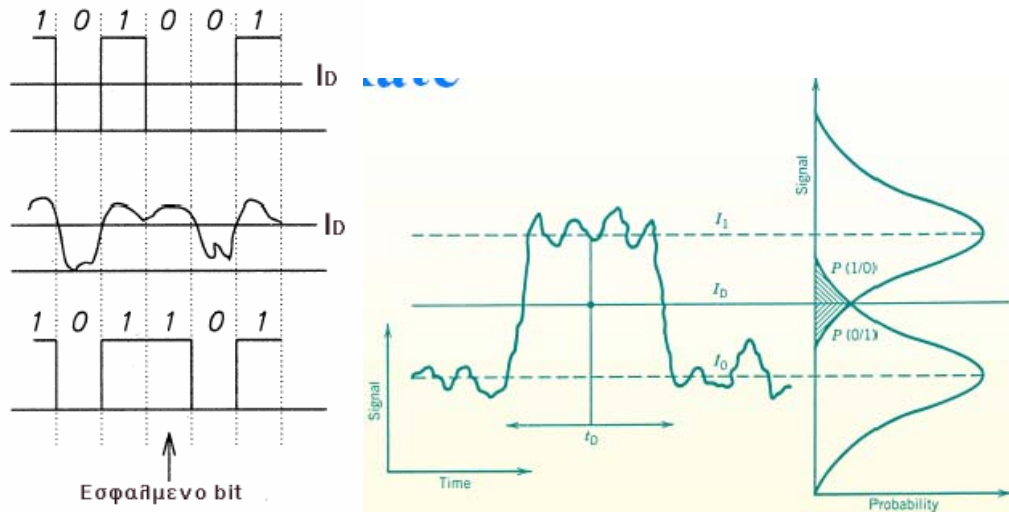
Μια κατά το δυνατόν μονοχρωματική φωτοπηγή αποτελεί τον τοπικό ταλαντωτή. Το φως της με συχνότητα f_L προσπίπτει στο φωτοφωρατή μαζί με την ασθενέστερη οπτική φέρουσα, συχνότητας f_{sc} που μεταφέρει την πληροφορία. Σε αυτή την περίπτωση ο φωτοφωρατής συμπεριφέρεται σαν μίκτης και λόγω της μη γραμμικότητας του παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα εξόδου με συχνότητα f_{IF} ίση με τη διαφορά των συχνοτήτων f_L και f_{sc} (ετεροδύνωση).

Ο σύμφωνος δεκτών που παρουσιάστηκε απαιτεί μικρότερο λόγο S/N για ένα δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων BER από ότι ο δέκτης άμεση φώρασης. Εν τούτοις μόνο ο τελευταίος τύπος έχει αναπτυχθεί συστηματικά στα πρακτικά χρησιμοποιούμενα οπτικά

συστήματα λόγω της απλότητάς του. Με την εμφάνιση μάλιστα των οπτικών ενισχυτών φαίνεται ότι θα κυριαρχήσει και στο μέλλον, αφού πλέον οι επιδόσεις του γίνονται το ίδιο καλές με αυτές των συμφώνων συστημάτων.

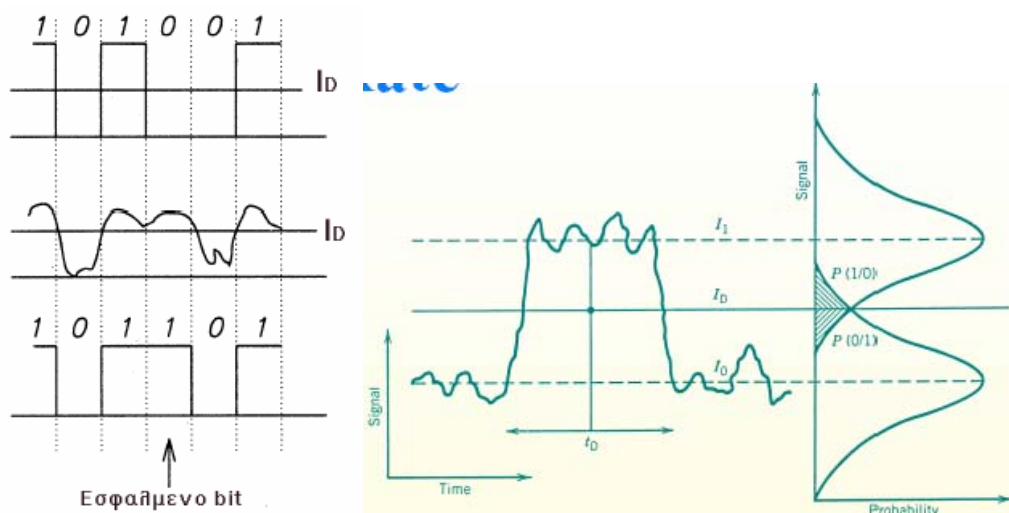
6.5.6 Ευαισθησία ψηφιακού δέκτη και BER

Ο ψηφιακός οπτικός δέκτης μετατρέπει το ασθενές οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και αποφασίζει αν η ηλεκτρική έξοδος αντιστοιχεί στο λογικό bit 0 ή 1 χρησιμοποιώντας ένα διευκρινιστή. Αυτό σημαίνει ότι η ενθόρυβη έξοδος I του φωτοφωατη – ενισχυτή συγκρίνεται με μια τιμή κατωφλίου I_D η οποία και καθορίζει το ρυθμό των εσφαλμένων bit. Η διαδικασία αυτή παριστάνεται απλά στο



Σχήμα 6.7. Σε μια απλή προσέγγιση θεωρούμε ότι η έξοδος του φωτοδέκτη είναι τυχαία μεταβλητή ηλεκτρικού ρεύματος, που ακολουθεί Gaussian κατανομή.

Έστω η μέση του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κατάσταση 1 είναι I_1 με διασπορά σ_1 και η μέση του ρεύματος που αντιστοιχεί στην κατάσταση 0 είναι I_0 με διασπορά σ_0 .



Σχήμα 6.7 α) Λήψη σήματος χωρίς θόρυβο (άνω), με θόρυβο(μέσον) και ανάκτηση σήματος με σφάλματα. β) Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για τις λογικές καταστάσεις 0 και 1

Οι τυπικές αποκλίσεις σ_i^2 εξαρτώνται από τη μέση τετραγωνική τιμή του ρεύματος που αντιστοιχεί στο θόρυβο (βολής και θερμικό) και θα είναι:

$$\sigma_i^2 = \sqrt{\langle i_N^2 \rangle_{sh} + \langle i_N^2 \rangle_{th}} \quad (6.2\alpha)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος που αντιστοιχεί στο θόρυβο είναι προφανώς μηδέν αλλά η πιθανότητα να πάρει τιμές στο διάστημα i_N, i_N+di_N δίνεται από τη σχέση:

$$p(i_N)di_N = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{i_N^2}{2\sigma_i^2}\right)di_N \quad (6.2\beta)$$

Η ολική πιθανότητα σφάλματος P_e θα είναι ίση με το άθροισμα της πιθανότητας να πάρουμε λόγω θορύβου 0 ενώ έχει σταλεί 1, συν την πιθανότητα να πάρουμε 1 ενώ έχει σταλεί 0. Δηλαδή:

$$P_e = P(0|1)P(1) + P(1|0)P(0) \quad (6.2\gamma)$$

Λόγω της κωδικοποίησης καναλιού που έχει προηγηθεί ισχύει συνήθως $P(1) = P(0) = \frac{1}{2}$. Οι υπό συνθήκη πιθανότητες $P(0|1)$ και $P(1|0)$ υπολογίζονται και με τη βοήθεια του σχήματος (5.8β) δίνονται από τις σχέσεις:

$$P(0|1) = \frac{1}{\sigma_1\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_D} \exp\left(-\frac{(I-I_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) \quad (6.3\alpha)$$

$$P(1|0) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \int_{I_D}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I-I_0)^2}{2\sigma_0^2}\right)dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \quad (6.3\beta)$$

όπου $\operatorname{erfc}(x)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2)dy \quad (6.3\gamma)$$

Η συνάρτηση αυτή είναι πινακοποιημένη, δηλαδή οι τιμές του ολοκληρώματος έχουν υπολογιστεί για μια πληθώρα τιμών του x .

Τελικά η πιθανότητα σφάλματος ανά bit ή ο ρυθμός σφάλματος δίνεται με τη βοήθεια των σχέσεων (5.2) και (5.3) από την σχέση:

$$P_e = BER = \frac{1}{4} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}}\right) \right] \quad (6.4\alpha)$$

Είναι φανερό πλέον ότι η πιθανότητα σφάλματος εξαρτάται από την επιλογή της τιμής κατωφλίου ενώ αποδεικνύεται ότι η τιμή της ελαχιστοποιείται όταν:

$$\frac{I_1-I_D}{\sigma_1\sqrt{2}} = \frac{I_D-I_0}{\sigma_0\sqrt{2}} \equiv Q \quad (6.4\beta)$$

Με απλές αλγεβρικές πράξεις προκύπτει ότι η τιμή κατωφλίου που ελαχιστοποιεί το BER είναι:

$$I_D = \frac{\sigma_0 I_1 - \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (6.4\gamma)$$

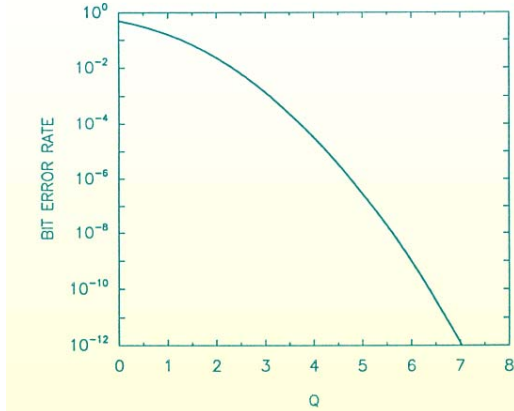
Και η παράμετρος Q :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (6.4\delta)$$

Ενώ η τελική έκφραση για το ρυθμό σφάλματος δίνεται από τη σχέση:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (6.5)$$

Η παράμετρος Q είναι ουσιαστικά και άμεσα συσχετισμένη με το λόγο σήμα προς θόρυβο στο δέκτη SNR. Συνήθως σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα για αξιόπιστη μετάδοση απαιτείται μια συγκεκριμένη τιμή BER. Με δεδομένη αυτή την τιμή, υπολογίζεται η παράμετρος Q και στη συνέχεια ο λόγος SNR αφού ληφθούν υπόψη οι τύποι θορύβου.



Σχήμα 6.8 Γραφική αναπαράσταση BER - Q

Συνηθισμένες τιμές για το BER είναι 10^{-6} έως 10^{-8} στα συμβατικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα και 10^{-9} έως και 10^{-12} στα οπτικά συστήματα. Στο διπλανό σχήμα δίνεται γραφικά η σχέση BER και της παραμέτρου Q και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια πρώτη προσέγγιση για την εκτίμηση του Q με δεδομένο BER και αντίστροφα.

Από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) είναι φανερό ότι το BER άρα και οι επιδόσεις ενός οπτικού συστήματος εξαρτώνται από την επιλογή του

I_D αλλά και από το λόγο σβέσης. r_{ex} (σχέση 5.1). Σε ένα οπτικό σύστημα με πεπερασμένη τιμή του r_{ex} θα είναι $I_1=RP_1$ και $I_0=RP_0$ όπου R η αποκρισιμότητα του φωτοφωρατή και $P_{1,2}$ η λαμβανόμενη οπτική ισχύς που αντιστοιχεί στις καταστάσεις 1 και 0 αντίστοιχα. Η μέση ισχύς ανά bit θα είναι $\langle P_{rec} \rangle = \frac{P_1 + P_0}{2}$ ενώ ο θερμικός θόρυβος

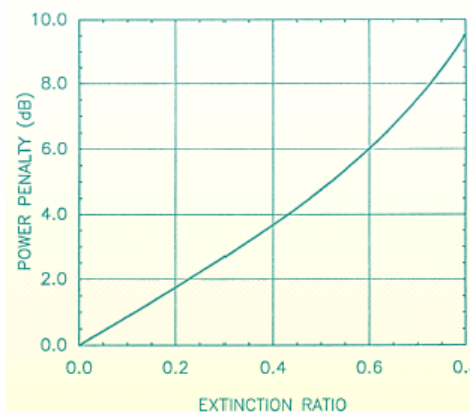
υπερισχύει σε αυτή την περίπτωση, οπότε: $\sigma_1 = \sigma_0 = \sqrt{\langle i_{th}^2 \rangle} = \sigma_T$. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η σχέση (5.4δ) προκύπτει η μέση ισχύς ανά bit για δεδομένο r_{ex} ώστε να έχουμε δεδομένο Q ή ισοδύναμα BER:

$$\langle P_{rec} \rangle = \left(\frac{1 + r_{ex}}{1 - r_{ex}} \right) \frac{\sigma_T Q}{R} \quad (6.6\alpha)$$

Είναι φανερό ότι όσο αυξάνει ο λόγος σβέσης τόσο αυξάνει η απαιτούμενη ισχύς στην είσοδο του φωτοφωρατή για έχουμε το ίδιο Q . Η επιπλέον ισχύς που απαιτείται σε σχέση με την ισχύ για $r_{ex}=0$ (Power penalty) δ_r και συνήθως εκφράζεται σε dB.

$$\delta_r = 10 \log \frac{\langle P_{rec}(r_{ex}) \rangle}{\langle P_{rec}(r_{ex}=0) \rangle} = 10 \log \left(\frac{1 + r_{ex}}{1 - r_{ex}} \right) \quad (6.6\beta)$$

Στο **Error! Reference source not found.** φαίνεται καθαρά αυτή η εξάρτηση. Βλέπουμε λοιπόν ότι για ένα λόγο σβέσης 0.12 η απαιτούμενη ισχύς πρέπει να αυξηθεί κατά 1 dB σε σχέση με την ισχύ που θα χρειαζόταν αν για να στείλουμε το bit 0 κλείναμε τελείως



Σχήμα 6.9 Επιπλέον ισχύς λόγω πεπερασμένου λόγου σβέσης σε ένα οπτικό σύστημα

την οπτική πηγή. Η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται κατά 5 dB περίπου για $r_{ex}=0.5$

Στα παραπάνω θεωρήσαμε ότι ο μόνος θόρυβος που υπερισχύει είναι ο θερμικός. Ωστόσο στην πράξη πρέπει να λάβουμε και η πηγή εκπομπής (Laser) αλλά και οι οπτικοί ενισχυτές που χρησιμοποιούνται στη ζεύξη εισάγουν θόρυβο σε οπτικό επίπεδο. Ο θόρυβος αυτός (Intensity Noise) εμφανίζεται σαν κυμάτωση της οπτικής ισχύος γύρω από την αναμενόμενη τιμή της στο δέκτη.

6.5.7 Μέθοδοι πολυπλεξίας στα οπτικά συστήματα

Οι σημερινές οπτικές ζεύξεις λειτουργούν τυπικά στα 2.5 Gbps και στο φασματικό παράθυρο όπου οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν χαμηλή εξασθένηση, δηλαδή στα 1550 nm. Οι διαχειριστές των δικτύων έχουν σαν στόχο να τετραπλασιάσουν την χωρητικότητα (ρυθμός 10 Gbps) με διπλασιασμό του κόστους. Οι τελευταίες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από την αλματώδη ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών. Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση αυξάνεται κατά 100% κάθε 15 περίπου μήνες ενώ είναι δύσκολο να προβλέψει κανείς που θα οδηγήσουν τα μελλοντικά τεχνολογικά επιτεύγματα. Η εισαγωγή, για παράδειγμα, του κώδικα java στις ιστοσελίδες του διαδικτύου προκάλεσε σημαντική αύξηση του μεγέθους των αρχείων που διακινούνται. Γενικότερα, με την αλματώδη ανάπτυξη των πολυμέσων και των διαδικτυακών εφαρμογών, οι χρήστες επιθυμούν πλέον την χρήση υπηρεσιών οι οποίες έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Το μεγάλο εύρος ζώνης των οπτικών ινών μπορεί να αξιοποιηθεί ακόμη περισσότερο με τη χρήση τεχνικών πολυπλεξίας, δηλαδή με την αποστολή πολλών διαφορετικών σημάτων, στην ίδια ίνα.

Στοχεύοντας, λοιπόν, σε δίκτυα πολύ υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υιοθετώντας ως βάση τις οπτικές ίνες, το ζητούμενο είναι η μέθοδος πολυπλεξίας που θα χρησιμοποιηθεί. Οι τεχνικές πολυπλεξίας των οπτικών επικοινωνιών είναι παρόμοιες με αυτές των συμβατικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και επιτυγχάνονται σε ηλεκτρική μορφή. Έχουν αναπτυχθεί όμως και αποκλειστικές μέθοδοι. Για να αναβαθμίσουμε την χωρητικότητα μιας ζεύξης υπάρχουν οι παρακάτω τεχνικές, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν παράλληλα.

Πολυπλεξία με διαίρεση χώρου (Space Division Multiplexing), η οποία χρησιμοποιεί περισσότερες οπτικές ίνες σε μία ζεύξη.

Πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing), στην οποία το κοινό μέσο μετάδοσης, η οπτική ίνα, χρησιμοποιείται περιοδικά από κάθε σύνδεση που εξυπηρετεί η οπτική ζεύξη.

Πολυπλεξία με διαίρεση μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing), όπου χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός μήκη κύματος σε κάθε οπτική ίνα. Με την τεχνική αυτή δηλαδή είναι δυνατό να πολυπλεχτούν πολλαπλά οπτικά σήματα, το καθένα από τα οποία μεταδίδεται σε διαφορετικό μήκος κύματος και να διαδοθούν ταυτόχρονα μέσω της ίδιας οπτικής ίνας.

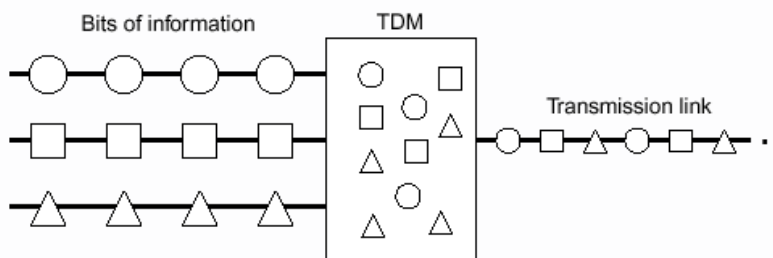
6.5.7.1 Πολυπλεξία διαίρεσης χώρου (Space Division Multiplexing - SDM)

Η πολυπλεξία με διαίρεση χώρου είναι η πιο απλή τεχνική αναβάθμισης μιας ζεύξης. Για να αυξηθεί τη χωρητικότητα μιας ζεύξης αρκεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος αριθμός οπτικών ινών.

Μειονέκτημα της τεχνικής αυτής αποτελεί το γεγονός ότι οι πρόσθετες οπτικές ίνες που απαιτούνται μπορεί να μην είναι διαθέσιμες κατά μήκος της επιθυμητής διαδρομής. Το κόστος τοποθέτησης νέων ινών ποικίλει. Αν για παράδειγμα υπάρχει χώρος στα υπάρχοντα καλώδια οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν με μικρό σχετικά κόστος αν όμως πρέπει να τοποθετηθούν νέα καλώδια το κόστος αυξάνεται σημαντικά ακόμα και στην περίπτωση μικρών αποστάσεων. Ένα δεύτερο μειονέκτημα της πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου είναι ότι για κάθε επιπλέον ίνα που χρησιμοποιείται απαιτείται ένα σύνολο οπτικών ενισχυτών και αναγεννητών που πρέπει να τοποθετηθεί, γεγονός που αυξάνει επίσης το κόστος. Όπως θα δούμε στη συνέχεια οι τεχνικές TDM και WDM επιτρέπουν σε έναν ενισχυτή ή αναγεννητή να εξυπηρετεί αρκετά κανάλια. Έτσι η SDM είναι ανταγωνιστική μόνο όταν οι ίνες είναι ήδη διαθέσιμες και οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές έτσι ώστε να μην απαιτείται η χρήση διατάξεων ενίσχυσης ή αναγέννησης.

6.5.7.2 Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM)

Η Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) αυξάνει τη χωρητικότητα της ζεύξης χωρίζοντας το χρόνο σε χρονοθυρίδες, έτσι ώστε τα bit από κάθε πηγή εισόδου να μεταφέρονται σε μια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα κι επομένως τελικά να αυξάνει ο αριθμός των bit που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10. Δηλαδή κάθε σύνδεση χρησιμοποιεί την οπτική ίνα περιοδικά για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα μια οπτική ίνα να μπορεί να εξυπηρετήσει περισσότερες από μία συνδέσεις.



Σχήμα 6.10 Σχηματική αναπαράσταση Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου

Η σταδιακή εξάπλωση μοντέρνων τεχνολογιών, όπως τα Σύγχρονα Οπτικά Δίκτυα (Synchronous Optical Network - SONET) στις Η.Π.Α. και η Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία (Synchronous Digital Hierarchy - SDH) στην Ευρώπη, αναμένεται να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις και ευελιξία στα ευρυζωνικά δίκτυα. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται σε υψηλής ταχύτητας ηλεκτρο-μεταγωγικά κέντρα, τα οποία συνδέονται με οπτικές ίνες και χρησιμοποιούν τη τεχνική TDM. Τα δίκτυα αυτά αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν δίκτυα δεύτερης γενιάς και χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες σαν μέσο αντικατάστασης του χαλκού, καθώς τόσο η μεταγωγή όσο και η πολυπλεξία στις γραμμές ζεύξης πραγματοποιούνται στο ηλεκτρικό επίπεδο. Έτσι είναι φανερό ότι στα δίκτυα αυτά δεν γίνεται πλήρης αξιοποίηση των μεγάλων δυνατοτήτων που προσφέρει η οπτική τεχνολογία.

Πράγματι, εφόσον με την τρέχουσα τεχνολογία η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας των ψηφιακών κυκλωμάτων περιορίζεται περίπου στα 10 Gb/s (ο περιορισμός αυτός αναφέρεται σαν ηλεκτρονική συμφόρηση – electronic bottleneck), το σήμα TDM μεταξύ διαδοχικών κόμβων θα περιορίζεται και αυτό στα ίδια όρια. Επίσης, εφόσον σε κάθε κόμβο τα οπτικά σήματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά για επεξεργασία και στην συνέχεια ξανά σε οπτικά για επαναμετάδοση, η μέγιστη ταχύτητα μεταγωγής θα υπόκειται και αυτή σε παρόμοιους περιορισμούς.

Τα δύο κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν αυτά τα συστήματα TDM είναι η χρωματική διασπορά και η διασπορά τρόπου πόλωσης (Polarization Mode Dispersion - PMD). Η χρωματική διασπορά δεν αποτελεί μείζον πρόβλημα αν η ζεύξη χρησιμοποιεί ίνες μετατοπισμένης διασποράς (Dispersion-Shifted Fiber - DSF). Με τυπική μονότροπη ίνα το όριο της χρωματικής διασποράς είναι 60Km στα 10 Gbps και περίπου 1000Km στα 2.5 Gbps. Με πρακτικούς πομπούς οι αποστάσεις είναι ακόμα μικρότερες. Πέρα από αυτές τις αποστάσεις το σήμα μπορεί να αναγεννηθεί ηλεκτρονικά ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια μορφή αντιστάθμισης της χρωματικής διασποράς. Το όριο απόστασης λόγω της διασποράς τρόπου πόλωσης PMD στα 10 Gbps είναι 16 φορές μικρότερο από αυτό στα 2.5 Gbps. Στις παλαιές οπτικές ζεύξεις η τιμή του συντελεστή

της PMD μπορεί να είναι έως και $2 \frac{ps}{\sqrt{Km}}$. Για αυτή την τιμή το όριο απόστασης είναι

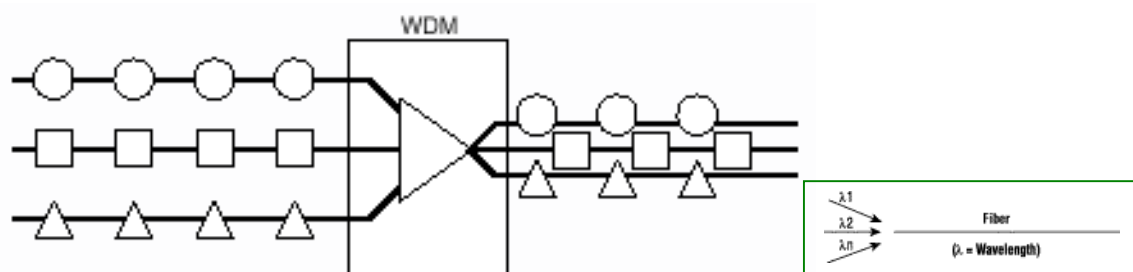
περίπου 25 Km στα 10 Gbps και η ηλεκτρονική αναγέννηση είναι απαραίτητη για μεγαλύτερες αποστάσεις. Το όριο απόστασης μπορεί να είναι ακόμα μικρότερο λόγω της πρόσθετης PMD, που προκαλείται από τις συγκολλήσεις, τους συνδετήρες και από άλλες διατάξεις κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης. Η διασπορά τρόπου πόλωσης PMD δεν προκαλεί πρόβλημα στις νεότερες ζεύξεις, όπου η τιμή του συντελεστή της

μπορεί να περιοριστεί στα $0.1 \frac{ps}{\sqrt{Km}}$.

Η τεχνική TDM είναι μια ανταγωνιστική προσέγγιση για ζεύξεις μικρών ή μεσαίων αποστάσεων ή για ζεύξεις που λειτουργούν σε ίνες μετατοπισμένης διασποράς DSF. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας δελεαστικός για τη χρήση αυτής της τεχνικής, είναι ότι ένα σύστημα TDM είναι συμβατό με τα υπάρχοντα συστήματα και έτσι δεν απαιτείται νέα γνώση για την εγκατάσταση και την διαχείριση μιας ζεύξης. Σήμερα είναι εμπορικά διαθέσιμα συστήματα TDM στα 10 Gbps ενώ ταυτόχρονα γίνεται έρευνα για συστήματα TDM στα 20 και 40 Gbps.

6.5.7.3 Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM)

Η μέθοδος Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM) επιτυγχάνει αύξηση της χωρητικότητας του φυσικού μέσου (οπτική ίνα), μέσω της εκχώρησης σε καθένα από τα εισερχόμενα οπτικά σήματα ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος (λ) ή συχνότητας, από ένα καθορισμένο εύρος συχνοτήτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11



Σχήμα 6.11 Σχηματική αναπαράσταση Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος

Έτσι, σε ένα σύστημα WDM, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της ίδιας οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Η πολυπλεξία μήκους κύματος δηλαδή χρησιμοποιεί διαφορετικά μήκη κύματος προκειμένου να μεταδώσει ταυτόχρονα από την ίδια οπτική ίνα δεδομένα διαφορετικών συνδέσεων. Έτσι επιτυγχάνεται η υλοποίηση ενός συστήματος παράλληλων οπτικών καναλιών, όπου το καθένα χρησιμοποιεί διαφορετικό μήκος κύματος αλλά όλα μοιράζονται ένα κοινό μέσο μετάδοσης.

Όπως και με τη μέθοδο TDM, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα των χωρητικότητων των εισερχόμενων σημάτων (καναλιών), με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε σήμα (κανάλι) έχει το δικό του αποκλειστικό εύρος ζώνης. Επιπλέον, μια άλλη σημαντική διαφορά σε σχέση με την τεχνολογία SONET/SDH είναι ότι με τη τεχνική WDM είναι δυνατή η μεταφορά πολλαπλών πρωτοκόλλων, δίχως να απαιτείται η κοινή τυποποίηση των σημάτων. Η τεχνική αυτή δεν είναι καινούρια. Η πολυπλεξία σημάτων με διαφορετικές συχνότητες στο ίδιο μέσο και συνεπώς διαφορετικά μήκη κύματος χρησιμοποιείται από παλιά και όπως αναφέραμε είναι γνωστή ως πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας. Η υλοποίησή της όμως στα οπτικά δίκτυα έγινε εφικτή μόνο μετά τις πρόσφατες προόδους που έγιναν στην οπτική τεχνολογία. Με την πολυπλεξία

μήκους κύματος έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση διαφορετικών σημάτων μέσα από το ίδιο μέσο και στα οπτικά δίκτυα.

Η ελάχιστη απόσταση, όσον αφορά το μήκος κύματος, ανάμεσα σε δύο διαφορετικά πολυπλεγμένα κανάλια ονομάζεται απόσταση ασφαλείας και είναι συνήθως της τάξης του 1nm. Η απόσταση αυτή περιορίζει τον αριθμό των καναλιών που μπορούμε να έχουμε σε μία οπτική ίνα. Η ελάχιστη απόσταση καθορίζεται από τους περιορισμούς των συσκευών του δικτύου όπως για παράδειγμα η ικανότητα του δέκτη να ξεχωρίσει δύο γειτονικά κανάλια, δύο κανάλια δηλαδή που βρίσκονται σε συνεχόμενες περιοχές μήκους κύματος.

Συχνά, η τεχνολογία WDM αναφέρεται και ως DWDM (Dense Wavelength Division Modulation) όταν αυξάνεται ο αριθμός των μεταφερόμενων καναλιών, μέσω της διαίρεσης του καθορισμένου εύρους συχνοτήτων σε περισσότερα μήκη κύματος (πρακτικά περισσότερα από 8).

- **Πλεονεκτήματα του WDM σε σχέση με το TDM**

Λόγω των μικρότερων ρυθμών bit, το όριο απόστασης λόγω της χρωματικής διασποράς είναι πολύ μεγαλύτερο για τα WDM συστήματα σε σχέση με τα ισοδύναμα TDM συστήματα. Όμοια, η PMD δεν επιβάλλει κάποιον σημαντικό περιορισμό απόστασης στα 2.5 Gbps.

Η χωρητικότητα μετάδοσης μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη μηκών κύματος σε αντίθεση με το TDM όπου απαιτούνται νέες εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα σε ένα WDM σύστημα με τέσσερα κανάλια, η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί από τα 2.5 Gbps στα 10 Gbps με βήμα 2.5 Gbps. Από την άλλη πλευρά ένα σύστημα TDM στα 10 Gbps πρέπει να εγκατασταθεί μονομιάς και όχι κατά τμήματα.

Τα συστήματα WDM μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι διαφανή. Αυτό επιτρέπει σε διαφορετικά μήκη κύματος να μεταφέρουν δεδομένα σε διαφορετικούς ρυθμούς bit και διαφορετικά πρωτόκολλα.

Το WDM πρέπει να προτιμάται από το TDM κατά την σχεδίαση πιο πολύπλοκων δικτύων. Για παράδειγμα αν υπάρχει ένας κόμβος δικτύου στον οποίο το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης πρέπει να περάσει και ένα μικρό ποσοστό πρέπει να "πεταχτεί" και να προστεθεί (drop-add), είναι οικονομικά αποδοτικότερο να χρησιμοποιηθεί ένας οπτικός πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης (Optical Add-Drop Multiplexer – OADM) παρά ένα σύνολο από TDM τερματικά.

Από την άλλη πλευρά το WDM υποφέρει από κάποια μειονεκτήματα παρόμοια με αυτά του TDM : Τα συστήματα WDM γενικά δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε ίνα μετατοπισμένης διασποράς εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλονται από την μίξη τεσσάρων κυμάτων. Τα WDM συστήματα απαιτούν ειδικά σχεδιασμένους οπτικούς ενισχυτές που παρέχουν επίπεδα προφίλ απολαβής. Επιπρόσθετα, η απολαβή τους πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των μηκών κύματος στο σύστημα έτσι ώστε να γίνονται πιο εύκολα οι αναβαθμίσεις και πολύ περισσότερο να αποφεύγονται βλάβες σε κάποιο κανάλι που οφείλονται σε λάθη κάποιου άλλου καναλιού.

Όπως στην προσέγγιση SDM, τα WDM συστήματα απαιτούν ξεχωριστό τερματικό εξοπλισμό για κάθε κανάλι συμπεριλαμβανομένων των πολυδάπανων laser και των

δεκτών. Ένα TDM σύστημα από την άλλη πλευρά, απαιτεί ένα κομμάτι τερματικού εξοπλισμού. Ωστόσο, αυτός ο εξοπλισμός περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά που απαιτούνται για την πολυπλεξία και αποπολυπλεξία των συμβολοσειρών (streams) χαμηλής ταχύτητας.

Τα διαφανή WDM συστήματα προσφέρουν μικρότερες δυνατότητες παρακολούθησης και διαχείρισης του δικτύου από ότι τα TDM συστήματα γιατί δεν γνωρίζουν την πραγματική μορφή και τον ρυθμό δεδομένων κάθε καναλιού. Έτσι δεν μπορούν να παρακολουθήσουν παραμέτρους όπως ο ρυθμός σφαλμάτων-BER ή τα πλαίσια σφαλμάτων στα δεδομένα. Φυσικά οι άλλες διατάξεις που προσαρτώνται στις WDM διατάξεις μπορούν να εκτελέσουν αυτές τις λειτουργίες. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δύσκολο να προσδιοριστεί πότε ένα λάθος είναι στην WDM διάταξη ή στην προσαρτημένη διάταξη.

6.5.8 Φαινόμενα που Επηρεάζουν την Απόδοση των συστημάτων DWDM

- Η μετάδοση φωτός μέσω οπτικών ινών συνοδεύεται από φαινόμενα *γραμμικά* (εξασθένιση και χρωματική διασπορά) και *μη γραμμικά* που δεν αντισταθμίζονται γιατί είναι αθροιστικά και οφείλονται στην αλληλεπίδραση του φωτός με το υλικό του μέσου διάδοσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεταβολές στην ένταση της φωτεινής δέσμης αλλά και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δεσμών. Τα σημαντικότερα μη γραμμικά φαινόμενα είναι:
 - **Εξαναγκασμένη σκέδαση Raman**
 - **Εξαναγκασμένη σκέδαση Brillouin**
 - **Μίξη τεσσάρων κυμάτων**

6.5.9 Σχεδίαση ενός οπτικού συστήματος επικοινωνιών

Κατά τη σχεδίαση, τα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και οι λειτουργίες ενός οπτικού συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη και ταυτόχρονα να γίνουν κάποιοι συμβιβασμοί που αφορούν την επιλογή των δομικών στοιχείων και την τεχνική μετάδοσης, ώστε οι επιδόσεις του συστήματος να καλύπτουν τις απαιτήσεις μας. Σε αδρές γραμμές η στρατηγική σχεδίασης συνοψίζεται ως ακολούθως:

I. Επιλογή μήκους κύματος μετάδοσης - αρχιτεκτονικής.

Στις ζεύξεις μικρών ταχυτήτων και μικρών αποστάσεων χρησιμοποιούνται μικρότερα μήκη κύματος από ότι στις υψίρυθμες μεγάλων αποστάσεων. Βέβαια τα χρησιμοποιούμενα μήκη κύματος πρέπει να αντιστοιχούν στα ελάχιστα της εξασθένισης της οπτικής ίνας. Ο πιο συνηθισμένος τύπος μετάδοσης είναι κάποιος τύπος διαμόρφωσης IM. Για μετάδοση φωνής χρησιμοποιείται διαμόρφωση AM/IM, ενώ για σήμα Video διαμόρφωση FM/IM. Αν το προς μετάδοση σήμα είναι ψηφιακό χρησιμοποιείται διαμόρφωση OOK/IM ή FSK/IM. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πολυπλεξίας είναι οι SDM, TDM και FDM. Η πιο απλή αρχιτεκτονική είναι η σημείου προς σημείο (point to point) με ένα τερματικό πρόσβασης στην αρχή και το τέλος της

ζεύξης. Σύστημα δυο κατευθύνσεων απαιτεί πολυπλεξία ή δυο οπτικές ίνες. Για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ τερματικών που βρίσκονται σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις είναι απαραίτητη η χρήση συζευκτών και μεταγωγέων, πράγμα που σημαίνει την αύξηση των απωλειών.

II. Επιλογή δομικών στοιχείων

Οι φωτοπηγές LED και οι οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης θεωρούνται κατάλληλες για ζεύξεις μικρών αποστάσεων. Στις υψίρρυθμες ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιούνται κυρίως δίοδοι Laser που έχουν σχεδόν μονοχρωματική ακτινοβολία και υψηλή ταχύτητα απόκρισης. Μειονέκτημα στη χρησιμοποίησή τους αποτελεί η εξάρτηση των χαρακτηριστικών τους από τη θερμοκρασία και οι υψηλές τιμές του ρεύματος πρόλωσής τους. Η επιλογή της οπτικής ίνας γίνεται με κριτήριο την εξασθένιση της και την παράμετρο $L \cdot B$ που είναι το γινόμενο της μέγιστης απόστασης L [km] επί το ρυθμό δεδομένων B [Hz ή bps], που μπορεί να μεταδοθεί με την ελάχιστη δυνατή απόσβεση σε αυτή την απόσταση. Όσον αφορά τους φωτοφωρατές η επιλογή γίνεται μεταξύ φωτοδίοδων PIN ή APD. Οι APD πρέπει να επιλεγθούν όταν το προς μετάδοση σήμα έχει μεγάλο εύρος ζώνης και η ζεύξη μεγάλο μήκος. Όταν στο δέκτη η διαθέσιμη οπτική ισχύς ξεπερνά το 1 mW, προτιμώνται σχεδόν πάντα οι φωτοδίοδοι PIN.

III. Ισολογισμός απωλειών

Ο στόχος της σχεδίασης είναι να καθορίσει το μέγιστο μήκος L της ζεύξης για το οποίο μπορεί να μεταδοθούν δεδομένα ρυθμού R_b bps, έτσι ώστε ο BER να είναι μικρότερος από μια προκαθορισμένη τιμή (συνήθως BER < 10^{-9}). Σε αναλογικό σύστημα αντίστοιχα θα πρέπει να καθοριστεί το L για τη μετάδοση σήματος εύρους ζώνης $2B$, έτσι ώστε ο λόγος S/N στο δέκτη να είναι μεγαλύτερος από μια προκαθορισμένη τιμή (συνήθως S/N > 10).

Στη περίπτωση του ψηφιακού συστήματος αποδεικνύεται ότι για να εξασφαλίσουμε ένα BER < 10^{-9} , απαιτείται στο δέκτη που θεωρείται ιδανικός να φτάνουν τουλάχιστον $n_0 = 10$ φωτόνια ανά bit. Συνεπώς η απαιτούμενη ελάχιστη οπτική ισχύς P_r θα είναι:

$$P_r = n_0 h \nu B_0 = n_0 h \frac{c}{\lambda} R_b \quad [W] \quad (6.7)$$

όπου $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$ J-s η σταθερά του Planck, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s η ταχύτητα του φωτός στο κενό και ν , λ η χρησιμοποιούμενη οπτική συχνότητα [Hz] ή το μήκος κύματος αντίστοιχα [m]. Εάν P_s είναι η ισχύς της πηγής [dBm], α οι απώλειες εξασθένισης της οπτικής ίνας [dB/km], P_c οι απώλειες συνδέσεων και σύζευξης πηγής και φωτοφωρατή με την ίνα, L θα είναι το μέγιστο μήκος της ίνας ώστε να φτάνει στο δέκτη ισχύς P_r . Δηλαδή ισχύει:

$$P_s - P_c - P_m - \alpha L = P_r \quad [\text{dBm}] \quad (6.8)$$

Όπου P_m είναι το περιθώριο ασφαλείας (συνήθως 3-6 dBm).

Από τη σχέση (7.2) αφού εκφραστεί η P_r σε dBm $P_r = 10 \log_{10} \frac{n_0 h \nu R_b}{10^{-3}}$ [dBm] προκύπτει:

$$L = L_0 - \frac{10}{\alpha} \log_{10} R_b \quad (6.9)$$

όπου $L_0 = [P_s - P_c - P_m - 30 - 10 \log_{10}(n_0 h\nu)]/a$.

Όπως ήταν αναμενόμενο το μήκος της ζεύξης μειώνεται όταν αυξάνουν οι απώλειες της ίνας ή όταν αυξάνει ο ρυθμός των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν.

Το σημαντικό θέμα της διασποράς πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Η διαπλάτυνση $\Delta\tau$ κάθε παλμού στο δέκτη δεν πρέπει να ξεπεράσει το χρόνο $1/R_b$ που μεσολαβεί στην αποστολή δύο διαδοχικών bit διαφορετικά θα έχουμε αλληλοπαρεμβολή.

Θέτοντας $\Delta\tau = \varepsilon \cdot (1/R_b)$ όπου ε συντελεστής μικρότερος της μονάδας (συνήθως $\varepsilon = 0.25$), ελέγχεται αν το γινόμενο $L \cdot B_0$ είναι μικρότερο από την παράμετρο ποιότητας L_B που εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη οπτική ίνα και προσεγγιστικά δίνεται από τις σχέσεις:

$$\text{Για βηματικού δ.δ. : } L_B = 2\varepsilon \frac{c}{n_c \Delta} \quad (6.10\alpha)$$

$$\text{Για βαθμιαίου δ.δ. : } L_B = 4\varepsilon \frac{c}{n_c \Delta^2} \quad (6.4\beta)$$

$$\text{Για μονότροπη : } L_B = \varepsilon \frac{1}{D_\lambda \delta\lambda} \quad (6.4\gamma)$$

c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, n_c , n_g οι δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα της οπτικής ίνας αντίστοιχα, $\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$, D_λ ο συντελεστής διασποράς του υλικού και $\delta\lambda$ το φασματικό εύρος της πηγής ($\delta\lambda = 0.1 - 80$ nm).

Οι σχέσεις (7.1) - (7.3) χρησιμοποιούνται και στη σχεδίαση αναλογικών συστημάτων. Ο όρος B_0 σε αυτή τη περίπτωση αντικαθίσταται από τον όρο $2B$ όπου B το εύρος ζώνης του αναλογικού σήματος. Αντί για BER = 10^{-9} εξασφαλίζεται τώρα λόγος σήματος προς θόρυβο S/N ≈ 10 . Για παράδειγμα μια ζεύξη μήκους 1 km ικανή να μεταδώσει ψηφιακά δεδομένα με ρυθμό 2 Gbps με BER που δεν ξεπερνά τη τιμή 10^{-9} , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση αναλογικού σήματος εύρους ζώνης 1 Gb/s με S/N τουλάχιστον 10. Στα αναλογικά συστήματα ωστόσο, ο απαιτούμενος λόγος σήματος προς θόρυβο είναι πολύ μεγαλύτερος από 10. Για παράδειγμα για τη μετάδοση σήματος Video απαιτείται S/N = 60 dB ή S/N = 10^6 . Η σχέση (7.2) εξακολουθεί να ισχύει αρκεί ο όρος n_0 να αντικατασταθεί από το όρο S/N = 10^6 .

Αφού το οπτικό σύστημα σχεδιαστεί και υλοποιηθεί ελέγχεται η λειτουργία του με σειρά μετρήσεων και χρήση ειδικών οργάνων σε διάφορα σημεία της ζεύξης.

6.5.10 ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

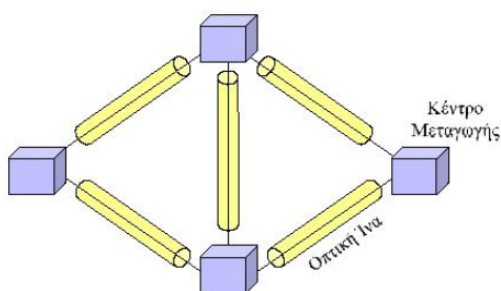
Η απαίτηση για υψηλότερες ταχύτητες επικοινωνίας και παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών λόγω της ραγδαίας εξάπλωση των πολυμέσων σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανάγκες πρόσβασης στις ιστοσελίδες του κυβερνοχώρου, είναι ο παράγοντας που καθορίζει την εξέλιξη των δικτύων. Έτσι, η τεχνολογία των δικτύων οδηγείται από τους δρομολογητές και τα πρωτόκολλα τύπου X.25, IPX (δεκαετία του

1980), στις μεταγωγικές διατάξεις και στα πρωτόκολλα τύπου ATM, SDH/SONET (δεκαετία του 1990) αλλά και στα οπτικά δίκτυα. Πράγματι, η ηλεκτρική μετάδοση μέσω χάλκινων καλωδίων δίνει τη θέση της με ολοένα αυξανόμενους ρυθμούς στην οπτική μετάδοση μέσω οπτικών ινών. Προκειμένου δε, να αυξηθεί η χωρητικότητα των ήδη εγκατεστημένων οπτικών ινών, προωθείται η χρήση τεχνικών οπτικής πολυπλεξίας.

Με δεδομένους τους παρόντες ρυθμούς της ζήτησης για εύρος ζώνης, προβλέπεται ότι θα απαιτηθούν νέες τεχνολογίες για την υποστήριξη των μελλοντικών ευρυζωνικών δικτύων υπέρ-υψηλής ταχύτητας (π.χ. πάνω από 100 Gb/s). Στο πλαίσιο αυτό, η οπτική τεχνολογία αναμένεται να κυριαρχήσει προσφέροντας ένα καινούργιο μοντέλο μεταφοράς (transport), με πρωτεύοντα στοιχεία την οπτική πολυπλεξία και την οπτική μεταγωγή (optical switching). Πολλοί υποστηρίζουν ότι η τεχνολογία αυτή μπορεί να ξεπεράσει τους υφιστάμενους περιορισμούς της ηλεκτρονικής και να προσφέρει τις τεχνικές δυνατότητες για μεταγωγή (switching) και ρυθμοδότηση (throughput) υπέρ-υψηλής ταχύτητας. Εντούτοις, παρά το γεγονός ότι στο τομέα της οπτικής τεχνολογίας παρουσιάζεται έντονη ερευνητική δραστηριότητα και υπάρχει σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, υπάρχουν ακόμα πολλά προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν πριν η τεχνολογία αυτή γίνει οικονομικά ανταγωνιστική και ευρέως εμπορικά εκμεταλλεύσιμη. Από τεχνικής απόψεως πάντως, οι προοπτικές και οι δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει είναι πράγματι εντυπωσιακές.

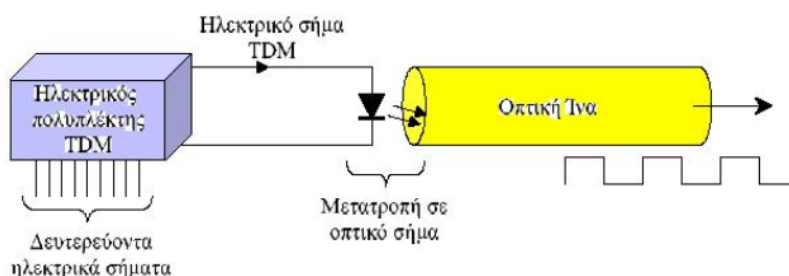
6.5.11 Σύγχρονα δίκτυα μεταγωγής

Παλαιότερα η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αντιμετωπιζόταν με την ανάπτυξη και χρήση ταχύτερων τερματικών διατάξεων ικανών να παρέχουν τους εκάστοτε απαιτούμενους ρυθμούς μετάδοσης. Τα ψηφιακά δίκτυα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιούσαν την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, αρχικά υπό τη μορφή της πλησιόχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (Plesiochronous Digital Hierarchy) και στη συνέχεια υπό τη μορφή της πιο εξελιγμένης σύγχρονης ψηφιακής ιεραρχίας (Synchronous Digital Hierarchy). Η σταδιακή εξάπλωση μοντέρνων τεχνολογιών, όπως τα σύγχρονα οπτικά δίκτυα (Synchronous Optical Network), αναμένεται να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις και ευελιξία στα ευρυζωνικά δίκτυα. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται σε υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικά μεταγωγικά κέντρα, τα οποία συνδέονται με οπτικές ίνες και χρησιμοποιούν πολυπλεξία τύπου TDM. Είναι χαρακτηριστικό ότι στα δίκτυα αυτά οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται απλώς ως μέσα αντικατάστασης του χαλκού, χωρίς να πραγματοποιείται ευρεία εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους. Τέτοια δίκτυα αναφέρονται ως δίκτυα δεύτερης γενιάς. Μια τυπική δομή ενός τέτοιου δικτύου φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.12 σύγχρονο ηλεκτροοπτικό μοντέλο δικτύου χωρίς οπτική πολυπλεξία

Σε αυτά τα δίκτυα, τόσο η μεταγωγή όσο και η πολυπλεξία πραγματοποιούνται στο ηλεκτρικό επίπεδο. Όπως δείχνει και το σχήμα 10 οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά των ηλεκτρικά παραγομένων TDM σημάτων, αφού προηγουμένως μετατραπούν σε αντίστοιχα οπτικά. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην αξιοποιούνται πλήρως οι δυνατότητές τους.



Σχήμα 6.13 ηλεκτρική παραγωγή σήματος TDM και μετάδοση του σε οπτική ίνα

Πράγματι, εφόσον με την τρέχουσα τεχνολογία, η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας των ψηφιακών κυκλωμάτων περιορίζεται γύρω στα 10 Gbps το σήμα TDM μεταξύ διαδοχικών κόμβων θα περιορίζεται και αυτό στα ίδια όρια. Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται ως ηλεκτρονική συμφόρηση (electronic bottleneck). Επίσης, εφόσον σε κάθε κόμβο τα οπτικά σήματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά για επεξεργασία και στην συνέχεια, ξανά σε οπτικά για επαναμετάδοση η μέγιστη ταχύτητα μεταγωγής θα υπόκειται και αυτή σε παρόμοιους περιορισμούς.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, προκειμένου αυτή η τεχνολογία να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των μελλοντικών δικτύων θα πρέπει να ξεπεραστεί το πρόβλημα της ηλεκτρονικής συμφόρησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε εργαστηριακό επίπεδο έχουν αναπτυχθεί ολοκληρωμένα κυκλώματα με ταχύτητες λειτουργίας υψηλότερες από 10Gbps, αλλά υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν μέχρι να διατεθούν σε ευρεία εμπορική χρήση. Ηλεκτρονικές κατασκευές με τόσο υψηλή ταχύτητα λειτουργίας απαιτούν ειδικής τεχνολογίας ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπως για παράδειγμα αρσενικούχου γαλλίου ή HBT (Heterojunction Bipolar Transistor), τα οποία είναι πάρα πολύ ακριβά. Γενικά πάντως, το πόσο μπορεί να αυξηθεί ο βαθμός πυκνότητας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων πολύ υψηλής συχνότητας, καθώς και το πόσο μπορεί να αυξηθεί η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας τους σε πρακτικό επίπεδο, είναι ερωτήματα τα οποία αποτελούν αντικείμενο έρευνας και στα οποία δεν αναμένεται να δοθεί βραχυπρόθεσμα απάντηση.

Μία άμεση λύση προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα των γραμμών ζεύξης μεταξύ διαδοχικών μεταγωγικών κέντρων είναι η χρήση πολλών παράλληλων τέτοιων γραμμών, η χρήση δηλαδή της πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου (SDM). Αυτή η λύση θα μπορούσε να θεωρηθεί ιδιαίτερα εφικτή σε περιοχές με πλούσια οπτική υποδομή αλλά, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για μεγάλες αποστάσεις αποτελεί μια αρκετά ακριβή λύση, αφού απαιτούνται ξεχωριστοί οπτικοί ενισχυτές κάθε περίπου 100Km για κάθε μία από τις παράλληλες οπτικές γραμμές. Επιπλέον, σε περιοχές με χαμηλή οπτική υποδομή, το υψηλό κόστος εγκατάστασης νέων γραμμών αποτελεί μείζονα μειονέκτημα.

6.5.12 Πρότυπα οπτικών δικτύων

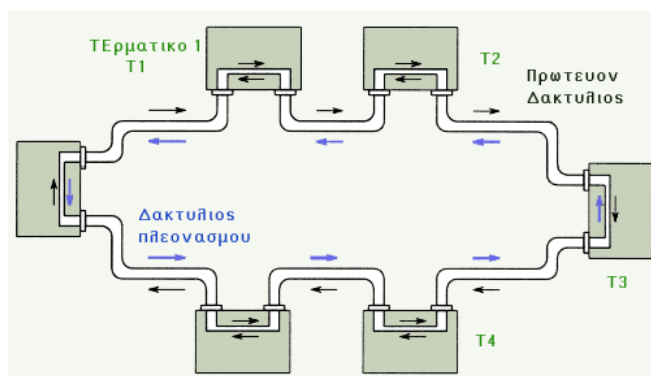
Ένα βασικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί στα διαφορετικών τύπων δίκτυα είναι η ανάγκη χρήσης πολύπλοκων διαδικασιών μετατροπής, όπως για παράδειγμα της πολυπλεξίας και της αποπολυπλεξίας, που απαιτούνται για την επικοινωνία μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω της προτυποποίησης των ρυθμών μεταφοράς και των τρόπων με τον οποίο είναι οργανωμένα τα δεδομένα. Έτσι, είναι δυνατή η μεταφορά πολλών διαφορετικών τύπων δεδομένων μέσω μιας κοινής γραμμής.

Δυο τύποι δικτύων με οπτικές ίνες έχουν προταθεί σαν διεθνή πρότυπα. Το οπτικό δίκτυο FDDI (Fiber Distributed Data Interface) είναι ένα ευρυζωνικό τοπικό δίκτυο δεδομένων (LAN) που λειτουργεί στα 100 Mbps και το SDH (Synchronous Digital Hierarchy) που είναι οπτικό δίκτυο ευρείας γεωγραφικής περιοχής (WAN) που είναι ουσιαστικά του αντίστοιχου αμερικάνικου προτύπου SONET (Synchronous Optical Network) με βασικό ρυθμό μετάδοσης τα 155 Mbps με δυνατότητα επέκτασης ώστε να φτάνει σε μερικές δεκάδες Gbps. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύνολο καθορισμένων προτύπων που περιγράφουν την εκπομπή δεδομένων με τη μέθοδο της πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου (Time Division Multiplexing) σε δίκτυα οπτικών ινών. Τα πρότυπα αυτά καθορίζουν μια ομάδα από ρυθμούς μετάδοσης και προδιαγραφές πλαισίωσης για την μετάδοση δεδομένων χρησιμοποιώντας οπτικό σήμα μέσω καλωδίων οπτικών ινών. Αρχικά το SONET αναπτύχθηκε από την Bellcore το 1985 και έγινε πρότυπο το 1988 αφού πρώτα η χρήση του για την μεταφορά δεδομένων στο BISDN δίκτυο ήταν αρκετά διαδεδομένη, ενώ το SDH καθιερώθηκε το 1989 (ITU).

Η τεχνολογία αυτή, αποτελεί τη βάση αρκετών υλοποιήσεων του IP over WDM οι οποίες υπόσχονται να προσφέρουν πρακτικά απεριόριστο εύρος ζώνης, συμβάλλοντας παράλληλα στην πραγματοποίηση πληθώρας διαδικτυακών υπηρεσιών μέσω του IP πρωτοκόλλου.

6.5.13 Το πρότυπο FDDI

Το FDDI είναι ένα πρότυπο για LAN με χρήση οπτικής ίνας και καθορίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 80. Είναι ουσιαστικά μια μέθοδος Token Ring και επιτυγχάνει ταχύτητες από 100Mbps μέχρι 1 Gbps (G – Ethernet). Λόγω του υψηλού του κόστους μάλλον χρησιμοποιείται περισσότερο στα δίκτυα κορμού. Βασίζεται σε μια διπλή δομή δακτυλίου, τον πρωτεύοντα και το δακτύλιο πλεονασμού. (Σχήμα 6.14)



Σχήμα 6.14 Δακτύλιος FDDI

Ο ένας δακτύλιος μεταφέρει τα δεδομένα ενώ ο άλλος είναι για παροχή ασφάλειας και άλλων υπηρεσιών. Η ροή των δεδομένων στους δυο δακτυλίους έχει αντίθετες κατευθύνσεις. Τα τερματικά και άλλες διατάξεις (γέφυρες, δρομολογητές) μπορούν να συνδεθούν με τον ένα ή και τους δύο δακτυλίους.

Το FDDI επιτρέπει ένα μέγιστο αριθμό 100 συνδέσεων σε ένα καλώδιο οπτικής ίνας, μήκους μέχρι 200 km. Σε περίπτωση σφάλματος (κοπή καλωδίου), οι πλησιέστεροι προς τη θέση με το πρόβλημα σταθμοί, μεταβιβάζουν τα δεδομένα στο δεύτερο δακτύλιο εκπέμποντας τα με αντίθετη φορά, επαναφέροντας έτσι σε λειτουργία το διακεκομμένο δακτύλιο.

6.5.14 Πρότυπο SONET/SDH Λειτουργία και ρυθμοί μετάδοσης

Το πρότυπο SONET/SDH χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) και σε κάθε εκπομπή θα διατίθεται όλο το εύρος ζώνης. Το SONET/SDH τυποποιεί τον τρόπο που μεταφέρονται δεδομένα με σύγχρονο τρόπο διαμέσου οπτικών καναλιών,. Ως σύγχρονο σύστημα εκπέμπει συνεχώς ανεξάρτητα από το αν υπάρχει κάτι να μεταδοθεί ή όχι και διαθέτει ένα ρολόι ακριβείας, η θεμελιώδης συχνότητα του οποίου γύρω από την οποία γίνεται ο συγχρονισμός είναι 8kHz, δηλαδή 125μsec.

Ο θεμελιώδης ρυθμός μετάδοσης των οπτικών διασυνδέσεων της τεχνολογίας SONET OC-1 ισούται με 51.84 Mbps (OC-1 ή STS-1 οπτικός φορέας –Optical carrier ή σύγχρονο σήμα μεταφοράς Synchronous Transport Signal), ενώ για το πρότυπο SDH είναι ο STM-1 (σύγχρονη μονάδα μεταφοράς - Synchronous Transfer Module), που ισούται με 155.52 Mbps. Από τα πολλαπλάσια τους προκύπτουν όλες οι προδιαγραφόμενες ταχύτητες. Για παράδειγμα για το SONET ο ρυθμός 155.52 Mbps προκύπτει ως 3x51.84 Mbps. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι τυποποιημένοι ρυθμοί μετάδοσης για τις SONET/SDH πλατφόρμες, με τους αντίστοιχους συμβολισμούς για το οπτικό και το ηλεκτρικό επίπεδο.

Πίνακας 8.1

Η ψηφιακή ιεραρχία SONET/SDH

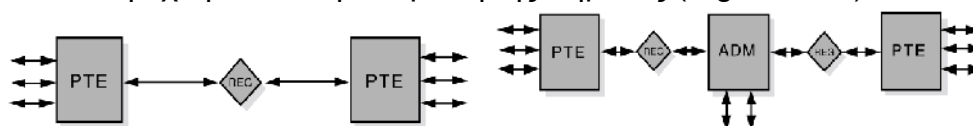
SONET		Ρυθμοί μετάδοσης (Mbps)			SDH
Οπτικό Επίπεδο	Ηλεκτρικό Επίπεδο	Συνολικός	Synchronous Payload Envelope	Overhead	Οπτικό Επίπεδο
OC-1	STS-1	51.84	50.112	1.728	-----
OC-3	STS -3	155.52	150.336	5.184	STM-1
OC-9	STS -9	466.56	451.008	15.552	STM -3
OC-12	STS -12	622.08	601.344	20.736	STM -4
OC-18	STS -18	933.12	902.016	31.104	STM -6
OC-24	STS -24	1244.16	1202.688	41.472	STM -8
OC-36	STS -36	1866.24	1804.032	62.208	STM -12
OC-48	STS -48	2488.32	2405.376	82.944	STM -16
OC-96	STS -96	4976.64	4810.752	165.888	STM -32
OC-192	STS -192	9953.28	9621.504	331.776	STM -64

Οι ρυθμοί μετάδοσης και οι προδιαγραφές της πλαισίωσης αναφέρονται στο SONET ως Synchronous Transport Signal (STS-n) στάθμες (levels), ενώ οι οπτικές προδιαγραφές αναφέρονται ως Optical Carrier (OC-n) στάθμες. Το n στο STS-n δείχνει πόσες φορές είναι πολλαπλάσιο της πρώτης στάθμης, δηλαδή έχοντας καθορίσει το STS-1 να είναι 51.84Mbps τότε το STS-3 είναι $3 \times 51.84 = 155.52$ Mbps. Οι ρυθμοί μετάδοσης κυμαίνονται από το STS-1 στα 51.84Mbps έως το STS-48 στα 2.5Gbps με δυνατότητα για ακόμα πιο υψηλούς. Οι OC προδιαγραφές αναφέρονται στο τύπο του οπτικού καλωδίου και στην ισχύ του οπτικού σήματος και το n ακολουθεί αυτό του STS. Έτσι στο STS-3 αντιστοιχεί το OC-3. Στον παραπάνω πίνακα ο ρυθμός του Synchronous Payload Envelope που περιέχει τα προς μετάδοση δεδομένα προκύπτει αν αφαιρέσουμε από το συνολικό ρυθμό μετάδοσης τον ρυθμό των επιπλέον byte που προστίθενται στη δομή των πλαισίων και δεν μεταφέρουν δεδομένα του χρήστη, αλλά πληροφορίες για την επιτυχή τους μεταφορά (overhead bytes).

Τα πρότυπα των διεπαφών SDH έχουν επίσης ταξινομηθεί σε κατηγορίες με βάση την απόσταση. Οι διεπαφές της κατηγορίας Intraoffice προορίζονται για μεταδόσεις πολύ κοντινών αποστάσεων, μικρότερες των 2 χιλιομέτρων. Η κατηγορία Short haul (S) προορίζεται για διασυνδέσεις αποστάσεων μικρότερων των 15 χιλιομέτρων, ενώ οι διεπαφές της Long haul θα χρησιμοποιούνται για αποστάσεις 40 χιλιομέτρων εάν το μήκος κύματος είναι 1310nm και 60 χιλιομέτρων για μήκος κύματος 1550 nm.

6.5.15 Αρχιτεκτονικές δικτύων SONET/SDH

Η αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο (point to point) αποτελεί την απλούστερη έκδοση υλοποίησης ενός SONET/SDH δικτύου και περιλαμβάνει δύο τερματικούς πολυπλέκτες (PTE) οι οποίοι συνδέονται μέσω οπτικής ίνας. Ανάλογα με την απόσταση της ζεύξης χρησιμοποιείται ή όχι η συσκευή αναγέννησης σήματος (regenerator).

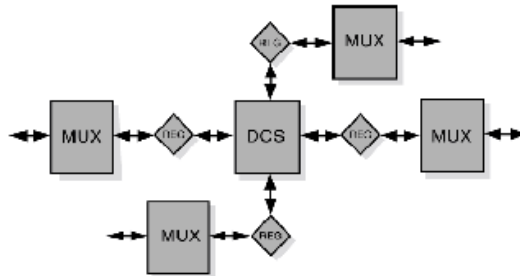


Σχήμα 6.15 α) αρχιτεκτονική από σημείο σε σημείο, β) Αρχιτεκτονική από σημείο σε πολλαπλά σημεία

Η αρχιτεκτονική από σημείο σε πολλαπλά σημεία (point to multipoint) κάνει χρήση των λειτουργιών πρόσθεσης και αφαίρεσης κυκλωμάτων κατά μήκος της διαδρομής. Συνεπώς, εκτός των τερματικών πολυπλέκτων (PTE) είναι απαραίτητη η ύπαρξη

πολυπλεκτών προσθαφαίρεσης (ADMs) για την επιτέλεση της συγκεκριμένης λειτουργίας.

Σε ένα δίκτυο κομβικού σημείου (Hub Network), ένα hub αποτελεί το κομβικό σημείο της κυκλοφορίας στο δίκτυο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την τροποποίηση της παροχής (provisioning) των κυκλωμάτων. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία από τις point to point αρχιτεκτονικές, κατά τις περιπτώσεις επέκτασης ή μεταβολής του δικτύου.

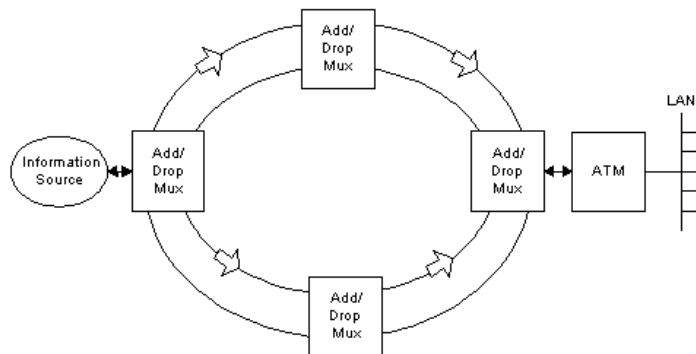


Σχήμα 6.16 αρχιτεκτονική κομβικού σημείου

Μια αρκετά συνηθισμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται στο SONET/SDH είναι η αρχιτεκτονική δακτυλίου (Ring). Τα βασικά δομικά στοιχεία της είναι οι ADMs, οι οποίοι τοποθετούνται πάνω σε οπτικές ίνες, σε τοπολογία διπλού δακτυλίου, επιτρέποντας την κατεύθυνση της πληροφορίας προς τη μία ή και προς τις δύο κατευθύνσεις όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.

Data transmission rates	Application
1200/2,400/9,600/14,400/28,800 b/s	modems
128 kb/s	ISDN (2 64-kb/s channels, 1 16- or 14-kb/s channel)
1.544 Mb/s	T1 data transmission
44.783 Mb/s	T3 data transmission

Data rate	Network
9600 b/s	RS232 printer interface
4 or 16 Mb/s	Token Ring Network
10 Mb/s	Ethernet
50 Mb/s	coax Hyperchannel
100 Mb/s	fiber Hyperchannel
100 Mb/s	FDDI, fast Ethernet
600 Mb/s	GaAs FDDI (proposed)
800 Mb/s	HSC channel (used in Cray supercomputers)



Σχήμα 6.17 δίκτυο SONET/SDH που χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική διπλού δακτυλίου

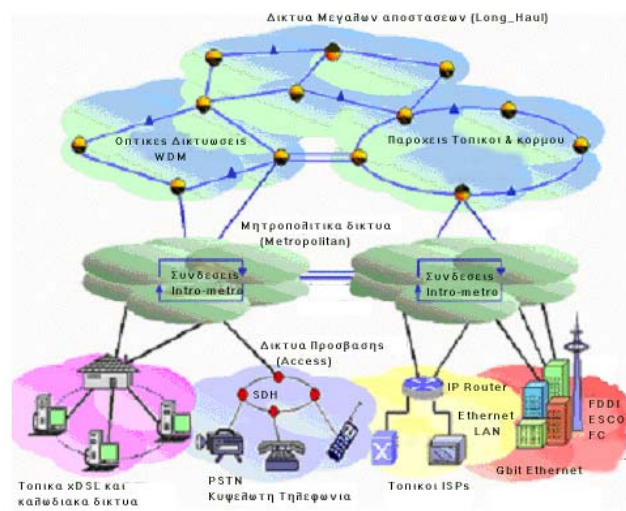
Οι πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (ADM) εισάγουν και αφαιρούν τα δεδομένα των χρηστών που προέρχονται από τις πηγές πληροφορίας, όπως για παράδειγμα ένας μεταγωγός ATM, στα πλαίσια SONET που κυκλοφορούν στο δακτύλιο. Σε αυτή την αρχιτεκτονική μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης οπτικοί πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης. Η λειτουργία τους έχει πολλά κοινά σημεία με τις αντίστοιχες ADM διατάξεις, με βασική διαφορά τη μη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό πριν το διαχωρισμό. Το κύριο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής δακτυλίου είναι η μεγάλη της ικανότητα να αντιμετωπίζει βλάβες του δικτύου. Ο διπλός δακτύλιος επιτρέπει την αποκατάσταση με την εκτέλεση μεταγωγής προστασίας από τον δακτύλιο λειτουργίας στον εναλλακτικό δακτύλιο όταν προκύψει μια βλάβη.

Ο ρόλος των οπτικών συστημάτων SONET/SDH δεν είναι απλά να αντικαταστήσουν τα χάλκινα καλώδια που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση πολυπλεγμένων ψηφιακών

σημάτων. Τα δίκτυα SONET/SDH παρέχουν μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης και μείωση του κόστους συντήρησης. Επιπροσθέτως παρέχουν ευελιξία, κεντρικό έλεγχο του δικτύου και υποστήριξη για τη λειτουργία, τη διαχείριση και τη συντήρηση των συστημάτων. Επιπλέον, λόγω της δυνατότητας του να διαχειρίζεται μεγάλο εύρος ζώνης, της απλότητας του και του χαμηλού κόστους λειτουργίας τελικά θα επικρατήσει του μη τυποποιημένου εξοπλισμού και της ασύγχρονης επικοινωνίας. Ήδη προτείνεται ως το βασικό μέσο μετάδοσης για ένα μεγάλο αριθμό αναδυόμενων ευρυζωνικών υπηρεσιών συμπεριλαμβανομένου του frame-relay, του SMDS, του B-ISDN και του ATM.

6.5.16 Κατηγορίες Οπτικών Δικτύων

Η τεχνολογία Πυκνής Πολυπλεξίας Διαίρεσης Μήκους Κύματος DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), με την οποία επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό η εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης της οπτικής ίνας, προσέφερε νέες λύσεις στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.



Σχήμα 6.18 Συνολική ιεραρχία στη δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων

Σήμερα, μετά την επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργία DWDM δικτύων μεγάλων αποστάσεων (Long-Haul Networks), η τεχνολογία DWDM αρχίζει να επεκτείνεται στην περιοχή των μητροπολιτικών δικτύων (Metropolitan Networks) και των δικτύων πρόσβασης (Access Networks), με στόχο να επωφεληθούν οι τελικοί χρήστες από τα πλεονεκτήματα κόστους και απόδοσης που προσφέρει.

Στο Σχήμα 8.6 απεικονίζεται η συνολική ιεραρχία στη δομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Τα μητροπολιτικά δίκτυα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των Long-Haul δικτύων και των δικτύων πρόσβασης. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή κάθε μίας από τις τρεις κατηγορίες των δικτύων.

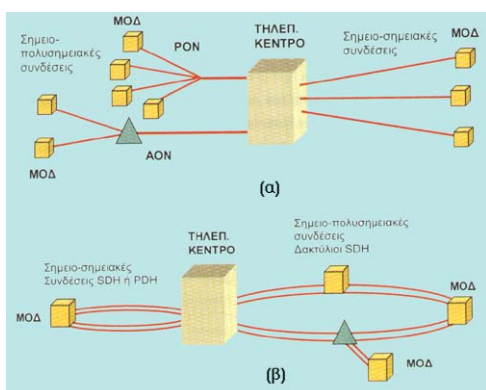
6.5.17 Δίκτυα Long-Haul

Αυτά τα δίκτυα εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων και εξυπηρετούν μεγάλους διεθνείς φορείς. Συνδέονται τόσο με τα μητροπολιτικά δίκτυα όσο και μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.1. Η βασική

προτεραιότητα σε αυτά τα δίκτυα είναι η χωρητικότητα μεταφοράς (transport capacity). Αν και τα δίκτυα Long-Haul βασίζονταν παραδοσιακά στην τεχνολογία SDH/SONET, ο πεπερασμένος αριθμός οπτικών ινών οδήγησε τους φορείς στην υιοθέτηση της τεχνολογίας DWDM σε μεγάλη κλίμακα. Λόγω του ότι ο αυξημένος αριθμός καναλιών DWDM συνεπάγεται διάφορα προβλήματα τεχνικής φύσεως, απαιτούνται λύσεις που εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ποιότητας των καναλιών σε μεγάλες αποστάσεις. Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται μετατροπή του οπτικού σε ηλεκτρικό σήμα (Opto-Electronic Conversion) μαζί με πλήρη ηλεκτρική αναγέννηση του σήματος. Όλα αυτά ανεβάζουν ιδιαίτερα το κόστος των δικτύων Long-Haul και τα καθιστούν μακροπρόθεσμες επενδύσεις στρατηγικού χαρακτήρα. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των επιμέρους στοιχείων (ενισχυτές, φίλτρα, isolators, ίνες αντιστάθμισης διασποράς), τα δίκτυα Long-Haul παρουσιάζουν μεγάλης κλίμακας αύξηση της χωρητικότητας.

6.5.18 Δίκτυα πρόσβασης (Access Networks)

Τα δίκτυα πρόσβασης χαρακτηρίζονται από μια μεγάλη ποικιλία πρωτοκόλλων και εξοπλισμού και οι ταχύτητες τους καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από το ρυθμό DS-1 έως και τον STM-64. Οι πελάτες των δικτύων πρόσβασης αποτελούνται από οικιακούς χρήστες του διαδικτύου μέχρι μεγάλους οργανισμούς (ιδιωτικούς, δημόσιους και εκπαιδευτικά ιδρύματα). Για την υποστήριξη όλων αυτών των πελατών, τα δίκτυα πρόσβασης πρέπει να μεταφέρουν εφαρμογές που βασίζονται σε μια ευρεία γκάμα



Σχήμα 6.19 Τοπολογίες δικτύων πρόσβασης

πρωτοκόλλων που περιλαμβάνουν τα: IP (Internet Protocol), ATM (Asynchronous Transfer Mode), SONET/SDH, ψηφιακό video, φωνή πολυπλεγμένη κατά TDM, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, και άλλα πιο εξειδικευμένα πρωτόκολλα, όπως τα FDDI (Fiber Distributed Data Interface), ESCON (Enterprise System Connectivity) και Fiber Channel. Η ξεκάθαρη τάση σε αυτή την αγορά είναι ότι η IP κίνηση θα συνεχίσει να αυξάνεται. Αυτή η τάση συνεπάγεται μεγάλες τεχνικές προκλήσεις λόγω της φύσης της IP κίνησης, η οποία γίνεται με τη μορφή ριπών και είναι ασύμμετρη και απρόβλεπτη. Επιπλέον, έχουμε την εμφάνιση πολλών νέων εφαρμογών όπως το internet video, η τηλεϊατρική και η τηλεδιάσκεψη. Συνολικά, τα δίκτυα πρόσβασης καθοδηγούνται από δύο παραμέτρους-κλειδιά, τις διαφορετικές εφαρμογές και τις ευέλικτες αρχιτεκτονικές. Στο Σχήμα 8.8 φαίνονται οι δυο συνηθέστερες αρχιτεκτονικές της αρτηρίας και του δακτυλίου. Το απαιτούμενο στοιχείο από τους παρόχους υπηρεσιών για την ανάπτυξη αποδοτικών δικτύων πρόσβασης είναι η διαφάνεια (transparency).

6.5.19 Μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Networks)

Τα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Networks) ορίζονται ως τα δίκτυα που καλύπτουν περιοχές μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων και εξυπηρετούν μεγάλες

μητροπολιτικές περιοχές. Τα μητροπολιτικά δίκτυα γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των Long-Haul δικτύων και των δικτύων πρόσβασης, διασυνδέοντας μια πλήρη γκάμα πρωτοκόλλων από πελάτες των δικτύων πρόσβασης στα δίκτυα κορμού των παροχών υπηρεσιών. Αυτά τα δίκτυα διοχετεύουν την κίνηση μέσα στο μητροπολιτικό τομέα (μεταξύ εταιριών, γραφείων κ.λ.π) καθώς επίσης από και προς μεγάλα Points of Presence (POPs) των δικτύων Long-Haul. Ο ρόλος που καλούνται να παίξουν τα μητροπολιτικά δίκτυα παρουσιάζει πολλές τεχνολογικές προκλήσεις, ειδικά αν λάβουμε υπόψη την ύπαρξη σε ευρεία κλίμακα δικτύων SONET/SDH σε μητροπολιτικές περιοχές. Αυτά τα παραδοσιακά δίκτυα TDM (Time Division Multiplexing) σχεδιάστηκαν για τη μεταφορά κυρίως φωνής και υπηρεσιών ιδιωτικών γραμμών. Εντούτοις, η σημερινή μητροπολιτική αγορά οδηγείται από την ανάγκη για εκσυγχρονισμό και απλοποίηση των δικτύων πιεζόμενη από τις αυξανόμενες απαιτήσεις για εύρος ζώνης. Έτσι, δημιουργήθηκε μια ισχυρή τάση για μεταπήδηση από την υπάρχουσα αρχιτεκτονική που βασίζεται στο SONET-SDH σε ένα πιο δυναμικό, έξυπνο δίκτυο πολλαπλών υπηρεσιών. Αυτό θα επιτρέψει στους παροχείς υπηρεσιών να αποφύγουν τις πολυδάπανες αναβαθμίσεις της υπάρχουσας αρχιτεκτονικής ή την εγκατάσταση νέων οπτικών καλωδίων, κάτι που εκτός από πολυδάπανο είναι και σε πολλές περιπτώσεις πρακτικά ανέφικτο.