



Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση και συγκριτική μελέτη MPSK και QAM διαμορφώσεων σε περιβάλλον
Matlab/AWR**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΣΑΚΚΟΥΛΗ ΜΑΡΙΝΑ

ΑΜ: 838

ΘΕΟΔΟΣΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

ΑΜ:694

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΜΙΧΑΛΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΝΑΥΠΑΚΤΟΣ 2014

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	6
1.2 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	8
1.3 ΣΗΜΑΤΑ	13
1.3.1 Παραδείγματα σημάτων : Σήματα εικόνας	13
1.3.2 Τετραγωνικό σήμα	15
1.4 ΤΥΠΟΙ ΣΗΜΑΤΩΝ.....	15
1.4.1 Αναλογικά και ψηφιακά σήματα	16
1.4.1.1 Αναλογικά	16
1.4.1.2 Ψηφιακά	17
1.4.1.3 Διαφορές αναλογικών και ψηφιακών σημάτων	19
1.5 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΣΗΜΑΤΑ.....	20
1.6 Μετασχηματισμός Z.....	20
1.7 Μετατροπή σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα	23
1.7.1 Βήματα μετατροπής.....	23
1.8 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	29
2.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ	29
2.1.1 Ανάγκη για διαμόρφωση.....	30
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	32
2.2.1 Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Modulation, AM)	33
2.2.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαμόρφωσης AM	37
2.2.2 Διαμόρφωση Συχνότητας FM	37
2.2.2.1 Σύγκριση FM με την AM	41
2.2.3 Διαμόρφωση Γωνίας – PM.....	42
2.2.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαμορφωτών φάσης.	45
2.3 ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ.....	45
2.3.1 Πλεονεκτήματα Ψηφιακής Διαμόρφωσης.....	46
2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	46
2.4.1 Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους ASK (Amplitude Shift Keying)	48
2.4.1.2 Δυαδική Διαμόρφωση Πλάτους ASK (Binary Amplitude Shift Keying, BASK)	
.....	48

2.4.1.3 Διαμόρφωση ASK περιορισμένου εύρους ζώνης.....	48
2.4.1.4 Ασύμφωνη ανίχνευση.....	49
2.4.1.5 Σύμφωνη ανίχνευση	49
2.4.1.6 Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος BASK	50
2.4.1.7 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης BASK	50
2.4.1.8 Διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών επιπέδων ASK (M-ary Amplitude Shift Keying, M-ASK).....	51
2.4.1.9 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-ASK.....	52
2.4.2 Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης PSK (Phase Shift Keying).....	53
2.4.2.1 Δυαδική Διαμόρφωση Φάσης PSK (Binary Phase Shift Keying, BPSK).....	53
2.4.2.2 Παραγωγή και λήψη του σήματος BPSK.....	54
2.4.2.3 Σύμφωνη ανίχνευση	54
2.4.2.4 Αβεβαιότητα φάσης κατά την ανάκτηση του φέροντος στη διαμόρφωση PSK.	55
2.4.2.5 Διαφορική Κωδικοποίηση Δεδομένων.....	56
2.4.2.6 Διαφορική Αποκωδικοποίηση Δεδομένων.....	57
2.4.2.7 Διαφορική Διαμόρφωση Δεδομένων PSK (DPSK).....	57
2.4.2.8 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK).....	58
2.4.2.9 Παραγωγή και λήψη του σήματος QPSK.....	59
2.4.2.10 Διαφορική Διαμόρφωση QPSK (DQPSK).....	60
2.4.2.11 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης DQPSK.....	60
2.4.2.12 Η μέθοδος $\pi/4$ -QPSK	61
2.4.2.13 Διαμόρφωση φάσης πολλαπλών επιπέδων PSK (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK)	61
2.4.2.14 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-PSK.....	62
2.4.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας FSK (Frequency Shift Keying)	63
2.4.3.1 Δυαδική Διαμόρφωση Συχνότητας FSK (Binary Frequency Shift Keying, BFSK)	63
2.4.3.2 Παραγωγή και λήψη του σήματος BFSK.....	64
2.4.3.3 Ασύμφωνη ανίχνευση	65
2.4.3.4 Σύμφωνη ανίχνευση	65
2.4.3.5 Πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης FSK.....	66
2.4.3.6 Μειονεκτήματα της διαμόρφωσης FSK.....	66
2.4.3.7 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-FSK	67
2.4.3.8 Ασύμφωνη ανίχνευση της MFSK	67

2.4.3.9 Σύμφωνη Ανίχνευση	68
2.4.4 Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM/APK)	68
2.4.4.1 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-QAM	69
2.4.4.2 Ανίχνευση της QAM	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°	71
3.1 ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΑΛΤΟΥΣ (QAM)	71
3.1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη M-QAM.....	73
3.1.2 Θόρυβος.....	75
3.1.3 Φασματική γραμμή laser	75
3.1.4 Οπτικοί Διαμορφωτές QAM	75
3.1.5 Star QAM	76
3.1.6 Σειριακός Τετραγωνικός QAM Πομπός.....	77
3.2 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης –PSK	78
3.2.1 Ορθογώνια Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης -Quadrature Phase Shift Keying. 79	
3.2.2 Παραγωγή και εκπομπή PSK	80
3.2.3 Ανίχνευση και λήψη BPSK και DPSK σημάτων	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	84
4.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ QAM ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	84
4.1.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (QAM)	88
4.1.2 Προσομοίωση 16- QAM	88
4.1.3 Προσομοίωση 32- QAM	89
4.1.4 Προσομοίωση 64- QAM	90
4.1.5 Προσομοίωση 16- QAM με αυξημένο Θορυβο	90
4.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MPSK ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ.....	91
4.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (MPSK).....	94
4.2.1.1 Προσομοίωση 16- PSK	94
4.2.1.2 Προσομοίωση 32- PSK	95
4.2.1.3 Προσομοίωση 64- PSK	95
4.2.1.4 Προσομοίωση 16- PSK με αυξημένο Θορυβο	96
4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ.....	97
4.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	98
Συμπεράσματα.....	99
ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το τέλος της παρούσας πτυχιακής εργασίας σηματοδοτεί και το τέλος των προπτυχιακών μας σπουδών. Στο αυτό σημείο αισθανόμαστε την ανάγκη να απευθύνουμε ευχαριστίες στα άτομα που μας βοήθησαν και χωρίς τη βοήθειά τους πιθανόν να μην ήταν δυνατή η εκπόνησή της.

Καταρχάς, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή μας κ. Μιχάλη Παρασκευά (Επίκουρο Καθηγητή στο τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων & Δικτύων του ΤΕΙ Μεσολογγίου) για την επίβλεψη της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές του και την συμπαράστασή του ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Κλείνοντας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε από τα βάθη της καρδιάς μας τις οικογένειές μας που χωρίς την ψυχική και υλική βοήθειά τους και την αμέριστη συμπαράστασή τους όποτε την χρειαζόμασταν, δε θα ήταν δυνατό να ολοκληρώσουμε τις προπτυχιακές μας σπουδές.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων, παράρτημα του ΑΤΕΙ Μεσολογγίου.

Θέμα της πτυχιακής μας εργασίας είναι : Η ανάλυση και συγκριτική μελέτη QAM και MPSK διαμορφώσεων.

Το θεωρητικό μέρος της εργασίας αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελείται από μία εισαγωγή στη θεωρία σημάτων , τις ιδιότητές και τον τρόπο μετάδοσης τους. Ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται η θεωρητική περιγραφή των αναλογικών διαμορφώσεων (AM, FM, PM) και των ψηφιακών (ASK, PSK, FSK, QAM) . Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή, μαθηματική ανάλυση και μελέτη των διαμορφώσεων QAM και PSK όπως κρίνεται απαραίτητο.

Το πρακτικό μέρος της εργασίας αφορά την προσομοίωση των ψηφιακών διαμορφώσεων QAM και MPSK στο περιβάλλον σχεδίασης AWR. Σχεδιάσαμε λοιπόν και συγκρίναμε τις παραπάνω διαμορφώσεις και σας παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της μελέτης μας.

Λέξεις κλειδιά : Διαμόρφωση, θόρυβος καναλιού, BER, M-QAM, M-PSK, AWR

ABSTRACT

Thesis theme is : Analysis and comparative study of QAM and MPSK modulations.

The theoretical part of the thesis consists of three chapters. The first chapter consists an introduction to the theory of signals, qualities and how the signals transmitted . Then follows the second one, in which we present the theoretical description of analog modulations (AM, FM, PM) and digital modulations (ASK, FSK, PSK, QAM).As a conclusion, in third chapter will be analyzed detailed description, mathematical analysis and study of QAM and PSK modulations as appropriate.

The practical part of the work concerns the simulation of this two digital modulations QAM and MPSK using the design environment AWR. So we designed and then compared the above configurations and we present the results of our study.

Key words : Modulation, noise channel, BER, M-QAM, M-PSK, AWR

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Επικοινωνία είναι η διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων, με την οποία ένας πομπός Α μεταβιβάζει πληροφορίες, σκέψεις, ιδέες ή συναισθήματα σε ένα δέκτη Β μέσω ενός κοινού συστήματος. Επιπρόσθετα ο πομπός μπορεί να είναι ταυτόχρονα και δέκτης, αφού και στέλνει και λαμβάνει μηνύματα, όπως επίσης και ο δέκτης είναι ταυτόχρονα και πομπός. Η επικοινωνία είναι μια έννοια συνυφασμένη με την καθημερινή ανθρώπινη δραστηριότητα, καθώς θεωρείται «ο μηχανισμός μέσω του οποίου υπάρχουν και αναπτύσσονται οι ανθρώπινες σχέσεις...». Πρόκειται για μια έννοια η οποία εμπλουτίζεται και μεταλλάσσεται συνεχώς για να καλύψει, όπως χαρακτηριστικά έλεγε ο Cooley, «..όλα τα σύμβολα του νου, μαζί με τα μέσα μεταβίβασής τους στο χώρο και διατήρησής τους στο χρόνο».

Η επικοινωνία όμως μπορεί να είναι και προσχεδιασμένη μέσω διάφορων συσκευών. Οποιαδήποτε συσκευή μας βοηθάει να επικοινωνούμε μεταξύ μας ακόμα και σε απόσταση, είναι ένα κομμάτι μιας προσχεδιασμένης επικοινωνίας η οποία γίνεται με τη βοήθεια της τηλεπικοινωνίας.

Στις επικοινωνίες αυτές όπου υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη υποχρεωνόμαστε λόγω ανεπάρκειας του μέσου μετάδοσης να αλλάζουμε την μορφή της πληροφορίας προκειμένου να τη μεταδώσουμε ορθά.

Με τον όρο τηλεπικοινωνία αναφερόμαστε στο σύνολο των μέσων και των απαραίτητων τεχνικών, που χρησιμοποιούνται για την ορθή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ δύο ή περισσότερων ανταποκριτών, οι οποίοι βρίσκονται σε οποιαδήποτε απόσταση μεταξύ τους, με σκοπό την βέλτιστη επικοινωνία με υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία κατά την μεταφορά των δεδομένων.

Οι τηλεπικοινωνίες παλιότερα περιορίζονταν σε ανταλλαγή φωνητικών μηνυμάτων. Σήμερα συνεχώς διευρύνονται και οι προς ανταλλαγή πληροφορίες ποικίλουν στη φύση και το χαρακτήρα τους. Περιοριζόμενοι στις βασικότερες πρέπει να αναφέρουμε:

- Τις ακουστικές πληροφορίες, φωνητικά ή γενικότερα ηχητικά μηνύματα -σήματα.
- Τις οπτικές εικόνες ή γενικότερα τα οπτικά μηνύματα (video) .
- Τα σήματα δεδομένων μεταξύ υπολογιστών ή μεταξύ αυτόματων μηχανών κ.α.

1.2 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διάφορες μορφές τηλεπικοινωνιών αναπτύχθηκαν, ανάλογα την εποχή, το λαό, τα μέσα, τις ανάγκες και τους σκοπούς, καθώς ήταν απαραίτητη από τότε η ανάγκη για επικοινωνία από πολύ μακριά και στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Στο μεγαλύτερο μέρος της ιστορίας της ανθρωπότητας ο έλεγχος των πληροφοριών υπήρξε πηγή ισχύος.

Τα σήματα καπνού ήταν οι πρώτη μορφή τηλεπικοινωνιών και ξεκινάνε από το 1200 π.Χ όπου ο Όμηρος αναφέρει στην Ιλιάδα σήματα φωτιάς στις κορυφές βουνών, τις φρυκτωρίες, προκειμένου να αναγγείλουν την πτώση της Τροίας στις Μυκήνες. Συνέχισαν να χρησιμοποιούνται για στρατιωτικούς σκοπούς ως τους βυζαντινούς χρόνους. Το 700π.Χ την εμφάνισή τους κάνουν τα ταχυδρομικά περιστέρια στους ολυμπιακούς αγώνες για τις μεταφορές μηνυμάτων.

Η μέθοδος σηματοδότησης που επινόησαν οι Αλεξανδρινοί τεχνικοί Κλεοξένης και Δημόκλειτος το 150 π.Χ. θα μπορούσε να θεωρηθεί ο πρώτος οπτικός τηλεγράφος που αναφέρεται στην ιστορία. Το σύστημα αποτελούνταν από δύο ομάδες πυρσών. Συνδυασμοί αναμμένων πυρσών αντιστοιχούσαν στα διάφορα γράμματα. Η χρήση του καθρέπτη (Ηλιογράφος) από τον Ρωμαίο αυτοκράτορα Τιβέριο το 37π.Χ αποτελεί επίσης μέσο διάδοσης για την αποστολή μηνυμάτων.

Η χρήση της φωτιάς ως μέσο τηλεπικοινωνίας συνεχίστηκε μέχρι τον 19^ο αιώνα, όπου πλέον το 1821 έχουμε το πρώτο μικρόφωνο και την αναπαραγωγή ήχου σε ένα πρωτόγονο μουσικό κουτί και το 1830 πια αρχίζουμε να μιλάμε για ηλεκτρισμό, παρατηρούμε όμως πως ο ηλεκτρομαγνητισμός μπορεί να κάνει περισσότερα από την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος και την ανύψωση φορτίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία. Στη συνέχεια έχουμε το 1837 την ανακάλυψη του τηλεγράφου (από τους Cooke και Wheatstone) και τον Morse να κάνει την πρώτη δημόσια επίδειξη. Το 1844 μάλιστα έχουμε και το πρώτο fax. Ο Morse στέλνει το πρώτο μήνυμα από τις αίθουσες του Ανώτατου Δικαστηρίου των ΗΠΑ, στη Βαλτιμόρη («What hath God wrought») και έτσι γεννιέται μια νέα εποχή στις τηλεπικοινωνίες. Οι δύο ακτές των ΗΠΑ ενώνονται πλέον μέσω τηλεγράφου και πλέον το 1866 έχουμε την εγκατάσταση του δεύτερου υπερατλαντικού καλωδίου τηλεγράφου μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής (το πρώτο εγκαταστάθηκε το 1858).

Με το πέρασμα των χρόνων οι τηλεπικοινωνίες εξελίσσονται. Το 1876 ο Bell και ο Grey ανακάλυψαν το γνωστό σε όλους μας τηλέφωνο. Το 1878 και το 1879 άρχισαν να εγκαθίστανται οι πρώτες τηλεφωνικές συσκευές στο Λονδίνο και το New Haven. Το 1906 η εφεύρεση της τριόδου λυχνίας κενού κατέστησε δυνατή την υλοποίηση ενισχυτών σήματος και τη μετάδοση των τηλεφωνικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Ο Samuel Morse με τον τηλεγράφο και ο Graham Bell με το τηλέφωνο ουσιαστικά έθεσαν τα θεμέλια των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών. Η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τον 20^ο αιώνα ήταν 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.

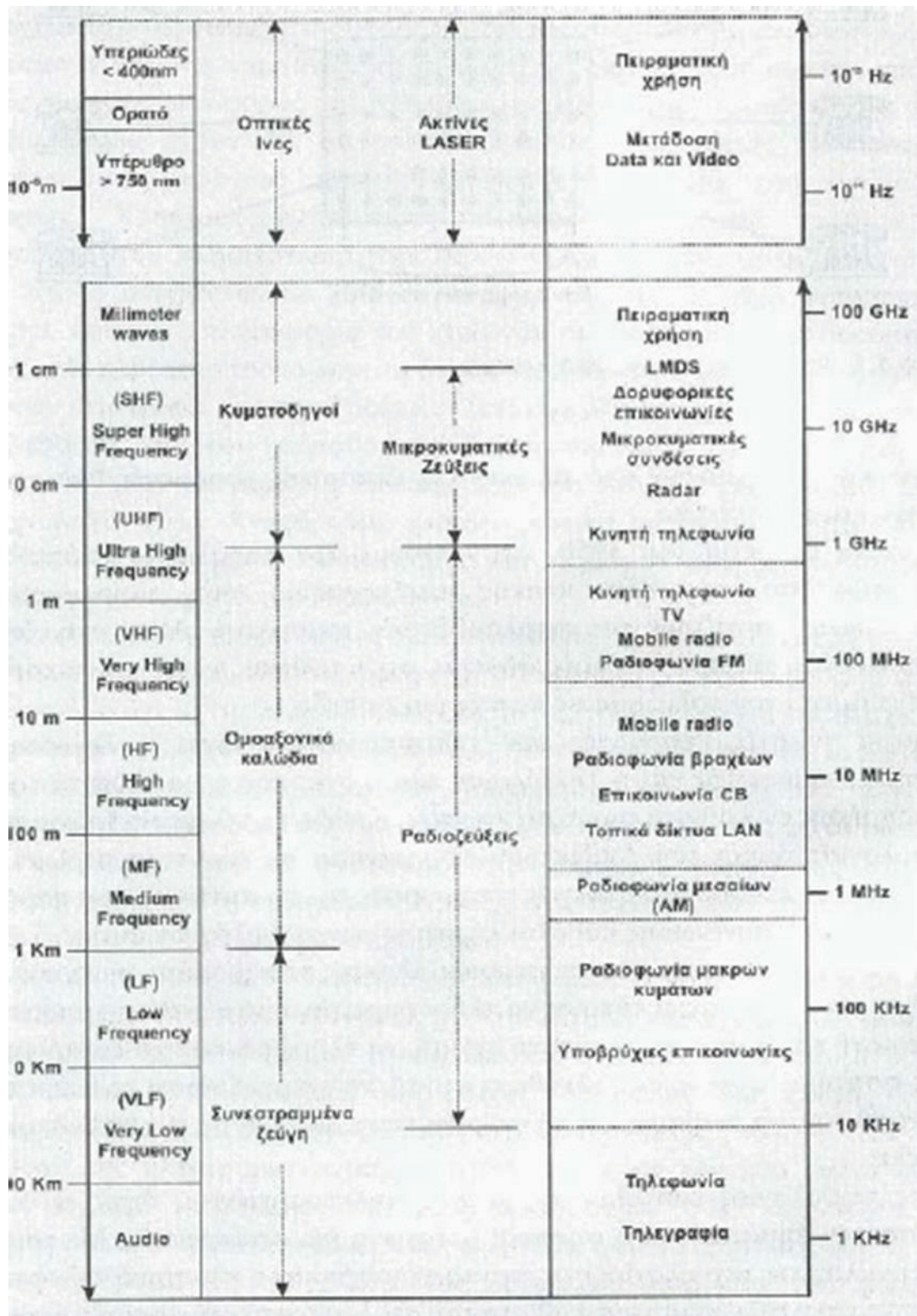
Το 1918 ο Edwin Armstrong ανακάλυψε τον πρώτο υπερετερώνυμο δέκτη AM που έδωσε σημαντική ώθηση στη ραδιοφωνία. Ο ίδιος κατασκεύασε πρώτος ένα σύστημα επικοινωνίας FM το 1933.

Μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις ήταν το πρώτο σύστημα τηλεόρασης που κατασκευάστηκε το 1929 και το 1936 ξεκίνησαν οι πρώτες τηλεοπτικές εκπομπές από τον σταθμό BBC στην Αγγλία.

Το 1962 ο Robert Hall παρουσίασε την πρώτη ημιαγωγική δίοδο LASER. Οι δίοδοι LASER και οι οπτικές ίνες αύξησαν τις ταχύτητες των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Επίσης το 1962 τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Telstar I που χρησιμοποιήθηκε για την αναμετάδοση σήματος TV μεταξύ ΗΠΑ και Ευρώπης. Το 1965 εκτοξεύθηκε ο Early Bird, ο πρώτος εμπορικός τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος.

Το ευρέως διαδεδομένο σε όλους μας Internet προέκυψε από τη χρηματοδότηση της Darpa τη δεκαετία του 70. Το 1975 υλοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή επικοινωνίας μεταξύ δικτύων TCP/IP. Τέλος από τα σημαντικότερα επιτεύγματα ήταν και είναι η κινητή τηλεφωνία GSM το 1991.



Σχήμα 1.1 Κατανομή εφαρμογών στο φάσμα των συχνοτήτων

Όταν αρχίζει να εφαρμόζεται η μικροηλεκτρονική, οι τηλεπικοινωνίες αλλάζουν πρόσωπο, και ιδιαίτερα από τη δεκαετία του 1950 που έχουμε παράλληλα και την ανάπτυξη των υπολογιστών και της ηλεκτρονικής επεξεργασίας των πληροφοριών. Οι τηλεπικοινωνίες καταλαμβάνουν τόσο σημαντική θέση στην καθημερινότητα των ανθρώπων που άμεσα πλέον επηρεάζουν τον πολιτισμό σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, γνωστές λόγω της μαζικότητας της χρήσης τους, στις μέρες μας είναι η *Τηλεφωνία*, το *Διαδίκτυο (Internet)*, και η *Τηλεόραση*. Όσο χρόνο με τον χρόνο αυξάνεται η χρήση των υπολογιστών και του Διαδικτύου και διαδίδεται σε ευρύτερα στρώματα του πληθυσμού, τόσο αναπτύσσονται συνεχώς νέες μορφές τηλεπικοινωνιών.

Η λειτουργία της κλασικής τηλεφωνίας, του ραδιοφώνου και της τηλεόρασης στηρίχθηκε στις αναλογικές τεχνολογίες οι οποίες με το πέρασμα των χρόνων, αντικαταστάθηκαν σταδιακά από τη ψηφιακή μετάδοση σημάτων και την ψηφιακή μεταγωγή και επεξεργασία αυτών, τεχνολογία η οποία αναπτύχθηκε κυρίως από τις επικοινωνίες *data*.

Παράλληλα έχουμε και την εξέλιξη των μέσων μετάδοσης, της υποδομής (οπτικές ίνες, δορυφορικές ζεύξεις κτλ) και των τεχνικών μετάδοσης (multiplexing, compression εκπομπή, 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 βοηθάται από τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας.

Παρακάτω εξηγούμε κάποιες από τις βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται συχνά στο χώρο των τηλεπικοινωνιών:

Πληροφορία: είναι μια αλληλουχία συμβόλων, που είτε καταγράφονται είτε μεταδίδονται. Στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών, με τον όρο πληροφορία, εννοούμε κάθε οργανωμένο σήμα.

Δεδομένα *data*: είναι ο συμβολισμός που αναπαριστά την κωδικοποιημένη μορφή της πληροφορίας με τη μορφή γραμμάτων ή συμβόλων. Η κωδικοποίηση γίνεται ψηφιακά με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστήσει τη πληροφορία κατάλληλη για επεξεργασία, αποθήκευση ή μετάδοση.

Μετάδοση δεδομένων (*data transmission*): είναι η μετακίνηση της πληροφορίας μέσα από φυσικά κανάλια μετάδοσης.

Επικοινωνία δεδομένων: είναι η λειτουργία εκπομπής ή κωδικοποίησης της πληροφορίας, περιέχει τον έλεγχο της μετάδοσης ως προς τη φορά, την ορθότητα αλλά και τους κανόνες που πρέπει να διέπουν συστήματα ανταλλαγής πληροφοριών.

Με τον όρο Επικοινωνίες Δεδομένων εννοούμε την ανταλλαγή πληροφοριών υπό μορφή data μεταξύ υπολογιστικών και τεματικών σταθμών. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η διάκριση μεταξύ των επικοινωνιών data και των άλλων μρφών, δηλαδή φωνής, εικόνας κλπ. είναι το τι μεταφέρεται και όχι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται. Ο ψηφιακός τρόπος μετάδοσης που χρησιμοποιούνταν μέχρι τώρα σχεδόν αποκλειστικά για τη μεταφορά data, σήμερα χρησιμοποιείται και για μεταφορά φωνής και εικόνας (αναλογικές πηγές πληροφορίας). Η στροφή αυτή οφείλεται στα πλεονεκτήματα της ψηφιακής επικοινωνίας, όπως αυξημένη ανοχή στο θόρυβο και χαμηλό κόστος ηλεκτρικών κυκλωμάτων.



Σχήμα 1.2 Επικοινωνίες δεδομένων

1.3 ΣΗΜΑΤΑ

Ο όρος *σήμα* είναι μια από τις βασικότερες έννοιες για τις τηλεπικοινωνίες καθώς αντιπροσωπεύει την πληροφορία που μεταδίδεται από ένα σημείο του χώρου, που λέγεται πηγή, σε ένα άλλο και παραλαμβάνεται από οποιονδήποτε δέκτη ύστερα από μια συγκεκριμένη επεξεργασία που έχει υποστεί ανάλογα με το είδος της επικοινωνίας και του μέσου μέσω του οποίου έχει μεταδοθεί. Το σήμα ξεκινώντας από τον πομπό, αφού επεξεργαστεί κατάλληλα, μεταφέρεται μέσω καλωδίου ή ασύρματα και καταλήγει στον παραλήπτη- δέκτη. Ο δέκτης με τη σειρά του κατέχει κάποιο σύστημα λήψης μέσα στο οποίο το σήμα θα υποστεί μια εκ νέου επεξεργασία ώστε να λάβει τελικά ο δέκτης το αρχικό σήμα που εξέμπεμψε ο πομπός.

Ως σήμα ορίζεται ένα φυσικό μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο ή το χώρο ή με οποιαδήποτε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή ή μεταβλητές.

1.3.1 Παραδείγματα σημάτων : Σήματα εικόνας

Σήματα ομιλίας

Σεισμικά σήματα

Ιατρικά σήματα

Από μαθηματική άποψη, ένα σήμα εκφράζεται ως συνάρτηση μιας η περισσότερων ανεξαρτητών μεταβλητών.

$$t \rightarrow x(t)$$

Η ανεξάρτητη μεταβλητή t είναι συνήθως ο χρόνος, ή οποια μπορεί να έχει και άλλη φυσική σημασία.

Με $x(t)$ συμβολίζεται η τιμή του σήματος τη χρονική στιγμή t .

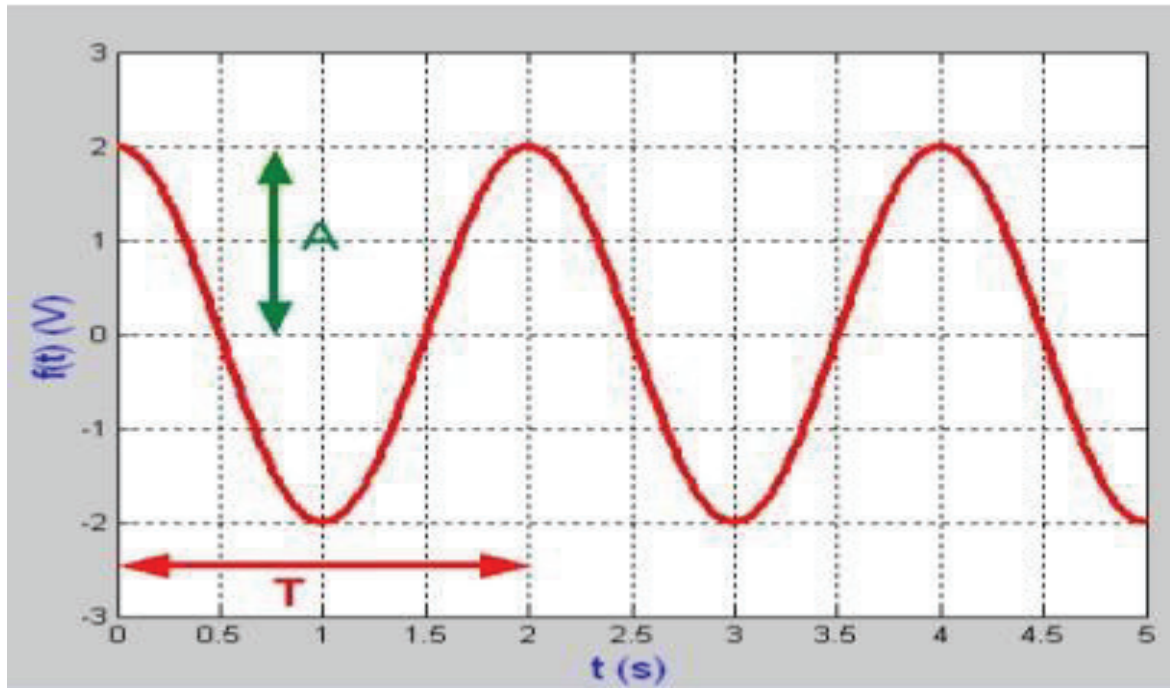
Τα σήματα περιέχουν πληροφορία σχετικά με την συμπεριφορά ή τη φύση ενός φαινομένου.

Δύο βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών σημάτων είναι η έντασή τους και ο ρυθμός τους. Η ένταση των ηλεκτρικών σημάτων μας διευκολύνει στο να κατατάσσουμε τα σήματα σε ισχυρότερα ή ασθενέστερα. Ο ρυθμός δείχνει την ταχύτητα των σημάτων στον χρόνο, τις εναλλαγές της τιμής των σημάτων κάθε χρονική στιγμή και το κατά πόσο είναι απότομα ή όχι.

Τα σήματα διακρίνονται σε περιοδικά και μη περιοδικά. Ως περιοδικό ορίζεται το σήμα που επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η μαθηματική παράσταση ενός περιοδικού σήματος είναι $f(t)=f(t+nT)$. Δηλαδή, ένα σήμα θεωρείται περιοδικό όταν ισχύει η παραπάνω εξίσωση για κάθε χρόνο t και κάθε ακέραιο αριθμό n . Ένα περιοδικό σήμα μπορεί να διακριθεί σε ημιτονοειδές ή σε

τετραγωνικό σήμα. Το ημιτονοειδές σήμα αναπαριστά σήμα αναλογικών συστημάτων ενώ το τετραγωνικό συνήθως αναπαριστά σήμα ψηφιακών συστημάτων.

Ημιτονοειδές σήμα



Σχημα 1.3 Γραφική παράσταση ημιτονοειδούς σήματος

Ισχύει $f(t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)$ όπου:

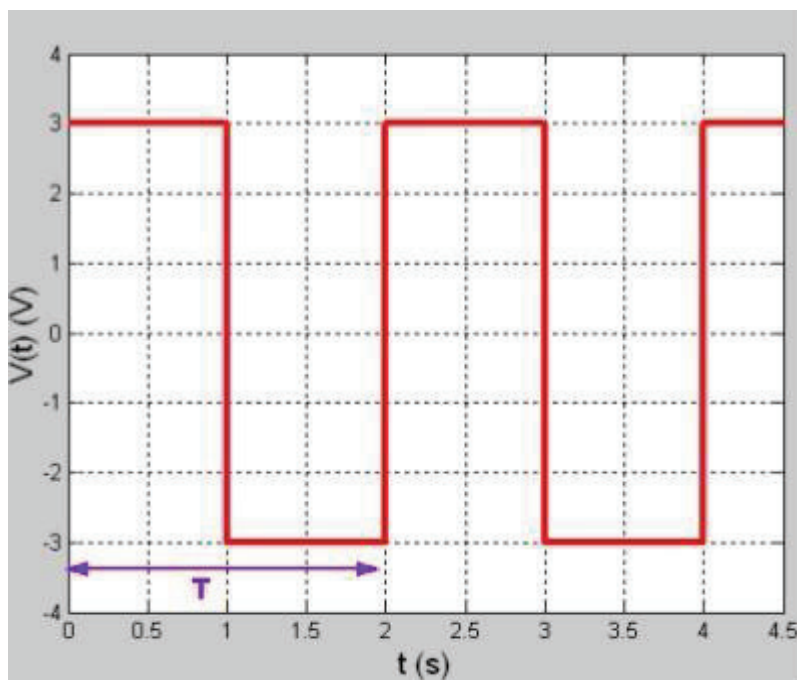
A: πλάτος (amplitude)

f: συχνότητα (frequency)

φ : φάση (phase)

T ($f=1/T$): περίοδος (period)

1.3.2 Τετραγωνικό σήμα



Σχημα 1.4 Γραφική παράσταση τετραγωνικού σήματος

Το σήμα μεταβάλλεται από τη μέγιστη του τιμή στην ελάχιστη σε χρόνο μηδέν (ιδανική περίπτωση). Σε αυτό το παράδειγμα η εξίσωση του σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$v(t) = \begin{cases} 3 & \text{για } 0 < t < T/2 \\ -3 & \text{για } T/2 < t < T \end{cases}$$

1.4 ΤΥΠΟΙ ΣΗΜΑΤΩΝ

Τα σήματα χωρίζονται και σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο και το πλήθος των μεταβλητών. Έτσι, ανάλογα με το αν η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι συνεχής ή διακριτή, έχουμε σήματα συνεχούς ή διακριτού χρόνου.

Ανάλογα με το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών έχουμε σήματα μιας μεταβλητής ή διάστασης (μονοδιάστατα, 1-D), δύο μεταβλητών ή διαστάσεων και πολλών μεταβλητών ή διαστάσεων (πολυδιάστατα, N-D). Παράδειγμα μονοδιάστατου σήματος είναι η ομιλία (speech), όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο χρόνος και η εξαρτημένη μεταβλητή η ακουστική πίεση.

Μια εικόνα (φωτογραφία) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα σήματος δύο διαστάσεων. Εδώ η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η φωτεινότητα της εικόνας και οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές είναι οι δύο χωρικές συντεταγμένες. Τέλος, παράδειγμα σήματος τριών διαστάσεων είναι η ακολουθία εικόνων (video) όπου οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές είναι χωρικές και η τρίτη είναι ο χρόνος.

Η εξαρτημένη μεταβλητή είναι και εδώ η φωτεινότητα της κάθε εικόνας.

Καθένα από τα παραπάνω σήματα είναι απαραίτητο να το επεξεργαστούμε με στόχο να βελτιώσουμε την ποιότητά του, να εξάγουμε την χρήσιμη πληροφορία και να εξαλείψουμε κατά το δυνατόν τον θόρυβο, να το αποθηκεύσουμε ή να το μεταδώσουμε.

Συνήθως, ως ανεξάρτητη μεταβλητή χρησιμοποιείται ο χρόνος, χωρίς όμως να αποκλείεται η ανεξάρτητη μεταβλητή να είναι κάποιο άλλο φυσικό μέγεθος, όπως για παράδειγμα η απόσταση, η θερμοκρασία ή η πίεση. Παρ' όλα αυτά έχει επικρατήσει να μιλάμε για σήματα διακριτού χρόνου.

1.4.1 Αναλογικά και ψηφιακά σήματα

1.4.1.1 Αναλογικά

Ένα αναλογικό σήμα είναι μια χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή δεδομένων ή όπως είναι ο ορισμός του, μια ομαλά μεταβαλλόμενη τιμή ηλεκτρικής τάσης ή έντασης ρεύματος (δηλ. ένα σήμα με πλάτος χρονικά μεταβαλλόμενο) η οποία μπορεί να περιγραφεί από μια μαθηματική συνάρτηση, με το χρόνο να αποτελεί την ανεξάρτητη και την τιμή του σήματος, κάθε χρονική στιγμή, την εξαρτημένη μεταβλητή. Ένα διακριτό σήμα είναι το αποτέλεσμα που παίρνουμε μέσω της μεθόδου της δειγματοληπτικής μείωσης από το αρχικό αναλογικό σήμα : δηλαδή, η τιμή των δεδομένων σημειώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. μικροδευτερόλεπτο) και όχι συνεχώς (όπως είναι εκ φύσεως τα μηχανικά κύματα).

Στα σήματα συνεχούς χρόνου (continuous time) η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι συνεχής, δηλαδή τα σήματα αυτά ορίζονται για οποιαδήποτε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής. Η εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή το πλάτος (amplitude) του σήματος, είναι και αυτή συνεχής.

Γι' αυτό και τα σήματα αυτά αναφέρονται και ως σήματα συνεχούς χρόνου συνεχούς πλάτους ή αναλογικά σήματα. Παραδείγματα τέτοιων σημάτων είναι η ομιλία ως συνάρτηση του χρόνου ή η ατμοσφαιρική πίεση ως συνάρτηση του ύψους. Ένα αναλογικό σήμα περιγράφεται ως μια συνάρτηση $x(t)$, όπου t πραγματικός αριθμός.

Αν οι ατομικές τιμές του σήματος αντί να μετρηθούν επακριβώς, επάνω στον άξονα του χρόνου, είναι εναρμονισμένες με κάποια ορισμένη ακρίβεια, τότε η ροή δεδομένων που προκύπτει είναι το ψηφιακό σήμα. Η διαδικασία προσέγγισης αυτής της ακρίβειας (δηλ. μιας συγκεκριμένης τιμής), μέσα από έναν σταθερό αριθμό ψηφίων (δηλ. bit) ονομάζεται ψηφιοποίηση.

1.4.1.2 Ψηφιακά

Σε γενικές γραμμές, ένα ψηφιακό σήμα είναι ένα ψηφιοποιημένο σήμα διακριτού χρόνου. Το διακριτό σήμα είναι το αποτέλεσμα της επεξεργασίας ενός αναλογικού σήματος με τη μέθοδο της δειγματοληπτικής μείωσης.

Ο όρος ψηφιακό σήμα αναφέρεται σε περισσότερες από μια έννοιες. Μπορεί να αναφέρεται σε ένα σήμα διακριτού χρόνου το οποίο μπορεί να πάρει συγκεκριμένες (διακριτές) τιμές στον άξονα του χρόνου. Σε αυτή τη περίπτωση μιλάμε για ένα σήμα το οποίο παράγεται μέσω μιας μεθόδου ψηφιακής διαμόρφωσης και θεωρείται περισσότερο ως αναλογικό σήμα (δηλ. ένα επεξεργασμένο αναλογικό σήμα για τη μετατροπή του σε ψηφιακό).

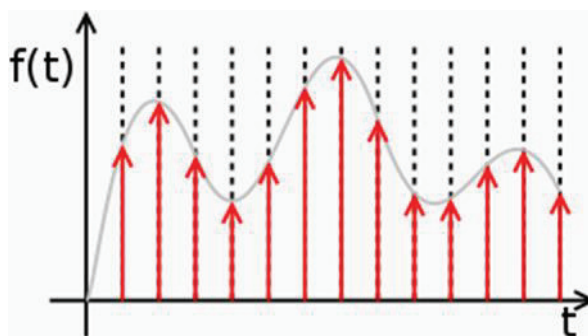
Μπορεί επίσης να αναφέρεται στην κυματομορφή ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε ένα ψηφιακό σύστημα το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί σε μια αλληλουχία από bits. Σε αυτή τη περίπτωση μιλάμε για ένα εξ ολοκλήρου ψηφιακό σήμα.

Στα σήματα διακριτού χρόνου (discrete time) η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι διακριτή, δηλαδή τα σήματα αυτά ορίζονται μόνο για συγκεκριμένες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Με άλλα λόγια, η ανεξάρτητη μεταβλητή παίρνει τιμές από ένα διακριτό σύνολο τιμών. Η εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή το πλάτος του σήματος, είναι συνεχής. Γι' αυτό και τα σήματα αυτά αναφέρονται και ως σήματα διακριτού χρόνου συνεχούς πλάτους. Παραδείγματα τέτοιων σημάτων είναι ο δείκτης Dow-Jones ως συνάρτηση του χρόνου (π.χ. ανά ημέρα) ή το κατά κεφαλήν εισόδημα ως συνάρτηση του τόπου διαμονής. Στη περίπτωση που και η εξαρτημένη

μεταβλητή παίρνει διακριτές τιμές, τότε μιλάμε για σήματα διακριτού χρόνου διακριτού πλάτους ή ψηφιακά σήματα. Ένα σήμα διακριτού χρόνου περιγράφεται ως $x(n)$, όπου n ακέραιος. Πρόκειται για μία ακολουθία (sequence) αριθμών, γι' αυτό συχνά αναφερόμαστε στο σήμα αυτό και ως ακολουθία.

Η Ψηφιακή Επανάσταση έχει αυξήσει κατακόρυφα τη χρήση ψηφιακών σημάτων. Οι περισσότερες-αν όχι όλες, οι σύγχρονες συσκευές ειδικότερα αυτές που συνδέονται στους υπολογιστές, χρησιμοποιούν ψηφιακά σήματα για την αναπαράσταση σημάτων τα οποία παραδοσιακά αναπαριστώνται ως σήματα συνεχούς χρόνου. Κινητά τηλέφωνα, συσκευές αναπαραγωγής βίντεο και ήχου, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές είναι μερικά παραδείγματα. Οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας, όπως για παράδειγμα τις επικοινωνίες, την αεροναυτική, τη σεισμολογία, τη βιοϊατρική τεχνολογία.

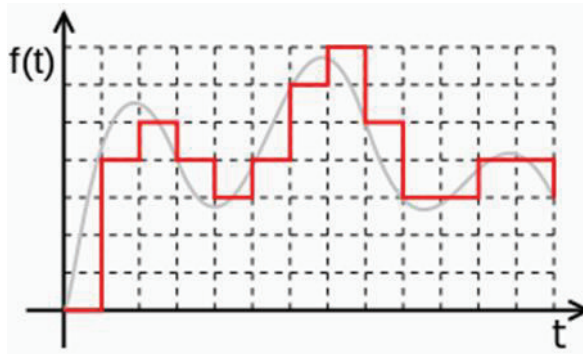
Σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές, τα ψηφιακά σήματα αναπαριστώνται μέσω των δυαδικών αριθμών, έτσι ώστε να μπορούν να μετρηθούν σε bit. Επειδή 7 bits (δυαδικά ψηφία) μπορούν να καταγράψουν 128 διακριτές τιμές (0 έως 127), αυτό το σύστημα είναι το πιο ικανό από οποιοδήποτε άλλο για να εκφραστεί ένα τεράστιο πλήθος τιμών.



Σχημα 1.5 Σήμα Διακριτού χρόνου

Το σήμα του ρολογιού είναι ένα ειδικό ψηφιακό σήμα το οποίο χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό των ψηφιακών κυκλωμάτων. Στην εικόνα 1.3 φαίνεται η συγκεκριμένη κυματομορφή. Οι λογικές αλλαγές ενεργοποιούνται είτε από την αύξηση είτε από την μείωση του σήματος. Στο διπλανό διάγραμμα βλέπουμε ένα παράδειγμα του πρακτικού παλμού. Έτσι, όταν λέμε:

- Αύξηση του σήματος : εννοούμε την διαδικασία της μετάβασης από χαμηλή σε υψηλή τάση.
- Μείωση του σήματος : εννοούμε την διαδικασία της μετάβασης από υψηλή σε χαμηλή τάση.



Σχημα 1.6 Ψηφιακό σήμα

1.4.1.3 Διαφορές αναλογικών και ψηφιακών σημάτων

Η βασική διαφορά που υφίσταται ανάμεσα στα αναλογικά και στα ψηφιακά σήματα, είναι το είδος των τιμών που μπορεί να λάβει το πλάτος του σήματος. Στην περίπτωση των αναλογικών σημάτων, τα οποία αναπαρίστανται ως χρονικά μεταβαλλόμενες κυματομορφές, το πλάτος του σήματος σε κάθε χρονική στιγμή, μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, ανάμεσα σε δύο ακραίες τιμές οι οποίες υπαγορεύουν και το μέγιστο πλάτος του σήματος. Αντίθετα στην περίπτωση των ψηφιακών σημάτων, το πλάτος του σήματος μπορεί να πάρει μόνο μερικές διακριτές τιμές. Στις πιο πολλές περιπτώσεις το ψηφιακό σήμα μπορεί να έχει μόνο δύο τιμές τάσης, εκ των οποίων η μία τιμή αναπαριστά το δυαδικό 0, ενώ η άλλη, το δυαδικό 1.

Χαρακτηριστικό των ψηφιακών σημάτων είναι το μεγάλο φασματικό τους εύρος, με αποτέλεσμα να μεταδίδονται δύσκολα μέσα από το τηλεφωνικό δίκτυο. Ιδιαίτερη περίπτωση αποτελούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα των ορατών συχνοτήτων, που διακινούνται με οπτικές ίνες.

1.5 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΣΗΜΑΤΑ

Από τη Φυσική γνωρίζουμε ότι η συχνότητα σχετίζεται με ένα τύπο περιοδικής κίνησης, η οποία ονομάζεται αρμονική ταλάντωση, και η οποία περιγράφεται από ημιτονοειδείς συναρτήσεις. Η έννοια της συχνότητας σχετίζεται άμεσα με την έννοια του χρόνου, αφού η διάσταση αυτής είναι το αντίστροφο του χρόνου. Κατά συνέπεια, η φύση του χρόνου (συνεχής ή διακριτή) αναμένεται να επηρεάζει την φύση της συχνότητας.

Ο πιο συχνός σκοπός της ανάλυσης σημάτων στο πεδίο της συχνότητας είναι η ανάλυση ιδιοτήτων του σήματος. Ο μηχανικός μπορεί να μελετήσει το φάσμα των συχνοτήτων για να εντοπίσει ποιες συχνότητες υπάρχουν στο σήμα εισόδου.

Εκτός από την πληροφορία της συχνότητας συχνά χρειάζεται και η πληροφορία της φάσης. Αυτή μπορεί να δοθεί από τον μετασχηματισμό Φουριέ και το πώς μεταβάλλεται μαζί με την συχνότητα μπορεί να είναι σημαντικό σε πολλές εφαρμογές.

Το φιλτράρισμα μπορεί να γίνει με τον μετασχηματισμό στο πεδίο της συχνότητας, εφαρμογή του φίλτρου και μετασχηματισμό πίσω στο πεδίο του χρόνου. Αυτή είναι μια γρήγορη λειτουργία με πολυπλοκότητα $O(n \log n)$ και μπορεί στην πράξη να αποδώσει όλα τα φίλτρα.

Υπάρχουν κάποιοι μετασχηματισμοί στο πεδίο της συχνότητας που χρησιμοποιούνται συχνά. Για παράδειγμα, το κέψτρον (cepstrum) μετατρέπει ένα σήμα στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Φουριέ, παίρνει τον λογάριθμο και στη συνέχεια εφαρμόζει άλλον έναν μετασχηματισμό Φουριέ. Αυτό δίνει έμφαση στις συχνότητες με μικρότερο μέγεθος ενώ διατηρεί τη διάταξη των μεγεθών σε όλες τις συχνότητες.

Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας αποκαλείται επίσης ανάλυση φάσματος (spectrum analysis, spectral analysis).

1.6 Μετασχηματισμός Z

Αν και τα αναλογικά φίλτρα συνήθως αναλύονται με βάση τη συνάρτηση μεταφοράς τους στο πεδίο των μετασχηματισμών Laplace, τα ψηφιακά φίλτρα αναλύονται στο πεδίο των μετασχηματισμών Z. Ένα ψηφιακό φίλτρο μπορεί να περιγραφεί στο πεδίο Z από το χαρακτηριστικό σύνολο μηδενικών και πόλων. Το πεδίο Z παρέχει έναν τρόπο αντιστοίχισης της ψηφιακής συχνότητας (δείγματα/δευτερόλεπτο) σε πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες z , όπου για

συνεχή περιοδικά σήματα και f_s (είναι η ψηφιακή συχνότητα). Αυτό είναι χρήσιμο για την οπτικοποίηση της απόκρισης συχνότητας ενός ψηφιακού συστήματος ή σήματος.

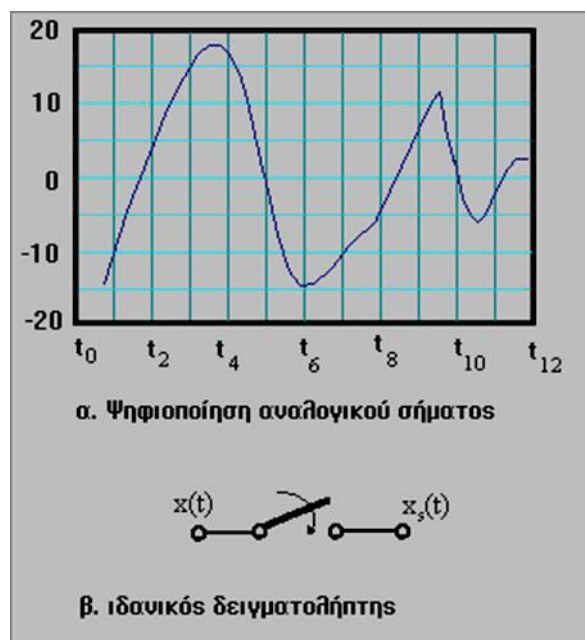
Ο μετασχηματισμός $-z$ (MZ) ενός σήματος $x(n)$ διακριτού χρόνου ορίζεται ως:

$$X(z) \triangleq \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]z^{-n}$$

Όπου z μια μιγαδική μεταβλητή.

Τα σήματα που συνήθως παίρνουμε είναι υπό αναλογική μορφή, δηλ. υπό συνεχή μορφή (π.χ. τηλεόραση, ραδιοφωνία, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, σήματα από σεισμική δόνηση, κ.τ.λ.). Τα σήματα αυτά μπορούμε να τα μετατρέψουμε σε μια ακολουθία αριθμών. Κάθε αριθμός παριστάνει την ανάγνωση ή το πλάτος του σήματος σε ορισμένη χρονική στιγμή. Τα σημεία του χρόνου διαλέγονται ισαπέχοντα.

Η μέθοδος της μετατροπής ενός συνεχούς σήματος σε μια ακολουθία αριθμών σε ίσα χρονικά διαστήματα, ονομάζεται κβαντοποίηση ή ψηφιοποίηση. Το σχήμα (Εικόνα 1.5) δείχνει ένα σήμα που ψηφιοποιήθηκε. Η ψηφιοποίηση έγινε και κατά τον κατακόρυφο άξονα, που είναι το πλάτος του σήματος και κατά το χρόνο. Η ψηφιοποίηση ως πλάτος γίνεται με αναλογικό ψηφιακό μετατροπέα, ενώ ως προς το χρόνο γίνεται με δειγματολήπτη.



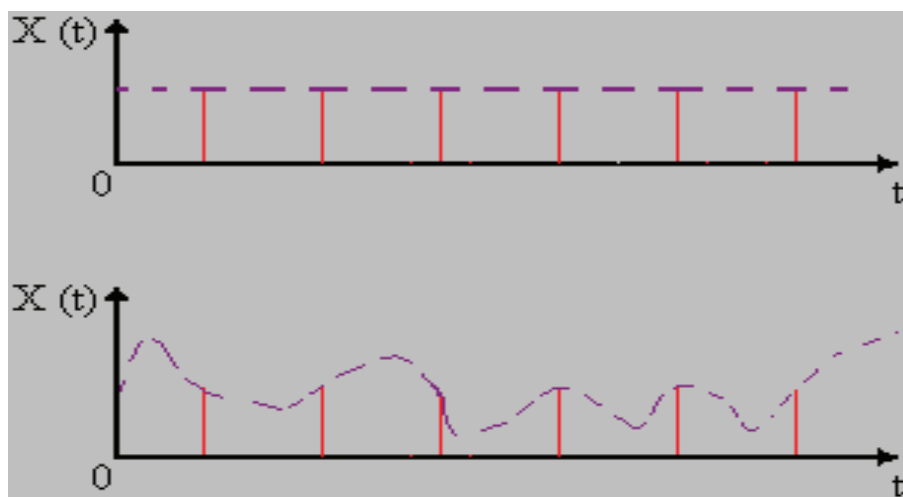
Σχημα 1.7 Δειγματοληψία

Όταν η είσοδος του δειγματολήπτη είναι συνεχής συνάρτηση $x(t)$, η έξοδος του δειγματολήπτη θα είναι μια σειρά μοναδιαίων παλμών διαμορφωμένων κατά πλάτος που σχετίζονται με το $x(t)$, ως εξής:

$$x_s(t) = x(t) \cdot D(t)$$

Ένα από τα μειονεκτήματα του μετασχηματισμού z είναι ότι δίνει πληροφορία για τη συνεχή συνάρτηση χρόνου μόνο κατά τις χρονικές στιγμές των δειγματοληψιών, δηλ. η $X(z)$ ορίζει μόνο τη $x_s(t)$. Αν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι υψηλή, τουλάχιστον διπλάσια της υψηλότερης συχνότητας του σήματος (θεώρημα της δειγματοληψίας του Nyquist), το συνεχές σήμα αποκαλύπτεται χωρίς παραμόρφωση από τον ιδανικό δειγματολήπτη, εφόσον είναι περιορισμένης ζώνης. Δηλ. ο μετασχηματισμός z , $X(z)$, μεταφέρει όλες τις πληροφορίες που έχει ο μετασχηματισμός Laplace.

Αν, όμως, δε γνωρίζουμε τίποτα από τα χαρακτηριστικά της $x(t)$, ο αντίστροφος μετασχηματισμός δεν είναι ιδανικός. Σ' αυτή την περίπτωση η διακεκριμένη συνάρτηση του χρόνου $x_s(t)$, που λαμβάνουμε από τη $X(z)$, παριστάνει οποιαδήποτε συνάρτηση $x(t)$ η οποία έχει την ίδια τιμή της $x_s(t)$ στους χρόνους της δειγματοληψίας.



Σχήμα 1.8 Διαφορετικές συναρτήσεις χρόνου με τον ίδιο μετασχηματισμό z

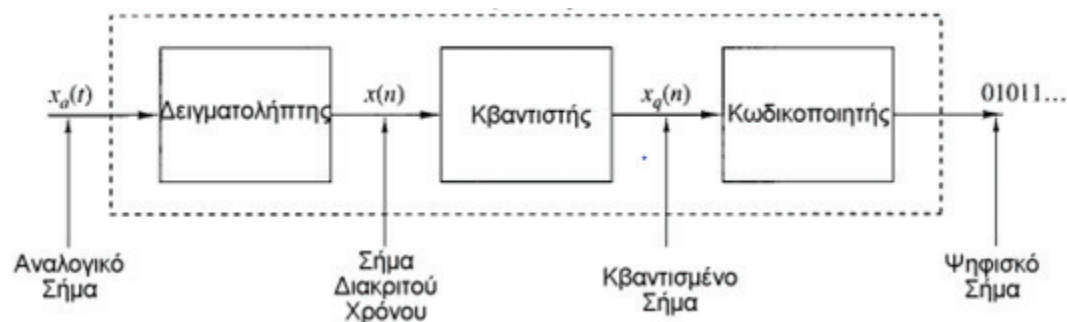
Στο σχήμα (Εικόνα 1.6) φαίνονται δύο τελείως διαφορετικές συναρτήσεις χρόνου με τον ίδιο μετασχηματισμό z . Ο μόνος τρόπος να ξεχωρίσουμε τις δύο αυτές συναρτήσεις, από τη σκοπιά του μετασχηματισμού z , είναι να προσδιορίσουμε τις κυματομορφές των σημάτων μεταξύ των δειγματοληψιών. Για το σκοπό αυτό έχουν

αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι. Οι πιο διαδεδομένες είναι η μέθοδος των υποπολλαπλασίων δειγματοληψιών και ο τροποποιημένος μετασχηματισμός z.

1.7 Μετατροπή σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα

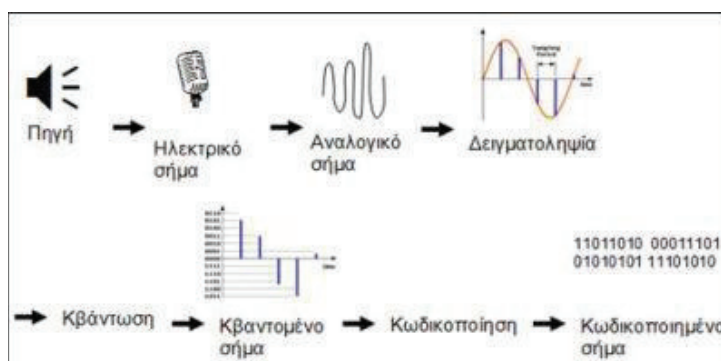
Τα περισσότερα σήματα που παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον, όπως για παράδειγμα η ομιλία, τα βιολογικά σήματα, τα σεισμικά σήματα, κ.ά., είναι αναλογικά. Για να επεξεργαστούμε αναλογικά σήματα με ψηφιακά μέσα, απαιτείται η μετατροπή αυτών σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή η μετατροπή τους σε μία ακολουθία αριθμών πεπερασμένης ακρίβειας.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μετατροπή αναλογικού-σε-ψηφιακό (analog-to-digital conversion, A/D) και τα αντίστοιχα κυκλώματα ονομάζονται μετατροπείς αναλογικού-σε-ψηφιακό (analog-to-digital converters, ADCs). Η αντίστροφη διαδικασία της μετατροπής ενός ψηφιακού σήματος σε αναλογικό είναι γνωστή ως μετατροπή ψηφιακού-σε-αναλογικό (digital-to-analog conversion, D/A) και γίνεται με την βοήθεια κυκλωμάτων τα οποία ονομάζονται μετατροπείς ψηφιακού-σε-αναλογικό (digital-to-analog converters, DACs).



Σχημα 1.9 Μετατροπέας A/D

1.7.1 Βήματα μετατροπής



1. Δειγματοληψία (sampling):

Αυτή είναι η διαδικασία μετατροπής ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε ένα σήμα διακριτού χρόνου, παίρνοντας δείγματα του σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτές στιγμές του χρόνου.

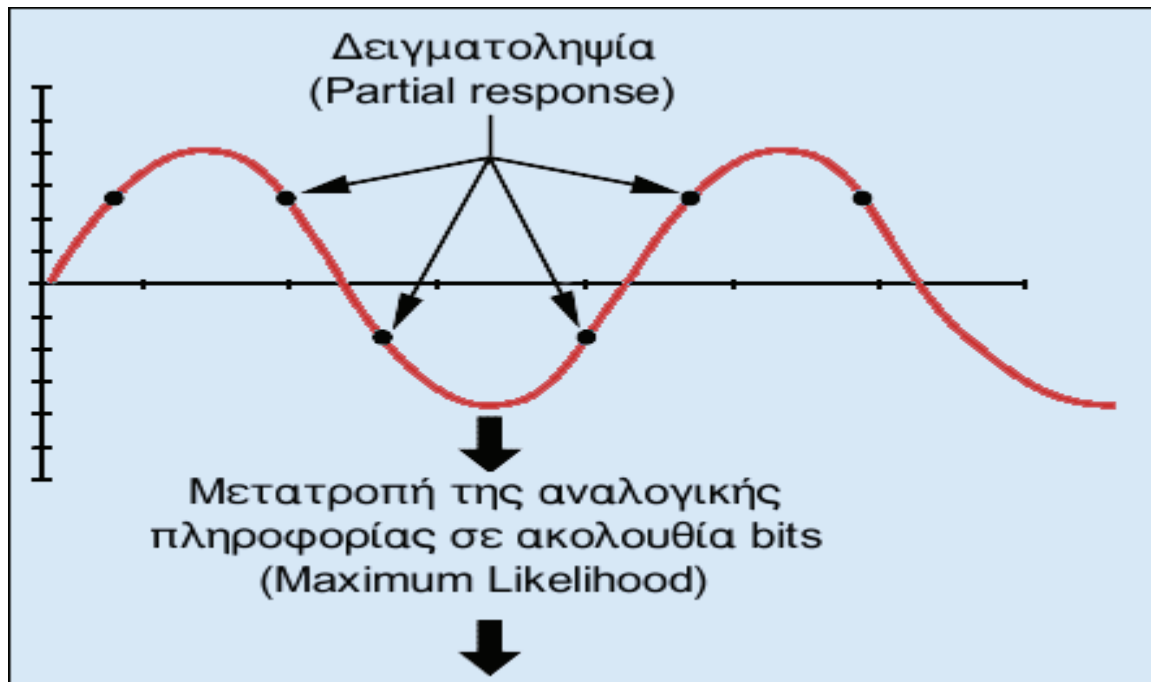
Η δειγματοληψία συνήθως γίνεται σε δύο στάδια, τη μετατροπή σε διακριτές τιμές (discretization) και τον κβαντισμό (quantization). Στο πρώτο στάδιο, το πεδίο των σημάτων χωρίζεται σε κλάσεις ισοδυναμίας και ο κβαντισμός προκύπτει από την αντικατάσταση ενός σήματος από το αντίστοιχο σήμα που αναπαριστά την κλάση ισοδυναμίας του. Στο στάδιο του κβαντισμού οι τιμές του σήματος αναπαριστώνται από τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο.

Η δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος $x_a(t)$ επιτυγχάνεται παίρνοντας δείγματα αυτού ανά T δευτερόλεπτα.

Το θεώρημα της δειγματοληψίας, το οποίο απαντά στο εξής ερώτημα: Ποιός ο ρυθμός δειγματοληψίας F_s για τη σωστή αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος το οποίο μας δίνεται; Δηλαδή, πόσο συχνά πρέπει να παίρνουμε δείγματα ώστε να έχουμε ένα πιστό αντίγραφο του αναλογικού σήματος; Η απάντηση σ' αυτό το ερώτημα δόθηκε αρχικά από τον Nyquist (1928) και στη συνέχεια από τον Shannon (1949) και αποτελεί το λεγόμενο θεώρημα δειγματοληψίας ή θεώρημα του Shannon, διατυπώνεται δε ως εξής:

Η συχνότητα F_s , με την οποία λαμβάνονται τα δείγματα ενός σήματος, πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα F_{max} που περιέχεται στο σήμα, δηλαδή $F_s \geq 2F_{max}$

Με άλλα λόγια, το θεώρημα δειγματοληψίας μας λέει πως για να μη χαθεί πληροφορία θα πρέπει να παίρνουμε τουλάχιστον δύο δείγματα ανά περίοδο (της υψηλότερης συχνότητας του σήματος). Για παράδειγμα, αν θελήσουμε να ψηφιοποιήσουμε ένα σήμα ομιλίας και χρησιμοποιούμε μικρόφωνο το οποίο λειτουργεί για συχνότητες μεταξύ 300 Hz και 3 kHz, τότε η μικρότερη συχνότητα δειγματοληψίας που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε είναι 6 kHz.



Σχημα 1.9 Ομοιόμορφη δειγματοληψία αναλογικού σήματος

2. Κβάντιση (quantisation):

Κβάντιση (quantisation) ονομάζεται η διαδικασία της μετατροπής ενός σήματος διακριτού χρόνου συνεχούς-πλάτους σ' ένα ψηφιακό σήμα, εκφράζοντας την τιμή κάθε δείγματος ως ένα αριθμό με πεπερασμένο πλήθος ψηφίων (αντί για άπειρο πλήθος ψηφίων που απαιτείται για κάθε συνεχούς-πλάτους τιμή). Το σφάλμα που υπεισέρχεται από την αναπαράσταση του σήματος συνεχών-τιμών με ένα πεπερασμένο πλήθος διακριτών-τιμών, ονομάζεται σφάλμα κβάντισης (quantisation error) ή θόρυβος κβάντισης (quantisation noise). Αν $x(n)$ είναι τα δείγματα εισόδου στον κβαντιστή και $x_q(n)$ η ακολουθία των κβαντισμένων δειγμάτων της εξόδου του κβαντιστή, τότε το σφάλμα κβάντισης είναι η ακολουθία $e_q(n)$, η οποία ορίζεται ως η διαφορά της πραγματικής τιμής από την κβαντισμένη τιμή, δηλαδή $e_q(n) = x(n) - x_q(n)$.

Για τον περιορισμό κάθε δείγματος στο επιθυμητό πλήθος ψηφίων, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο της στρογγυλοποίησης (rounding) και όχι της αποκοπής (truncation). Οι τιμές τις οποίες επιτρέπεται να παίρνει ένα ψηφιακό σήμα, αποτελούν τα λεγόμενα επίπεδα κβάντισης (quantisation levels), ενώ η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών επιπέδων κβάντισης ονομάζεται βήμα κβάντισης (quantisation step) ή διακριτική ικανότητα ή ανάλυση (resolution). Κατά την στρογγυλοποίηση, ο κβαντιστής αποδίδει στη συνεχή τιμή $x(n)$ την τιμή του πλησιέστερου επιπέδου κβάντισης. Έτσι, το σφάλμα κβάντισης $e_q(n)$ κυμαίνεται στην περιοχή $-\Delta/2$ και $\Delta/2$. Το βήμα κβάντισης Δ ορίζεται ως $\Delta = (x_{\max} - x_{\min}) / (L - 1)$, όπου x_{\max} , x_{\min} είναι η μεγαλύτερη και η μικρότερη τιμή του $x(n)$ αντίστοιχα, και L το πλήθος των επιπέδων κβάντισης.

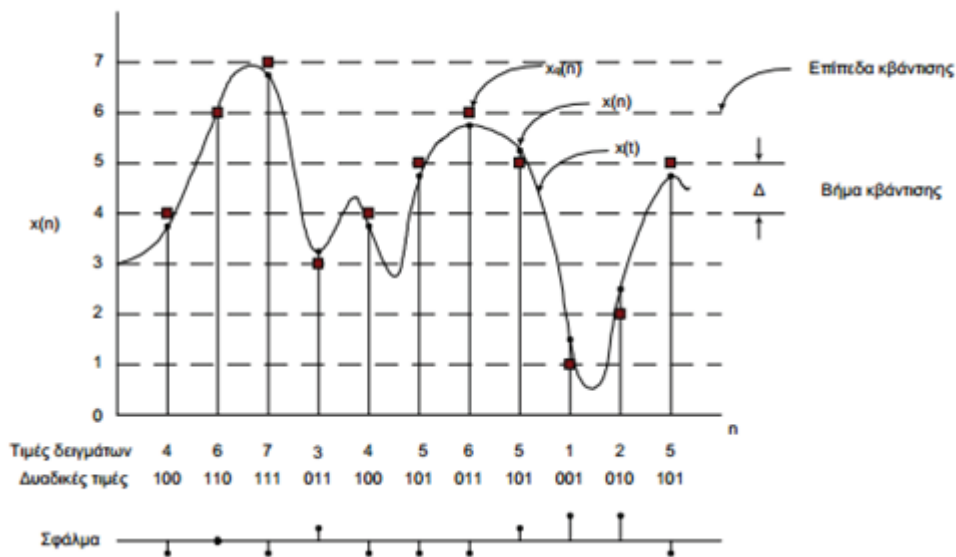
Η διαφορά $x_{max}-x_{min}$ αποτελεί τη δυναμική περιοχή(dynamic range) του σήματος. Αν η δυναμική περιοχή του σήματος είναι καθορισμένη, τότε αύξηση του πλήθους των επιπέδων κβάντισης L , συνεπάγεται την μείωση του βήματος κβάντισης. Επομένως το σφάλμα κβάντισης μειώνεται, δηλαδή, αυξάνεται η ακρίβεια του κβαντιστή. Τα επίπεδα κβάντισης L είναι συνάρτηση του πλήθους b των δυαδικών ψηφίων (bits) της λέξης που χρησιμοποιούμε για την αναπαράσταση κάθε δείγματος.

Αποδεικνύεται ότι για ημιτονοειδή σήματα, ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο κβάντισης αυξάνεται κατά περίπου 6dB για κάθε επιπλέον bit που προστίθεται στο μήκος λέξης, δηλαδή για κάθε διπλασιασμό των επιπέδων κβάντισης.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η κβάντιση αναλογικών σημάτων οδηγεί πάντοτε σε απώλεια πληροφορίας, εξαιτίας της ασάφειας που αυτή εισάγει. Πράγματι, η κβάντιση είναι μία μη-αντιστρεπτή διαδικασία, αφού όλα τα δείγματα σε απόσταση $\Delta/2$ γύρω από ένα επίπεδο κβάντισης, αντιπροσωπεύονται από την ίδια τιμή. Συνεπώς, δεν μπορούμε ποτέ να εξαλείψουμε τον θόρυβο κβάντισης, παρά μόνον να τον μειώσουμε αυξάνοντας το επίπεδα κβάντισης L .

3. Κωδικοποίηση (coding):

Κατά την διαδικασία της κωδικοποίησης σ' ένα μετατροπέα αναλογικού-σε-ψηφιακό, ένας μοναδικός δυαδικός αριθμός εκχωρείται σε κάθε επίπεδο κβάντισης. Αν έχουμε L επίπεδα κβάντισης, χρειαζόμαστε τουλάχιστον L διαφορετικούς δυαδικούς αριθμούς.



Σχημα 1.10 Κβάντιση και κωδικοποίηση σήματος

1.8 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος

Η Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (Digital signal processing ή DSP) ασχολείται με την αναπαράσταση σημάτων διακριτού χρόνου ως ακολουθίες αριθμών ή συμβόλων, καθώς και με την επεξεργασία των σημάτων αυτών, την ανάλυση, τροποποίηση και εξαγωγή πληροφοριών από αυτά, με την βοήθεια ψηφιακών επεξεργαστών. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος και η αναλογική επεξεργασία σήματος είναι υποπεδία

της επεξεργασίας σήματος. Κάποια πεδία της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι η επεξεργασία σημάτων ήχου, η επεξεργασία σημάτων φωνής, η επεξεργασία σημάτων από σόναρ, ραντάρ και συστοιχίες αισθητήρων, η εκτίμηση φάσματος (spectral estimation), η στατιστική επεξεργασία σήματος, η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, η επεξεργασία σήματος στις τηλεπικοινωνίες, ο έλεγχος συστημάτων, η επεξεργασία βιοϊατρικών σημάτων και η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων.

Περιπτώσεις κατά τις οποίες θέλουμε να αφαιρέσουμε το θόρυβο από ένα σήμα ή να βρούμε τον μετασχηματισμό Fourier κάποιων δεδομένων ή να μετατρέψουμε ένα σήμα σε μια μορφή πιο κατάλληλη για επεξεργασία και ανάλυση της πληροφορίας που εμπεριέχει, αποτελούν παραδείγματα της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος.

Αυτή χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε πολλές περιοχές εφαρμογών όπου παραδοσιακά χρησιμοποιούνταν αναλογικές μορφές επεξεργασίας, αλλά και σε νέες εφαρμογές στις οποίες οι αναλογικές μέθοδοι είναι δύσκολο ή και αδύνατο να χρησιμοποιηθούν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ψηφιακή επεξεργασία σήματος.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους θα προτιμούσαμε την ψηφιακή επεξεργασία ενός σήματος έναντι της αναλογικής. Πρώτον, ένα ψηφιακό προγραμματιζόμενο σύστημα παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία στην τροποποίηση των πράξεων ψηφιακής επεξεργασίας με μια απλή μετατροπή του προγράμματος. Μια τέτοια τροποποίηση ενός αναλογικού συστήματος συνεπάγεται την επανασχεδίαση του κυκλώματος και τον συνεπακόλουθο έλεγχο και επιβεβαίωση (testing and verification) της ορθής λειτουργίας του.

Η ακρίβεια (accuracy) παίζει επίσης πολύ σπουδαίο ρόλο. Οι ανοχές των στοιχείων των αναλογικών κυκλωμάτων καθιστούν δύσκολο τον προσδιορισμό της ακρίβειας ενός αναλογικού συστήματος επεξεργασίας. Στην περίπτωση ενός ψηφιακού συστήματος, ο έλεγχος των προδιαγραφών από άποψη ακρίβειας είναι πολύ πιο εύκολος.

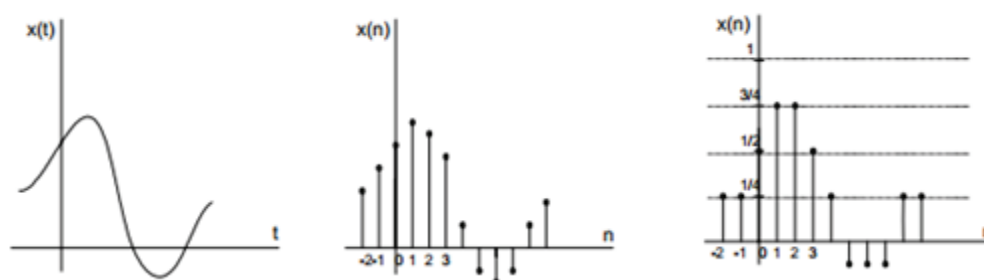
Τα ψηφιακά σήματα αποθηκεύονται σε μαγνητικά ή οπτικά μέσα (π.χ. μαγνητικούς ή οπτικούς δίσκους, ταινίες, κ.ά.) χωρίς υποβάθμιση της πιστότητάς τους, πέραν αυτής που έχει υπεισέλθει εξαιτίας της διαδικασίας μετατροπής τους από αναλογικά σε ψηφιακά. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς και επεξεργασίας τέτοιων σημάτων σε μη πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής πιο περίπλοκων αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος. Συνήθως η υλοποίηση μαθηματικών πράξεων μεγάλης ακρίβειας είναι δύσκολο να γίνει σε σήματα τα οποία βρίσκονται σε αναλογική μορφή, πράγμα όμως που είναι συνηθισμένο και εύκολο για ένα ψηφιακό σήμα το οποίο επεξεργαζόμαστε με έναν υπολογιστή και με κατάλληλο λογισμικό.

Σε πολλές περιπτώσεις, η ψηφιακή επεξεργασία ενός σήματος είναι χαμηλότερου κόστους από την αντίστοιχη αναλογική. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι το υλικό (hardware) σήμερα είναι φθηνότερο, είτε στην ευελιξία που παρέχεται λόγω της ψηφιακής υλοποίησης.

Αποτέλεσμα των πλεονεκτημάτων της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι η διαρκώς αυξανόμενη χρήση της σε όλο και περισσότερους τομείς εφαρμογών, όπως στην επεξεργασία ομιλίας, στη μετάδοση σήματος σε τηλεφωνικά κανάλια, στη σεισμολογία, στη γεωφυσική, στην ιατρική, στην εξερεύνηση του διαστήματος, στη μετεωρολογία, κα.

Φυσικά, η ψηφιακή επεξεργασία σήματος έχει και τα όριά της, τα οποία οφείλονται στους περιορισμούς που τίθενται στην ταχύτητα λειτουργίας των μετατροπέων αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, καθώς και στους ίδιους τους ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος. Έτσι, σήματα με εξαιρετικά μεγάλο εύρος

συχνοτήτων, για παράδειγμα σήματα με εύρος συχνοτήτων της τάξεως των 100 MHz, υφίστανται επεξεργασία ακόμη και



Σχημα 1.11 Τύποι σημάτων (α) αναλογικό, (β) διακριτού χρόνου, (γ) ψηφιακό

Ο σκοπός της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος συνήθως είναι η μέτρηση, το φιλτράρισμα ή η συμπίεση συνεχόμενων αναλογικών φυσικών σημάτων. Το πρώτο βήμα συνήθως είναι η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό, μέσω δειγματοληψίας και κβάντισης σήματος (sampling) από έναν μετατροπέα από αναλογικό σήμα σε ψηφιακό (analog-to-digital converter, ADC), ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε μια ακολουθία από αριθμούς. Συχνά όμως το ζητούμενο σήμα εξόδου είναι επίσης αναλογικό, επομένως χρειάζεται ένας μετατροπέας από ψηφιακό σήμα σε αναλογικό (digital-to-analog converter, DAC). Αν και αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία και έχει διακριτό πεδίο τιμών, η χρήση υπολογιστικής ισχύος στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική επεξεργασία σήματος σε πολλές εφαρμογές, όπως ο εντοπισμός και η διόρθωση λαθών στις επικοινωνίες και η συμπίεση δεδομένων.

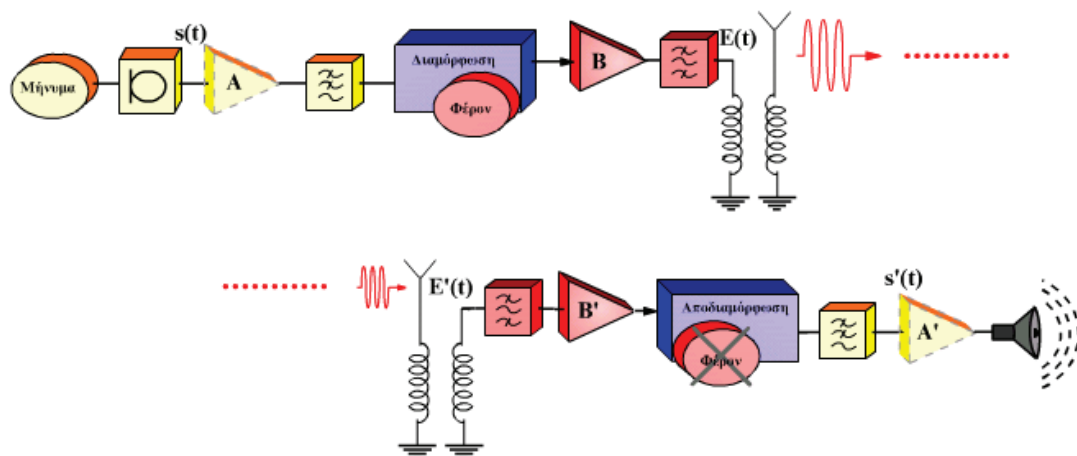
Οι αλγόριθμοι DSP εκτελούνται από παλιά σε υπολογιστές, σε εξειδικευμένους επεξεργαστές που ονομάζονται ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος σε υλικό που κατασκευάζεται ειδικά για αυτόν τον σκοπό, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα εφαρμογών (application-specific integrated circuits, ASIC). Σήμερα χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνολογίες για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος όπως οι ισχυροί μικροεπεξεργαστές γενικής χρήσης, οι συστοιχίες επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), οι ψηφιακοί ελεγκτές σήματος (κυρίως σε εφαρμογές στη βιομηχανία, όπως ο έλεγχος κινητήρων) και οι επεξεργαστές ροής (stream processors).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ

Για να πετύχουμε την μετάδοση οποιουδήποτε σήματος είναι αναγκαία η χρήση ενός επιπλέον υψίσυχνου σήματος, που ονομάζεται **φέρον** (ένα σήμα πολύ μεγαλύτερης συχνότητας, που παίζει το ρόλο του “μεταφορέα”).

Η διαδικασία της μεταφοράς του βασικού μας σήματος σε συνδυασμό με το φέρον ονομάζεται **διαμόρφωση** του σήματος. Η επιλογή του φέροντος γίνεται με βάση τα χαρακτηριστικά μεγέθη του βασικού σήματος. Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά είναι το πλάτος, η συχνότητα και η φάση. Το φέρον επιλέγεται με χαρακτηριστικά που το προσαρμόζουν στο κανάλι μετάδοσης και στη συγκεκριμένη εφαρμογή που θέλουμε να κάνουμε.



Σχημα 2.1 Διαμορφωση και αποδιαμορφωση σήματος

Ο λόγος χρήσης του φέροντος σήματος είναι για να επιτευχθεί καλύτερη ποιοτικά εκπομπή σήματος. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνταν αυτά τα υψηλόσυχνα σήματα θα υπήρχε πρόβλημα παρεμβολών από τον ένα ραδιοφωνικό σταθμό στον άλλον. Μία ακόμη χρησιμότητα των φερόντων είναι η μικρότερη ευαισθησία που παρουσιάζεται στα υψηλόσυχνα σήματα απ' ότι στα χαμηλόσυχνα. Τέλος, εάν η μετάδοση του σήματος γινόταν με χαμηλή συχνότητα οι

κεραίες εκπομπής θα 'πρεπε να έχουν τεράστια μεγέθη σύμφωνα πάντα με τον τύπο $c=\lambda*f$, όπου λ το μήκος κύματος εκπομπής.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το γεωμετρικό πλάτος των κεραιών εκπομπής είναι $\lambda/2$ ή $\lambda/4$. Η συχνότητα του φέροντος σήματος είναι ανάλογη με τις διακυμάνσεις του πλάτους ενός σήματος. Όσο αυξάνεται το πλάτος τόσο αυξάνεται και η συχνότητα του φέροντος και αντίστροφα.

Στο άλλο άκρο της επικοινωνίας, στον παραλήπτη, λαμβάνει χώρα η ανάστροφη διαδικασία προκειμένου να ανακτηθεί το αρχικό σήμα, η αποδιαμόρφωση. Μία συσκευή η οποία μπορεί να επιτελεί και τις δύο διεργασίες, έτσι ώστε να λειτουργεί και ως αποστολέας και ως παραλήπτης, ονομάζεται μόντεμ (modem).

2.1.1 Ανάγκη για διαμόρφωση

Υπάρχουν δυο εναλλακτικές λύσεις στην χρήση του διαμορφωμένου φέροντος σήματος για την μεταφορά των μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις στο ραδιοφωνικό κανάλι. Η μια περίπτωση είναι να προσπαθήσει να στείλει το ίδιο το διαμορφωμένο (modulating) σήμα και η άλλη εκδοχή είναι να χρησιμοποιήσει ένα αποδιαμορφωτή φέροντος σήματος. Θα παρουσιάσουμε αρχικά την πιθανότητα να μεταφερθεί το σήμα από μόνο. Αν και η ανάγκη για διαμόρφωση δεν έχει ακόμα συζητηθεί, ωστόσο εμπλέκονται πολλά προβλήματα όσον αφορά την διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε συχνότητες που ανταποκρίνονται στο ακουστικό φάσμα δηλαδή κάτω από 20KHz.

Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα στην απευθείας μετάδοση του σήματος είναι ότι για αποδοτική εκπεμπόμενη ενέργεια και λήψη, οι κεραιές εκπομπής και λήψης θα πρέπει να έχουν ύψος συγκρίσιμο με το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος της συχνότητας που χρησιμοποιείται. Αυτό το ύψος είναι 75 μέτρα (75m) στο 1MHz, στην εκπεμπόμενη μπάντα, όμως στα 15 KHz έχει αυξηθεί στα 5000m (ή πάνω από 16.000πόδια)! Μια τέτοια κατακόρυφη κεραία είναι αδιανόητο να υπάρξει. Υπάρχει ακόμα ένα δυνατό επιχείρημα όσον αφορά την απευθείας μετάδοση του σήματος: όλο το ακουστικό βεληνεκές εντοπίζεται μέσα στο διάστημα από 20Hz μέχρι 20KHz έτσι ώστε όλα τα άλλα σήματα που προέρχονται από άλλες πηγές θα συγχέονται μεταξύ τους.

Σε κάθε πόλη, οι εκπεμπόμενοι σταθμοί από μόνοι τους θα κάλυπταν μεγάλη περιοχή του 'αέρα' και έτσι θα αντιπροσώπευαν μια μικρή αναλογία του συνολικού αριθμού των δεκτών που βρίσκονται σε χρήση. Για να ξεχωρίσουμε μεταξύ τους τα διάφορα σήματα είναι αναγκαίο να αντιστοιχίσουμε κάθε ένα από αυτά σε διαφορετικά τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δηλαδή πρέπει να δοθεί σε κάθε ένα σήμα ένα 'ράφι'. Με τον τρόπο αυτό ξεπερνιούνται οι δυσκολίες που οφείλονται στην ασθενή ακτινοβολία στις χαμηλές συχνότητες. Όταν πια το σήμα το

έχουμε αντιστοιχίσει σε ένα μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, τοποθετείται ένα κύκλωμα συντονισμού στην αρχή του δέκτη έτσι ώστε να σιγουρέψουμε το γεγονός ότι στον δέκτη εισέρχεται το επιθυμητό τμήμα του φάσματος και όλα τα ανεπιθύμητα τμήματα τα οποία δεν αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο σήμα αγνοούνται.

Το κύκλωμα αυτό έχει ένα ρυθμιστή ο οποίος μεταβάλλεται και συνδέεται με τον ρυθμιστή ελέγχου, έτσι ώστε ο δέκτης να μπορεί να επιλέξει κάθε επιθυμητή μετάδοση πληροφορίας μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών, όπως στη μεταδιδόμενη μπάντα πολύ υψηλών συχνοτήτων (VHF) που χρησιμοποιείται στην διαμόρφωση συχνότητας (FM). Αν και έχοντας καταφέρει να διαχωρίσουμε μεταξύ τους τα σήματα και επομένως έχουμε καταφέρει να μειώσουμε τα διάφορα προβλήματα που παρουσιάζονταν ως τώρα λόγω της απουσίας της διαμόρφωσης του σήματος, ωστόσο παραμένει το γεγονός ότι μη διαμορφωμένα φέροντα σήματα από μόνα τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετάδοση πληροφορίας. Ένα μη διαμορφωμένο φέρον σήμα έχει ένα μέγιστο σταθερό πλάτος έχει επίσης σταθερή συχνότητα και σταθερή σχέση φάσης. Για την ακρίβεια όλοι οι παράμετροι ενός τέτοιου σήματος είναι σταθερές. Όμως ένα μήνυμα αποτελείται από συνεχώς μεταβαλλόμενες ποσότητες. Για παράδειγμα ο λόγος περιλαμβάνει γρήγορες και απρόβλεπτες μεταβολές στο πλάτος (volume) και την συχνότητα (pitch). Εφόσον είναι αδύνατον να αναπαραστήσουμε αυτές τις δυο μεταβλητές από ένα σύνολο τριών σταθερών παραμέτρων, το μη διαμορφωμένο φέρον σήμα δεν είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά πληροφορίας.

Σε ένα συνεχές ημιτονικό διαμορφωμένο σύστημα (διαμόρφωση κατά πλάτος ή συχνότητα αλλά όχι διαμόρφωση παλμού) μια από τις παραμέτρους του φέροντος σήματος ποικίλει ανάλογα με την πληροφορία. Έτσι κάθε στιγμή η απόκλιση του συστήματος από την μη διαμορφωμένη τιμή είναι ανάλογη της στιγμιαίας τιμής της διαμορφωμένης τάσης, και ο βαθμός με τον οποίο πραγματοποιείται αυτή η απόκλιση ισούται με την διαμορφωμένη συχνότητα. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται στο δέκτη αρκετή πληροφορία για την στιγμιαία συχνότητα και το στιγμιαίο πλάτος έτσι ώστε ο δέκτης να επανακατασκευάσει την αρχική πληροφορία.

Η διαμόρφωση λοιπόν είναι απαραίτητη και πολύ χρήσιμη καθώς :

- Περιορίζει τον θόρυβο και τις παρεμβολές μετάδοσης ανταλλάσσοντας ευρύτερο φάσμα.
- Χρησιμοποιείται για την μεταφορά των φασμάτων πολλών σημάτων σε διαφορετικές φασματικές περιοχές και την ταυτόχρονη μετάδοση τους μέσα από το ίδιο κανάλι (πολυπλεξία).
- Χρησιμοποιείται για να ξεπεραστούν μερικοί περιορισμοί στις επιδόσεις των συσκευών επεξεργασίας.

-Προσαρμόζει το σήμα στις απαιτήσεις και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μέσου μετάδοσης (π.χ. οπτικές ίνες, ομοαξονικό κτλ.) .

-Διευκολύνει την αποτελεσματική εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο, οι διαστάσεις της κεραίας πρέπει να είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος (λ) του σήματος.

Ισχύει: $\lambda = c/f$ όπου $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$

$$\text{Άρα, για } f = 300 \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = 10^6 \text{ m}$$

$$\text{ενώ για } f = 300 \text{ MHz} \Rightarrow \lambda = 1 \text{ m}$$

Ανάλογα με το βασικό και το φέρον σήμα η διαμόρφωση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες.

-Η αναλογική διαμόρφωση, όπου το βασικό σήμα είναι αναλογικό και το φέρον ένα ημιτονικό σήμα

-Η παλμική διαμόρφωση, όπου το βασικό σήμα είναι αναλογικό και το φέρον ένα παλμικό σήμα υψηλής συχνότητας.

-Η ψηφιακή διαμόρφωση, με το βασικό σήμα να είναι ψηφιακό (π.χ. στο σήμα να προέρχεται από υπολογιστή).

2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η ιδέα της αναλογικής διαμόρφωσης στηρίζεται στην αλλαγή κάποιας παραμέτρου ενός ημιτονοειδούς σήματος $c(t)$, το οποίο λέγεται φορέας, από κάποιο πληροφοριακό σήμα $m(t)$ προκειμένου να περάσει "άνετα" από το κανάλι. Στη συνέχεια, επιχειρείται μια καλύτερη εξήγηση της έννοιας αυτής. Η αναλογική διαμόρφωση εφαρμόζεται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, που χρησιμοποιούνται στις ραδιοφωνικές εκπομπές, στα κινητά συστήματα επικοινωνίας κ.λ.π.

Στα συστήματα αυτά τα πληροφοριακά σήματα, που πρέπει να μεταδοθούν, είναι η ανθρώπινη ομιλία και η μουσική και είναι "χαμηλού αρμονικού περιεχομένου" (περιέχουν συχνότητες από 5 ως 15 kHz περίπου), ενώ το κανάλι (η κεραία και η ατμόσφαιρα) συμπεριφέρεται ιδανικά ως ζωνοπερατό φίλτρο με την πιο χαμηλή

συχνότητα γύρω στα 500 kHz. Συνεπώς, είναι προφανές ότι το κανάλι δε θα επιτρέψει τη μετάδοση των. Έτσι, αναγκάζεται κανείς να "φορτώσει" το προς μετάδοση πληροφοριακό σήμα σε κάποιο φορέα, ο οποίος είναι ένα ημιτονοειδές σήμα συχνότητας ως και ο οποίος "περνάει" από το κανάλι. Αυτή είναι στην ουσία η τεχνική της αναλογικής διαμόρφωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα ημιτονοειδές σήμα έχει γενικά τη μορφή:

$$c(t) = A \cos[\theta(t)]$$

όπου

$$\theta(t) = \omega t + \varphi(t)$$

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι το σήμα χαρακτηρίζεται (α) από το **πλάτος** του A και (β) από τη **γωνία** του $\theta(t)$. Επομένως, αν το σήμα $c(t)$ είναι ο φορέας, τότε το πληροφοριακό σήμα $m(t)$ μπορεί να "φορτωθεί", δηλαδή να αλλάξει ή ακριβέστερα να διαμορφώσει είτε το πλάτος του φορέα είτε τη γωνία του. Έτσι, διακρίνονται δύο βασικά συστήματα διαμόρφωσης: **τα συστήματα διαμόρφωσης πλάτους (AM)** και **τα συστήματα διαμόρφωσης γωνίας**. Τα τελευταία, επειδή η γωνία του ημιτονοειδούς σήματος έχει δύο παραμέτρους, τη συχνότητα ω και τη φάση $\varphi(t)$, διακρίνονται σε **συστήματα διαμόρφωσης συχνότητας (FM)** και σε **συστήματα διαμόρφωσης γωνίας (PM)**.

2.2.1 Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Modulation, AM)

Το εύρος συχνοτήτων στην διαμόρφωση AM είναι 531kHz έως 1602kHz. Σε έναν πομπό AM, η πληροφορία που εκπέμπουμε(φωνή), μετατρέπεται σε τάση. Η τάση αυτή ενισχύεται και χρησιμοποιείται για την μεταβολή του φέροντος σήματος. Η ισχύς προστίθεται στο φέρον κατά την διαδικασία της διαμόρφωσης ανάλογα με την μεταβολή της τάσης. Κατά την διαμόρφωση το σήμα χωρίζεται σε τρεις ξεχωριστές συχνότητες που μεταδίδονται. Αυτές είναι η αρχική συχνότητα του φέροντος, μία χαμηλότερης ισχύος πλευρική ζώνη συχνοτήτων(LSB) κάτω από την φέρουσα και μία ανώτερη πλευρική ζώνη συχνοτήτων(USB) πάνω από την φέρουσα.

Ουσιαστικά αυτές οι πλευρικές ζώνες παίζουν τον ρόλο ενός 'ειδώλου' η μία στην άλλη και περιέχουν την ίδια πληροφορία. Όταν το σήμα ληφθεί από έναν δέκτη AM οι συχνότητες συνδυάζονται ώστε να ακουστεί το αρχικό μήνυμα. Το εύρος συχνοτήτων που καταλαμβάνει η κάθε πλευρική ζώνη είναι τόσο περισσότερο όσο υψηλή είναι η ακουστική συχνότητα που μεταδίδεται. Για παράδειγμα, αν η ακουστική συχνότητα είναι της τάξεως των 5kHz τότε ο χώρος που καταλαμβάνει

ένα σήμα AM θα είναι 10kHz. Όσον αφορά το φέρον σήμα, αυτό καταλαμβάνει μηδαμινό εύρος συχνότητας και θεωρείται αμελητέο.

Στην διαμόρφωση κατά πλάτος το σήμα απεικονίζεται ως εξής :



Σχήμα 2.2 Η διαμόρφωση AM σε διάγραμμα "block".

Ο τρόπος υλοποίησης της διαμόρφωσης αυτής δίνεται στο Σχήμα 2.2 Συγκεκριμένα, ο **φορέας** (ή αλλιώς το **φέρον σήμα**) είναι το ημιτονοειδές σήμα $c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$, το **πληροφοριακό σήμα** είναι το $m(t)$, ενώ το **διαμορφωμένο κατά AM σήμα** είναι:

$$x(t) = A_c [1+m(t)] \cos(\omega_c t)$$

ή

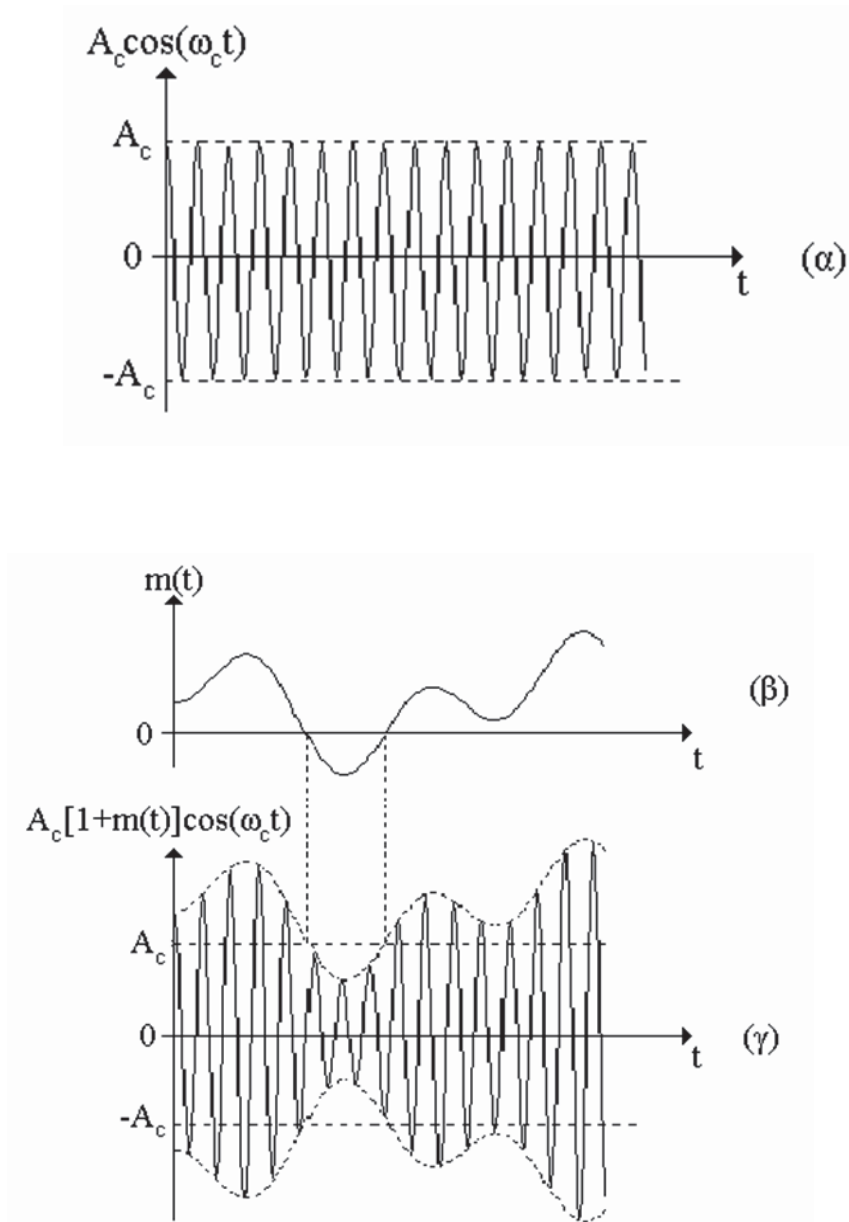
$$x(t) = A(t) \cos(\omega_c t)$$

με

$$A(t) = A_c [1+m(t)]$$

Από τις εξισώσεις γίνεται φανερό ότι η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος $A(t)$ περιέχει το πληροφοριακό σήμα $m(t)$, ενώ εύκολα μπορεί να

διαπιστωθεί ότι, όταν το πληροφοριακό σήμα $m(t)$ έχει τη μορφή του Σχήματος 2.3.β, τότε το διαμορφωμένο σήμα AM είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2.3.γ. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί το εξής: Η "έκταση" της διαμόρφωσης του φορέα από το πληροφοριακό σήμα δεν πρέπει να είναι αυθαίρετα μεγάλη. Συγκεκριμένα, για να έχει η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος τη μορφή του πληροφοριακού σήματος θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη :



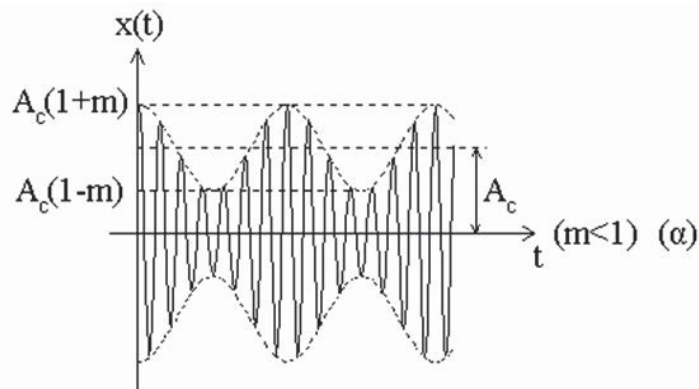
Σχήμα 2.3. (α) Ο ημιτονοειδής φορέας, (β) το πληροφοριακό σήμα και (γ) το διαμορφωμένο σήμα AM.

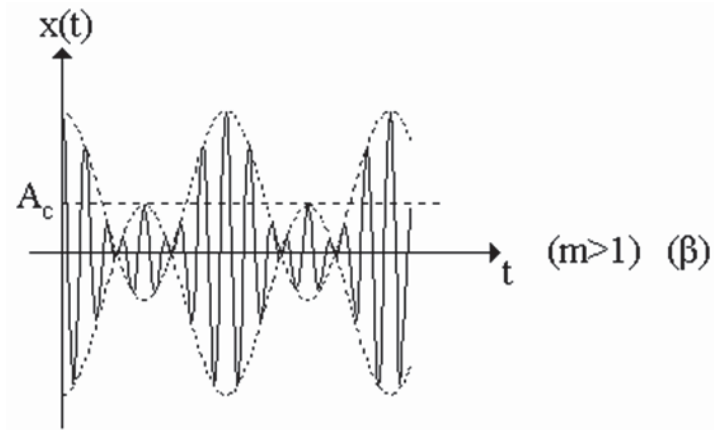
$$A(t) = A_c[1+m(t)] \geq 0 \quad \text{ή ισοδύναμα} \quad |m(t)| \leq 1$$

Για να γίνει καλύτερα η κατανόηση της συνθήκης $A(t) \geq 0$ υποτεθεί ότι το σήμα $m(t)$ είναι ένα ημιτονοειδές σήμα, δηλαδή $m(t) = m\cos(\omega_m t)$, με $\omega_m \ll \omega_c$. Τότε το διαμορφωμένο σήμα AM είναι:

$$x(t) = A_c[1+m\cos(\omega_m t)]\cos(\omega_c t)$$

Η περίπτωση $m < 1$ δίνεται στο Σχήμα 2.4.α, όπου η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος είναι σαφώς της μορφής του πληροφοριακού σήματος του Σχήματος 2.3.γ, ενώ στο Σχήμα 2.4.β έχει σχεδιαστεί η λεγόμενη **παραμόρφωση της περιβάλλουσας** $m > 1$. Στην τελευταία περίπτωση, η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος δεν είναι πια το $m(t)$, και το σήμα $x(t)$ λέγεται ότι είναι **υπερδιαμορφωμένο** ή ότι έχει υποστεί **υπερδιαμόρφωση**.





Σχήμα 2.4 (α) Το διαμορφωμένο σήμα με $m < 1$ και (β) με $m > 1$.

2.2.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαμόρφωσης AM

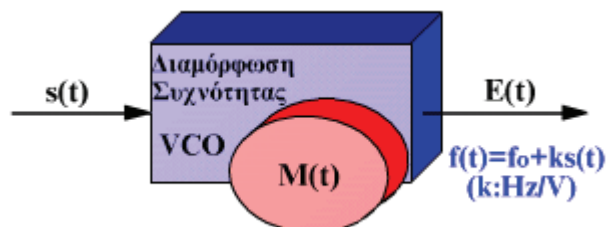
Αν και η διαμόρφωση πλάτους είναι αρκετά παλιά συνεχίζει να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα κυρίως στη ραδιοφωνία. Σήμερα υπολογίζεται ότι υπάρχουν γύρω στους 16.000 ραδιοσταθμούς AM. Η ευρεία χρήση της διαμόρφωσης πλάτους οφείλεται κυρίως στο ότι η αποδιαμόρφωση είναι πολύ απλή, τα σήματα AM μπορούν να αναδιαμορφωθούν από κυκλώματα που χρησιμοποιούν λίγα στοιχεία και οι δέκτες AM είναι πολύ φτηνοί. Όμως η διαμόρφωση πλάτους έχει και αρκετά σοβαρά μειονεκτήματα, τα πιο σημαντικά από τα οποία είναι η μικρή απόδοση ισχύος, διπλασιάζει το εύρος ζώνης και είναι επιρρεπής στον θόρυβο καθώς οι περισσότερες μορφές θορύβου είναι βασισμένες στο πλάτος.

2.2.2 Διαμόρφωση Συχνότητας FM

Η διαμόρφωση συχνότητας είναι μια αναλογική διαμόρφωση σήματος. Στην διαμόρφωση

συχνότητας η συχνότητα του φέροντος κύματος μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος του σήματος πληροφορίας. Το διαμορφωμένο σήμα που προκύπτει έχει σταθερό πλάτος αλλά μεταβάλλεται η συχνότητα του και μοιάζει να δημιουργούνται “πυκνώματα” και “αραιώματα”. Το πλάτος του ακουστικού σήματος επηρεάζει το φέρον με τον εξής τρόπο. Όταν το πλάτος του ακουστικού σήματος είναι μεγάλο

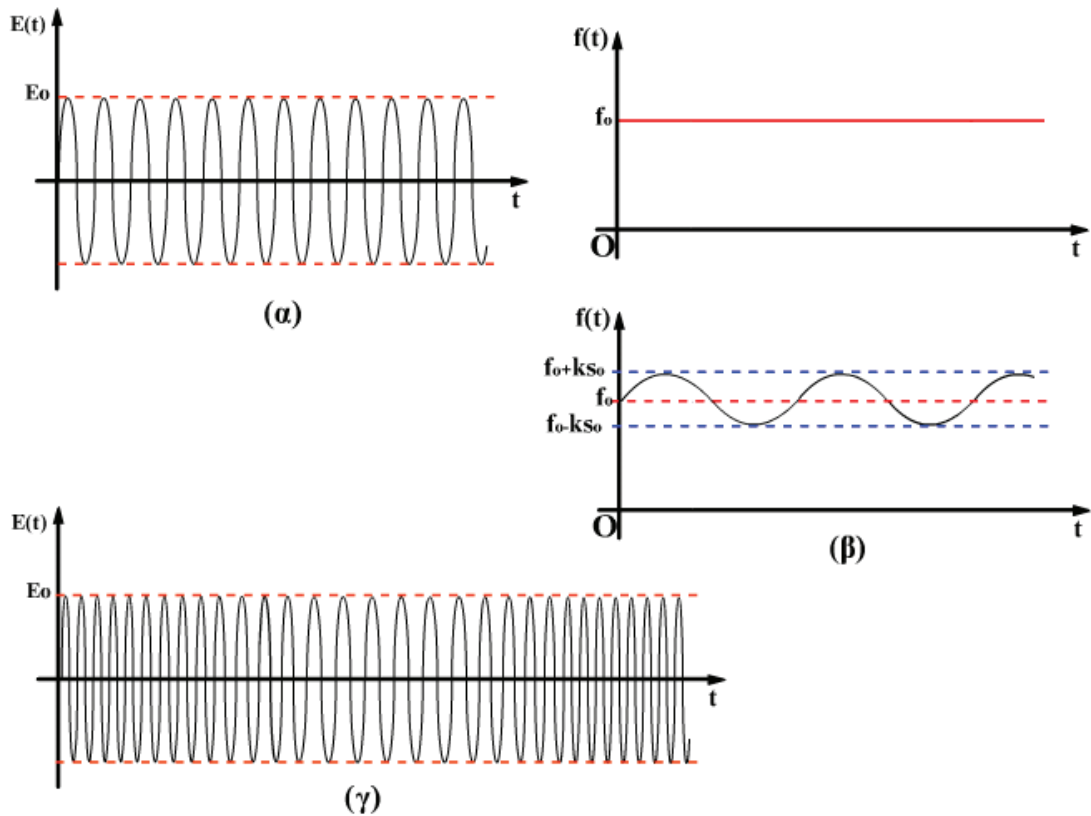
έχουμε αύξηση της συχνότητας του φέροντος και όπου το ακουστικού σήμα έχει μικρο πλάτος έχουμε μείωση της συχνότητας του φέροντος. Η επικρατέστερη εκπομπή ραδιοφωνικού σήματος είναι με διαμόρφωση συχνότητας, FM. Το πεδίο συχνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ 87,5-108 MHz.



Σχήμα 2.5 Διαδικασία διαμόρφωσης συχνότητας

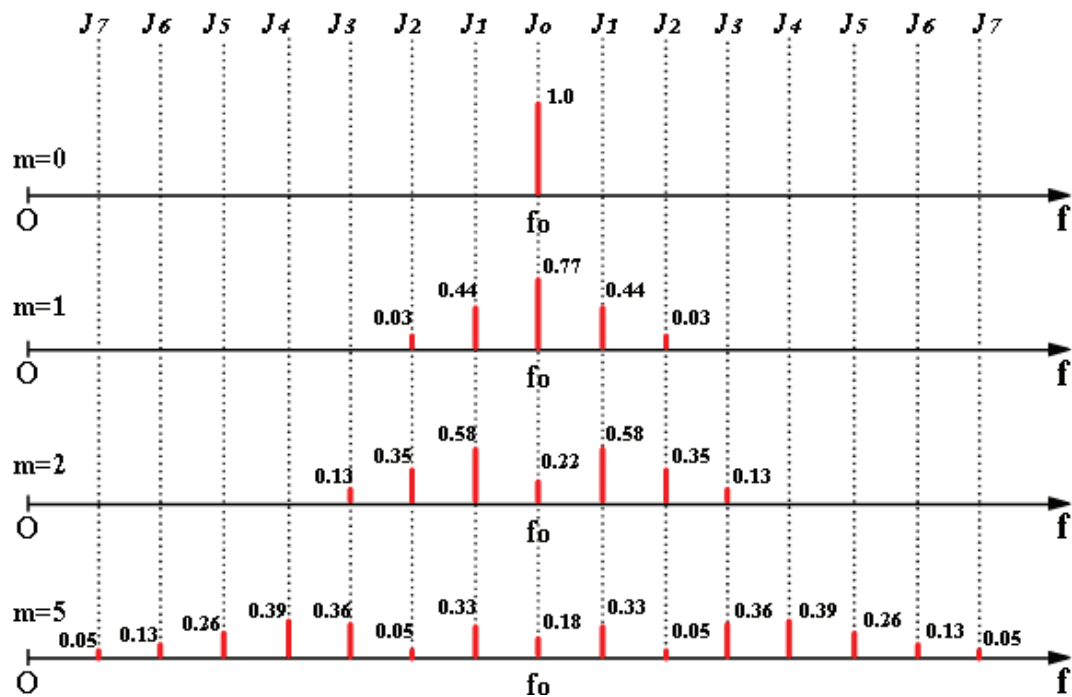
Όπως αναφέραμε στην παραπάνω παράγραφο καθώς το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος αυξάνεται, η συχνότητα του φορέα ελαττώνεται. Ένα ελαττούμενο διαμορφώνον σήμα θα αυξάνει τη συχνότητα του φορέα πάνω από την κεντρική της τιμή, ενώ ένα αυξανόμενο διαμορφώνον σήμα θα ελαττώνει τη συχνότητα του φορέα κάτω από την κεντρική της τιμή. Το ποσό της μεταβολής της συχνότητας του φορέα που παράγεται από το διαμορφώνον σήμα είναι γνωστό σαν απόκλιση συχνότητας.

Η συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος καθορίζει πόσες φορές ανά δευτερόλεπτο η συχνότητα του φορέα αποκλίνει πάνω και κάτω από την ονομαστική του κεντρική συχνότητα. Αυτό καλείται ρυθμός απόκλισης συχνότητας. Η συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος προσδιορίζει το ρυθμό της απόκλισης συχνότητας αλλά δεν επηρεάζει το ποσό της απόκλισης που είναι αυστηρά μια συνάρτηση του πλάτους του διαμορφώνοντος σήματος.



Σχήμα 2.6 Το φέρον (α) Χωρίς διαμόρφωση. (β) Η μεταβαλλόμενη συχνότητα. (γ) Το φέρον με διαμόρφωση συχνότητας

Στη διαμόρφωση συχνότητας παράγονται άνω και κάτω πλευρικές συχνότητες (όπως και στη διαμόρφωση πλάτους). Επιπλέον, παράγεται και ένας άπειρος αριθμός ζευγών άνω και κάτω πλευρικών με αποτέλεσμα το φάσμα ενός FM σήματος να είναι ευρύτερο από ένα ισοδύναμο AM σήμα.



Σχήμα 2.7 Το φάσμα στην FM για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης. (α) $m_f = 1$ (β) $m_f = 2$ (γ) $m_f = 5$.

Οι πλευρικές ζώνες απέχουν από τον φορέα και μεταξύ τους κατά μια συχνότητα ίση με τη διαμορφώνουσα συχνότητα. Επίσης τα πλάτη των πλευρικών διαφέρουν. Αν κάθε πλευρική υποτίθεται ότι είναι ένα ημιτονικό κύμα με μια συχνότητα και πλάτος όπως φαίνεται στο σχήμα και όλα αυτά τα ημιτονικά κύματα προστεθούν, τότε θα δημιουργούνταν το σήμα FM που τα παράγαγε. Όταν μεταβάλλεται το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος μεταβάλλεται και η απόκλιση συχνότητας.

Ο αριθμός των πλευρικών που παράγονται, το πλάτος τους και η απόσταση μεταξύ τους εξαρτώνται από την απόκλιση συχνότητας και τη διαμορφώνουσα συχνότητα. Στην FM επεξεργασία μόνο οι πλευρικές με τα μεγαλύτερα πλάτη είναι σημαντικές ως προς τη μεταφορά πληροφορίας και έτσι το εύρος ζώνης ενός FM σήματος στενεύει.

Ο λόγος της απόκλισης της συχνότητας προς τη διαμορφώνουσα συχνότητα είναι γνωστός σαν δείκτης διαμόρφωσης m όπου $m = f_d / f_m$.

Όπου f_d είναι η απόκλιση συχνότητας και f_m είναι η διαμορφώνουσα συχνότητα. Οποτεδήποτε η μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση συχνότητας και η μέγιστη επιτρεπτή διαμορφώνουσα συχνότητα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του δείκτη διαμόρφωσης αυτός είναι γνωστός σαν λόγος απόκλισης. Γνωρίζοντας τον δείκτη διαμόρφωσης και με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό και τα πλάτη των σημαντικών πλευρικών.

Το φάσμα ενός σήματος μεταβάλλεται σημαντικά σε εύρος ζώνης ανάλογα με το δείκτη διαμόρφωσης. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διαμόρφωσης, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης του σήματος FM. Έτσι όταν χρειάζεται εξοικονόμηση φάσματος μπορούμε να περιορίσουμε το φάσμα του σήματος θέτοντας ένα ανώτερο όριο στο δείκτη διαμόρφωσης. Το εύρος ζώνης μπορεί να προσδιορισθεί με τον απλό τύπο

$$BW=2f_m \cdot \text{αριθμός σημαντικών πλευρικών}$$

2.2.2.1 Σύγκριση FM με την AM

Εξετάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους τις διαμορφώσεις AM (και τα παράγωγά της) και FM. Γνωρίσαμε το αποτέλεσμα της διαμόρφωσης και με τη χρονική εικόνα του τελικού φέροντος, αλλά και με τη φασματική του εικόνα. Με παραδείγματα τεκμηριώσαμε τις βασικές ιδιότητες των σημάτων και των διάφορων μεγεθών που υπεισέρχονται στη μελέτη αυτών των διαδικασιών. Είμαστε σε θέση τώρα να κάνουμε κάποιες συγκρίσεις με βάση αυτά τα αποτελέσματα:

α) Η ισχύς του πομπού στη διαδικασία AM (και SSB) δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το ποσοστό διαμόρφωσης m ή το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης $s(t)$. Στην FM διαμόρφωση η ισχύς εκπομπής είναι σταθερή. Αυτό σημαίνει ευκολία στην κατασκευή του πομπού. Στην FM δεν απαιτείται ενίσχυση ισχύος του $s(t)$.

β) Στη διαμόρφωση AM η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος, που δεν είναι ωφέλιμη ισχύς, αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής ισχύος του σήματος.

Είναι πάντοτε πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ των πλευρικών ζωνών, που είναι η ωφέλιμη. Έχουμε, δηλαδή, σπατάλη ισχύος. Στη διαμόρφωση FM η αρχική ισχύς κατανέμεται σε όλο το φάσμα και η ισχύς της φασματικής συνιστώσας του φέροντος είναι ένα μέρος της ολικής ισχύος. Έχουμε λοιπόν καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος στην FM από ό,τι στην AM.

γ) Στην περίπτωση της AM είμαστε υποχρεωμένοι, αν ενισχύσουμε το σήμα μετά τη

διαμόρφωση, να χρησιμοποιήσουμε ενισχυτές που δεν εισάγουν παραμόρφωση, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στις μεταβολές του πλάτους του σήματος. Αντίθετα στην FM, αν υπάρξει παραμόρφωση, δεν είναι καταστροφική, γιατί η πληροφορία μας βρίσκεται στη συχνότητα του φέροντος. Μπορούμε λοιπόν στην FM να χρησιμοποιήσουμε ως τελικό στάδιο ενισχυτή τάξης C, που έχει μεγάλη απόδοση.

δ) Μειονέκτημα στην FM μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι το εύρος ζώνης του διαμορφωμένου φέροντος είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο εύρος της AM.

Όμως όσον αφορά το θόρυβο, λόγω ακριβώς αυτού του μεγάλου εύρους, η FM παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα. Αποδεικνύεται ότι για τις συνήθεις τιμές του m_f στην ραδιοφωνία, αυτό το πλεονέκτημα φτάνει σχεδόν 18 dB. Δηλαδή, ο λόγος

‘σήμα/θόρυβο’ στην FM είναι 64 φορές καλύτερος σε σύγκριση με το λόγο ‘σήμα/θόρυβο’ στην AM ($18 \text{ dB} = 10 \log 64$).

Γι’ αυτό η FM διαμόρφωση και εκπομπή προσφέρεται, για να απολαύσουμε μουσική πολύ πιο καλής ποιότητας από ό,τι στην AM.

2.2.3 Διαμόρφωση Γωνίας – PM

Διαμόρφωση φάσης (Phase Modulation - PM) είναι η μορφή διαμόρφωσης γωνίας στην οποία η γωνία $\theta_i(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$:

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t)$$

$$k_p = \text{ευαισθησία φάσης (phase sensitivity) (rad/volt)}$$

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)]$$

Στη διαμόρφωση φάσης η πληροφορία συμβολίζεται με απότομες αλλαγές της φάσης του φέροντος σήματος. Η διαμόρφωση φάσης δεν είναι ευρέως διαδεδομένη στη ραδιομετάδοση και αυτό γιατί απαιτεί πιο πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα στο δέκτη και γιατί υπάρχει ασάφεια στο καθορισμό εάν το σήμα έχει μεταβληθεί +180 μοίρες ή -180 μοίρες. Παρόλα αυτά όμως η διαμόρφωση φάσης χρησιμοποιείται σε ψηφιακούς μουσικούς σύνθετες.

Ένας άλλος τρόπος γωνιακής διαμόρφωσης είναι να μεταβάλλουμε το ποσό της ολίσθησης της φάσης ενός φορέα σταθερής συχνότητας σύμφωνα με ένα

διαμορφώνον σήμα. Η προκύπτουσα έξοδος είναι ένα PM σήμα. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος τόσο πιο μεγάλη είναι η ολίσθηση της φάσης. Υποθέτουμε ότι οι θετικές εναλλαγές του διαμορφώνοντος σήματος παράγουν μια καθυστέρηση στην ολίσθηση φάσης και ότι αρνητικά σήματα παράγουν μια προπορεία στην ολίσθηση φάσης.

Αν στον ολισθητή φάσης εφαρμοσθεί ένας φορέας ημιτονικού κόμματος σταθερού πλάτους και σταθερής συχνότητας, η έξοδος του ολισθητή φάσης θα είναι ένα PM κύμα. Όταν το διαμορφώνον σήμα αυξάνεται προς τα θετικά, το ποσό της καθυστέρησης της φάσης αυξάνεται ανάλογα με το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του φορέα καθυστερεί. Η καθυστέρηση αυτή αυξάνεται με το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος. Το αποτέλεσμα στην έξοδο είναι το σήμα του φορέα να έχει μια απλωμένη μορφή ή να φαίνεται με ελαττωμένη τη συχνότητα. Όταν το διαμορφώνον σήμα πηγαίνει προς τα αρνητικά, η ολίσθηση φάσης προπορεύεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο φορέας να εμφανίζεται σαν να επιταχύνεται ή συμπιέζεται ή με άλλα λόγια, σαν να αυξήθηκε η συχνότητα του.

Η διαμόρφωση φάσης παράγει διαμόρφωση συχνότητας. Εφόσον το ποσό ολίσθησης της φάσης μεταβάλλεται, το αποτέλεσμα είναι σαν να μεταβάλλεται η συχνότητα του φορέα. Εφόσον η FM παράγεται από την PM, η τελευταία συχνά αναφέρεται σαν έμμεση FM.

Η FM παράγεται μόνο όσο διαρκεί η μεταβολή της ολίσθησης της φάσης. Όταν το διαμορφώνον σήμα εφαρμόζεται σε ένα ολισθητή φάσης, η συχνότητα εξόδου θα μεταβάλλεται μόνο κατά τη διάρκεια του χρόνου κατά τον οποίο μεταβάλλεται το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος. Κατά τη διάρκεια των χρόνων που το πλάτος αυξάνεται ή ελαττώνεται θα παράγεται μια μεταβαλλόμενη συχνότητα. Ωστόσο κατά τη διάρκεια των θετικών και αρνητικών κορυφών σταθερού πλάτους δε συμβαίνει μεταβολή στη συχνότητα. Η έξοδος του ολισθητή φάσης θα είναι απλώς η συχνότητα του φορέα που έχει ολισθήσει σε φάση. Αυτό σαφώς δείχνει ότι οι μεταβολές συχνότητας συμβαίνουν μόνο όταν μεταβάλλεται το πλάτος του διαμορφώνοντος σήματος.

Η μεγίστη απόκλιση συχνότητας που παράγεται από ένα διαμορφωτή φάσης συμβαίνει κατά τη διάρκεια του χρόνου που το διαμορφώνον σήμα μεταβάλλεται με τον πιο γρήγορο ρυθμό του. Για ένα διαμορφώνον σήμα ημιτονικού κύματος ο ρυθμός μεταβολής του διαμορφώνοντος σήματος είναι μεγαλύτερος όταν το διαμορφώνον κύμα αλλάζει από συν σε πλην ή αντίστροφα. Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της διαμορφώνουσας τάσης συμβαίνει ακριβώς στα σημεία μηδενικών

περασμάτων. Σε αντίθεση σε ένα FM κύμα η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει στις κορυφές θετικού και αρνητικού πλάτους της διαμορφώνουσας τάσης. Επομένως αν και ένας διαμορφωτής φάσης παράγει FM η μέγιστη απόκλιση συμβαίνει σε διαφορετικά σημεία ενός διαμορφώνοντος σήματος.

Στην PM το μέγιστο ποσό προήγησης ή καθυστέρησης της ολίσθησης της φάσης συμβαίνει στις κορυφές πλάτους του διαμορφώνοντος σήματος. Η απόκλιση συχνότητας στην έξοδο του ολισθητή φάσης εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής του διαμορφώνοντος σήματος. Όσο πιο γρήγορα μεταβάλετε η τάση του διαμορφώνοντος σήματος τόσο πιο μεγάλη απόκλιση συχνότητας παράγεται. Λόγω αυτού η απόκλιση συχνότητας που παράγεται στην PM αυξάνεται με τη συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος. Όσο πιο υψηλή είναι η συχνότητα του διαμορφώνοντος σήματος τόσο πιο γρήγορα μεταβάλετε η τάση. Μεγαλύτερες διαμορφώνουσες τάσεις παράγουν μεγαλύτερη ολίσθηση φάσης η οποία στη συνέχεια παράγει μεγαλύτερη απόκλιση συχνότητας.

Ωστόσο υψηλότερες διαμορφώνουσες συχνότητες παράγουν ένα ταχύτερο ρυθμό μεταβολής της διαμορφώνουσας και επομένως παράγουν επίσης μεγαλύτερη απόκλιση συχνότητας. Άρα στην PM η απόκλιση συχνότητας του φορέα είναι ανάλογη και της διαμορφώνουσας συχνότητας και του διαμορφώνοντος πλάτους.

Μια κυματομορφή FM μπορεί να θεωρηθεί σαν κυματομορφή PM στην οποία το σήμα διαμόρφωσης είναι το

$\int m(t) dt$ αντί το $m(t)$.

Αντίστροφα μια κυματομορφή PM μπορεί να παραχθεί παραγωγίζοντας αρχικά το $m(t)$ και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το αποτέλεσμα σαν είσοδο σε διαμορφωτή συχνότητας.

Οι περισσότεροι πομποί FM χρησιμοποιούν κάποιο τύπο PM για παράγωγη έμμεσης FM. Ο λόγος για χρησιμοποίηση της PM αντί της έμμεσης FM είναι ότι ο ταλαντωτής φορέα μπορεί να βελτιστοποιηθεί για ακρίβεια και σταθερότητα στη συχνότητα. Οι κρυσταλλικοί ταλαντωτές ή οι συνθέτες συχνοτήτων με έλεγχο κρυστάλλου μπορούν να θέσουν τη συχνότητα φορέα με ακρίβεια και να τη διατηρούν με τελεία σταθερότητα.

Η έξοδος του ταλαντωτή φορέα οδηγείται σε ένα διαμορφωτή φάσης όπου η ολίσθηση φάσης κανονίζεται να μεταβάλλεται σύμφωνα με το διαμορφώνον σήμα. Εφόσον οι μεταβολές φάσης παράγουν μεταβολές συχνότητας το αποτέλεσμα είναι έμμεση FM.

2.2.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαμορφωτών φάσης.

Αν και οι διαμορφωτές φάσης είναι εύκολοι στην πραγματοποίησή τους έχουν τα εξής μειονεκτήματα. Πρώτο, το ποσό της ολίσθησης φάσης που παράγουν και η προκύπτουσα απόκλιση συχνότητας είναι σχετικά μικρή. Για αυτό το λόγο ο φορέας συνήθως δημιουργείται σε μια χαμηλότερη συχνότητα και χρησιμοποιούνται πολλαπλασιαστές συχνότητας φορέα και του ποσού της απόκλισης συχνότητας.

Δεύτερο, όλα τα κυκλώματα ολίσθησης φάσης παράγουν μεταβολές πλάτους καθώς επίσης και μεταβολές φάσης. Στα απλά κυκλώματα ολίσθησης φάσης οι ολισθητές φάσης είναι όλοι διαιρέτες τάσης. Όταν μεταβληθεί η τιμή ενός από τα στοιχεία η φάση ολισθαίνει αλλά μεταβάλλεται επίσης και το πλάτος εξόδου. Αυτό ισχύει επίσης και για τον ολισθητή φάσης του συντονισμένου κυκλώματος. Το συμπέρασμα είναι ότι κάποιος τρόπος πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση των διακυμάνσεων πλάτους.

Και τα δυο αυτά προβλήματα λύνονται οδηγώντας την έξοδο του διαμορφωτή φάσης σε ενισχυτές τάξης C που χρησιμοποιούνται σαν πολλαπλασιαστές συχνότητας. Οι ενισχυτές τάξης C απαλείφουν οποιοσδήποτε διακυμάνσεις πλάτους ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τη συχνότητα φορέα και την απόκλιση στις επιθυμητές τελικές τιμές.

2.3 ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Στα συστήματα ψηφιακής διαμόρφωσης και μετάδοσης τα χαρακτηριστικά της φέρουσας (πλάτος, συχνότητα, φάση) μεταβάλλονται με διακριτό τρόπο σύμφωνα με την πληροφορία. Συγκεκριμένα, το διαμορφώνον σήμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια χρονική ακολουθία συμβόλων ή παλμών, όπου κάθε σύμβολο έχει M διακριτές δυνατές καταστάσεις και αντιστοιχίζεται σε μία από M δυνατές κυματομορφές. Δηλαδή κάθε σύμβολο αναπαριστά N bits πληροφορίας, όπου $N = \log_2 M$ δυαδικά ψηφία/σύμβολο. Επομένως, στα ψηφιακά συστήματα μετάδοσης, η πληροφορία είναι διακριτού χρόνου, αλλά και διακριτού πλάτους. Τα σύγχρονα κινητά συστήματα επικοινωνίας χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο ψηφιακές τεχνικές διαμόρφωσης, καθώς παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με αντίστοιχες αναλογικές τεχνικές.

2.3.1 Πλεονεκτήματα Ψηφιακής Διαμόρφωσης

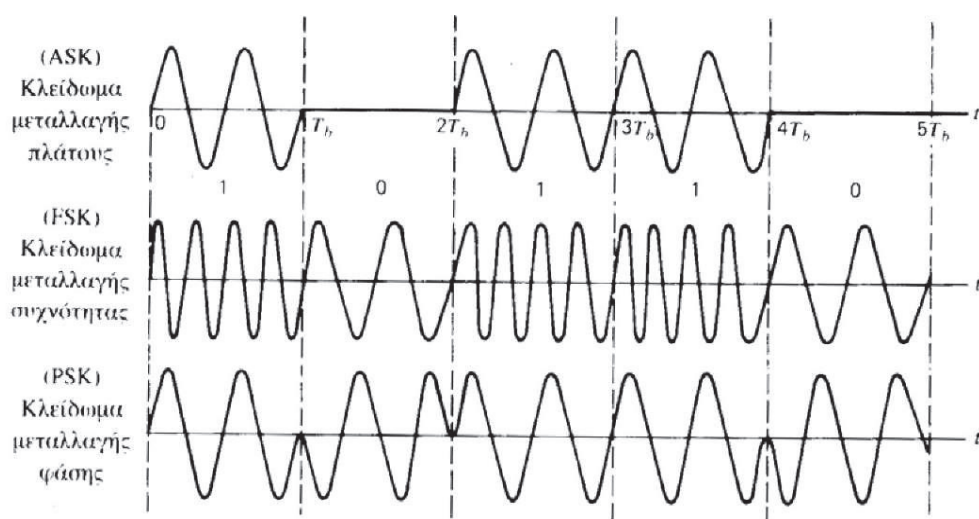
Η χρήση της ψηφιακής διαμόρφωσης και μετάδοσης σημάτων προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την αναλογική αναπαράσταση:

- Ανθεκτικότητα στο θόρυβο και τις υποβαθμίσεις που εισάγει το κανάλι.
- Ευελιξία σε πολυπλεξία διαφόρων μορφών πληροφορίας (π.χ. φωνή, δεδομένα, βίντεο).
- Ενσωμάτωση διαδικασιών ελέγχου σφαλμάτων για ανίχνευση και διόρθωση λαθών, καθώς και τεχνικών όπως η κωδικοποίηση πηγής, η κρυπτογράφηση και η ισοστάθμιση, για τη βελτίωση της απόδοσης του τηλεπικοινωνιακού καναλιού.
- Ευελιξία όσον αφορά την υλοποίηση σε υλικό και σε λογισμικό: είναι πλέον δυνατή η υλοποίηση ψηφιακών διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών εξ' ολοκλήρου σε λογισμικό, με τη βοήθεια προγραμματιζόμενων επεξεργαστών επεξεργασίας σήματος. Έτσι, στη θέση ενός μόντεμ υλοποιημένου σε υλικό, χρησιμοποιούνται υλοποιήσεις σε λογισμικό, που επιτρέπουν εύκολες μεταβολές και βελτιώσεις.

2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Όπως και στην αναλογική διαμόρφωση, έτσι και στην ψηφιακή υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες τεχνικών διαμόρφωσης, πάνω στις οποίες στηρίζονται όλες οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί. Έτσι, ανάλογα με το αν μεταβάλλεται το πλάτος, η συχνότητα ή η φάση της φέρουσας, σύμφωνα με τα σύμβολα προς μετάδοση, διακρίνουμε τις ακόλουθες τεχνικές:

- Μεταλλαγή μετατόπισης πλάτους (*Amplitude - shift keying, ASK*):
 Στη διαμόρφωση ASK, το πλάτος του φέροντος σήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με τα σύμβολα της προς μετάδοση ακολουθίας συμβόλων. Ένα παράδειγμα δυαδικής διαμόρφωσης ASK παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (πρώτη κυματομορφή). Το πλάτος του φέροντος μετάγεται σε μια από τις δύο πιθανές τιμές και η κυματομορφή που προκύπτει αποτελείται από ημιτονικούς παλμούς, που παριστάνουν το δυαδικό 1, και από παύσεις, που παριστάνουν το δυαδικό 0.
- Μεταλλαγή μετατόπισης συχνότητας (*Frequency-shift keying, FSK*):
 Στη μέθοδο αυτή μεταβάλλεται η συχνότητα του φέροντος σήματος σύμφωνα με τα σύμβολα της προς μετάδοση ακολουθίας συμβόλων. Ένα παράδειγμα δυαδικής διαμόρφωσης FSK παρουσιάζεται στο δεύτερο μέρος του σχήματος που ακολουθεί, όπου γίνεται μεταγωγή της συχνότητας του φέροντος σε μια από τις δύο τιμές που αντιστοιχούν στο δυαδικό 1 και 0, ανάλογα με τη δυαδική πληροφορία που μεταδίδεται.
- Μεταλλαγή μετατόπισης φάσης (*Phase-shift keying, PSK*): Στη μέθοδο αυτή μεταβάλλεται η φάση του φέροντος σήματος. Για παράδειγμα στο τρίτο μέρος του σχήματος, έχει σχεδιαστεί μια κυματομορφή δυαδικής διαμόρφωσης PSK, όπου η φάση του φέροντος μετάγεται σε μια από τις δύο τιμές που αντιστοιχούν στο δυαδικό 1 και 0.



Σχήμα 2.8 Δυαδική ASK, FSK, PSK

2.4.1 Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους ASK (Amplitude Shift Keying)

Η πιο απλή μορφή διαμόρφωσης διέλευσης ζώνης μιας ακολουθίας δεδομένων είναι η Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (ASK, Amplitude Shift Keying), σύμφωνα με την οποία κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο παριστάνεται με μια καθορισμένου πλάτους ημιτονοειδή κυματομορφή φέροντος συχνότητας f_c .

Συγκεκριμένα στην ASK το πλάτος του φέροντος μεταπιδά (switched) μεταξύ δύο ή περισσότερων επιπέδων, ανάλογα με την ψηφιακή πληροφορία.

Για bit = 1 στέλνουμε επί χρόνο T το σήμα $A \cos(\omega_c t)$.

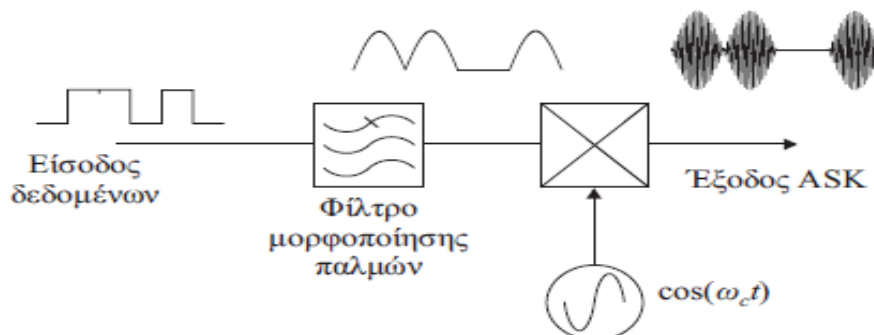
Για bit = 0 στέλνουμε επί χρόνο T το μηδέν.

2.4.1.2 Δυαδική Διαμόρφωση Πλάτους ASK (Binary Amplitude Shift Keying, BASK)

Στη δυαδική ASK (BASK) είναι απαραίτητες μόνο δύο καταστάσεις συμβόλων, και έτσι το φέρον απλά ενεργοποιείται ή διακόπτεται και γι' αυτό η διαδικασία ονομάζεται επίσης Διαμόρφωση ON-OFF (On-Off Keying, OOK) όπου τα ψηφία 1 και 0 αντιπροσωπεύονται από τα δύο επίπεδα πλάτους A και $-A$.

2.4.1.3 Διαμόρφωση ASK περιορισμένου εύρους ζώνης

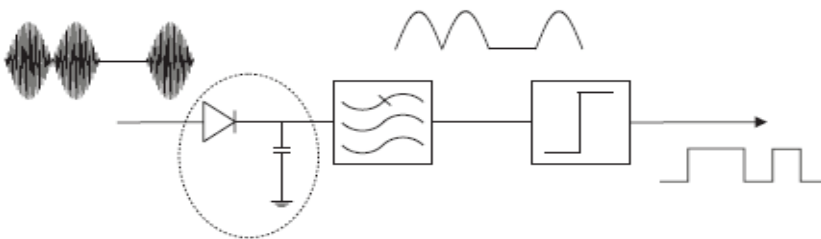
Για τον περιορισμό του εύρους ζώνης που καταλαμβάνεται από το εκπεμπόμενο σήμα, πραγματοποιείται μορφοποίηση (φιλτράρισμα) των παλμών στην ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης. Στη συνέχεια έχουμε την γραμμική διαδικασία διαμόρφωσης, ώστε να διατηρηθεί η πληροφορία στο πλάτος του σήματος δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται τη βοήθεια ενός μίκτη, ο οποίος πολλαπλασιάζει το φέρον με την ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή BASK.



Σχήμα 2.9 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή BASK

2.4.1.4 Ασύμφωνη ανίχνευση

Η πληροφορία που μεταδίδεται με τη μέθοδο διαμόρφωσης ASK μεταφέρεται στο πλάτος, ή αλλιώς στην περιβάλλουσα (envelope), του διαμορφωμένου σήματος και έτσι τα δεδομένα μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή περιβάλλουσας. Η πιο απλή υλοποίηση ενός τέτοιου ανιχνευτή γίνεται με τη χρήση μιας διόδου που λειτουργεί ως ανορθωτής και ενός φίλτρου εξομάλυνσης, καταλήγοντας σε έναν ασύμφωνο ανιχνευτή (non-coherent detector), όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο σχήμα που ακολουθεί.



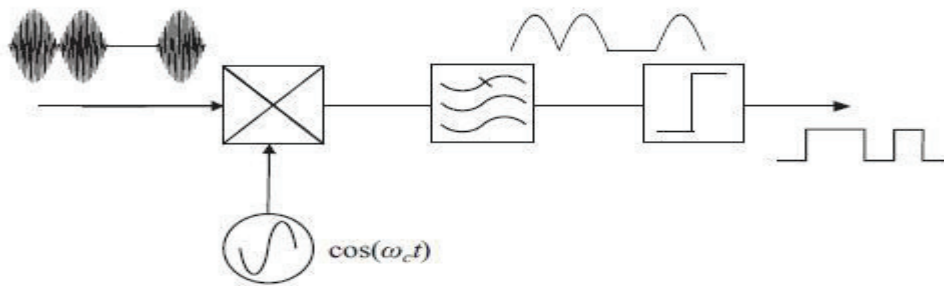
Σχήμα 2.10 Σχηματικό διάγραμμα ασύμφωνου αποδιαμορφωτή BASK

2.4.1.5 Σύμφωνη ανίχνευση

Ένας σύμφωνος ανιχνευτής (coherent detector) λειτουργεί αναμιγνύοντας το εισερχόμενο στο δέκτη διαμορφωμένο σήμα δεδομένων με ένα φέρον αναφοράς που παράγεται τοπικά. Εάν ο φορέας είναι σύμφωνος σε φάση (phase coherent) με το εισερχόμενο διαμορφωμένο σήμα, τότε η έξοδος είναι ανάλογη του εισερχόμενου διαμορφωμένου σήματος και επιτυγχάνεται τέλεια ανίχνευση.

Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι ο τοπικός ταλαντωτής στο δέκτη είναι με κάποιο τρόπο «κλειδωμένος» ως προς τη φάση με τον τοπικό ταλαντωτή του φέροντος στον πομπό. Για να επιτευχθεί αυτό, μία τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως είναι αυτή του βρόχου κλειδωμένης φάσης (Phase – Locked Loop – PLL). Το σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου αποδιαμορφωτή BASK φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Παρότι η σύμφωνη ανίχνευση φαίνεται πιο περίπλοκη από την ασύμφωνη, μπορεί να ανιχνεύει με πλήρη ακρίβεια το σήμα σε περιβάλλον θορύβου.



Σχήμα 2.11 Σχηματικό διάγραμμα σύμφωνου αποδιαμορφωτή BASK

2.4.1.6 Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος BASK

Το φάσμα ενός σήματος BASK είναι συμμετρικό ως προς τη συχνότητα του φέροντος. Η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD - Power Spectral Density) δίνεται από παρακάτω σχέση:

$$P(f) = K \frac{T_b}{2} \cdot \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)T_b}{\pi(f - f_c)T_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)T_b}{\pi(f + f_c)T_b} \right]^2 \right\}$$

όπου T_b είναι η διάρκεια των bit δεδομένων και f_c η συχνότητα του φέροντος. Όπως θα δούμε και παρακάτω, σε γραφική παράσταση (την κανονικοποιημένη φασματική πυκνότητα ισχύος σε συνάρτηση με την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_b) το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ένα σήμα BASK είναι διπλάσιο του αρχικού σήματος βασικής ζώνης και η μέγιστη (θεωρητική) φασματική απόδοσή του είναι $Q=1$ bit/sec/Hz.

2.4.1.7 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης BASK

Ο πιο απλός τρόπος για να παραστήσεις την απόδοση ενός συστήματος ψηφιακής επικοινωνίας είναι η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit ή συμβόλων, ως συνάρτηση του εισερχόμενου λόγου E_b/N_0 , που αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ενέργεια του σήματος στην είσοδο του δέκτη στη διάρκεια ενός bit, με τη παρουσία θορύβου φασματικής πυκνότητας ισχύος N_0 , η οποία απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ρυθμού σφαλμάτων.

Η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης BASK σε ένα κανάλι που παρουσιάζει προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο (Additive White Gaussian Noise, AWGN) δίνεται από τις σχέσεις:

Για σύμφωνη ανίχνευση:

$$P_B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_o}} \right)$$

Για ασύμφωνη ανίχνευση:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{E_b}{2N_o} \right)$$

2.4.1.8 Διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών επιπέδων ASK (M-ary Amplitude Shift Keying, M-ASK)

Στην διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών επιπέδων κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μια ακολουθία από m bit δεδομένων. Η μαθηματική παράσταση του μεταδιδόμενου συμβόλου είναι:

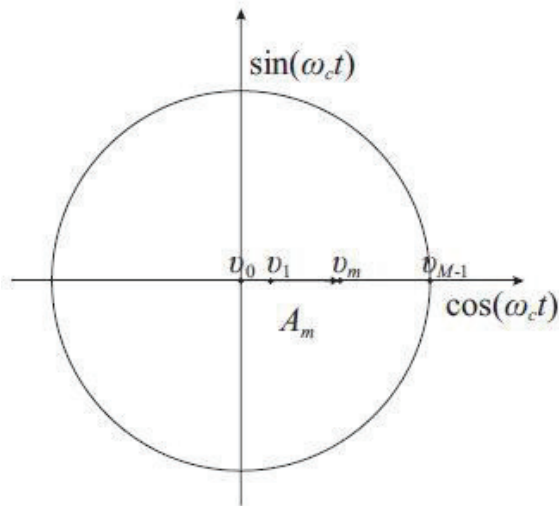
$$u(t) = A_m \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

όπου M είναι το πλήθος των μεταδιδόμενων συμβόλων και A_m είναι το πλάτος του συμβόλου που δίνεται από τη σχέση:

$$A_m = A \frac{m}{M}$$

Το πλήθος των πιθανών συμβόλων M που μπορούν να μεταδοθούν συνδέεται με τον αριθμό των bit m που κωδικοποιούνται ανά σύμβολο μέσω της σχέσης $M = 2^m$.

Το διάγραμμα αστερισμού των διαμορφώσεων πλάτους πολλαπλών επιπέδων φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Αποτελείται από ένα πλήθος σημείων που βρίσκονται στο θετικό οριζόντιο ημιάξονα και επομένως είναι συμφασικά με το μεταδιδόμενο φέρον. Η απόσταση κάθε συμβόλου από την αρχή των αξόνων ισούται με το πλάτος του A_m .

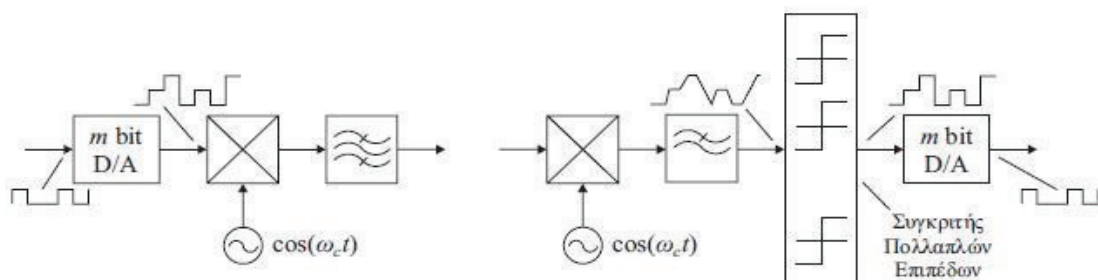


Σχήμα 2.12 Διάγραμμα αστερισμού των διαμορφώσεων M-ASK

2.4.1.9 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-ASK

Όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή σημάτων M-ASK που ακολουθεί παρακάτω, το σύστημα διαμόρφωσης αποτελείται από έναν μετατροπέα D/A m bit, έναν μίκτη και ένα φίλτρο. Αρχικά, τα ψηφιακά δεδομένα εισέρχονται στο μετατροπέα D/A, η έξοδος του οποίου απαρτίζεται από παλμούς διάρκειας mT_b και πλάτους A_m . Στη συνέχεια το σήμα πολλαπλών επιπέδων βασικής ζώνης διαμορφώνει ένα ημιτονοειδές φέρον ($\cos 2\pi f_c t$). Τέλος, το διαμορφωμένο σήμα φιλτράρεται από ένα ζωνοπερατό φίλτρο, προκειμένου να κατασταλεί το τμήμα του φάσματος που βρίσκεται εκτός του μεταδιδόμενου εύρους ζώνης.

Ο αποδιαμορφωτής αποτελεί μια μορφή ενός σύμφωνου ανιχνευτή που λειτουργεί κάνοντας μίξη του λαμβανόμενου στο δέκτη διαμορφωμένου σήματος με το ανακτημένο φέρον. Αρχικά, το διαμορφωμένο σήμα οδηγείται σε έναν μίκτη μαζί με το ανακτημένο φέρον. Η έξοδος του μίκτη φιλτράρεται από ένα βαθυπερατό φίλτρο και εισάγεται σε ένα συγκριτή πολλαπλών επιπέδων. Τα ψηφιακά δεδομένα λαμβάνονται στην έξοδο του συγκριτή μετά τη χρήση ενός μετατροπέα A/D m bit.



Σχήμα 2.13 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή σημάτων M-ASK

Η ανάκτηση του φέροντος μπορεί να γίνει με την ύψωση του διαμορφωμένου σήματος στο τετράγωνο. Στη συνέχεια, απομακρύνεται η dc συνιστώσα του σήματος με τη χρήση ενός ζωνοπερατού φίλτρου με κεντρική συχνότητα $2f_c$. Τέλος, το ανακτημένο φέρον λαμβάνεται από τη έξοδο ενός διαιρέτη συχνότητας μετά τη χρήση ενός φίλτρου στενής ζώνης συντονισμένο στη συχνότητα f_c .

2.4.2 Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης PSK (Phase Shift Keying)

Στην ψηφιακή διαμόρφωση φάσης PSK (Phase Shift Keying), η πληροφορία περιέχεται στη στιγμιαία φάση του διαμορφωμένου φέροντος. Αυτή η φάση συνήθως ενσωματώνεται στο φέρον και εκτιμάται ως προς ένα σταθερό φέρον αναφοράς γνωστής φάσης, και γι' αυτό ονομάζεται σύμφωνη PSK (coherent PSK).

Είναι επίσης δυνατή η μετάδοση δεδομένων κωδικοποιημένων με τη μορφή μεταβολών φάσης (διαφορά φάσης) ανάμεσα σε διαδοχικά σύμβολα. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται Διαφορικά Σύμφωνη Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης (Differentially Coherent PSK).

Οι διαμορφώσεις σταθερής περιβάλλουσας PSK είναι κατάλληλες για επικοινωνία μέσω δορυφόρου. Ιδιαίτερα δημοφιλής είναι η QPSK λόγω της φασματικής της απόδοσης.

2.4.2.1 Δυαδική Διαμόρφωση Φάσης PSK (Binary Phase Shift Keying, BPSK)

Στη δυαδική διαμόρφωση BPSK χρησιμοποιούνται οι καταστάσεις φάσης 0° και 180° . Έτσι όταν τα δεδομένα είναι σε μια λογική στάθμη (1) μεταδίδεται το σήμα:

$$u(t) = A \cos(\omega_c t)$$

ενώ όταν είναι στην άλλη λογική στάθμη (0) μεταδίδεται το σήμα:

$$u(t) = A \cos(\omega_c t - \pi) = -A \cdot \cos(\omega_c t)$$

Στην πραγματικότητα, η BPSK μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σήμα BASK με πλάτη $+A$ και $-A$ (αντί των $+A$ και 0 , που είναι στην ASK).

Η γεωμετρική παράσταση στο χώρο ενός σήματος BPSK φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων που παριστούν τα μεταδιδόμενα σύμβολα είναι ίση με:

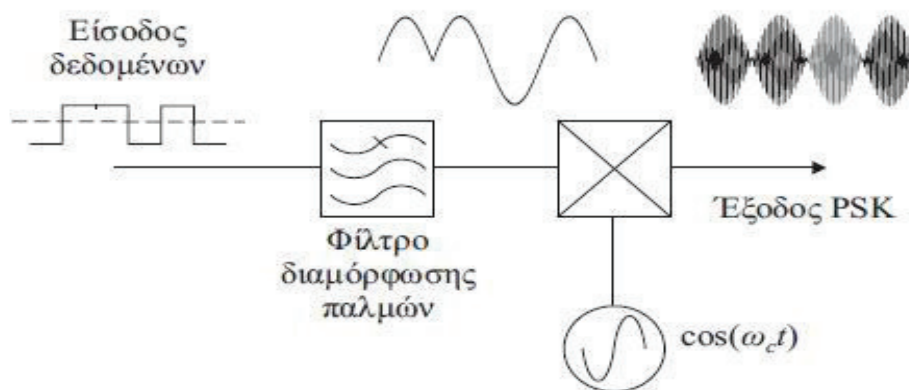
$$d = 2\sqrt{E_b}$$



Σχήμα 2.14 Γεωμετρική παράσταση των σημάτων BPSK.

2.4.2.2 Παραγωγή και λήψη του σήματος BPSK

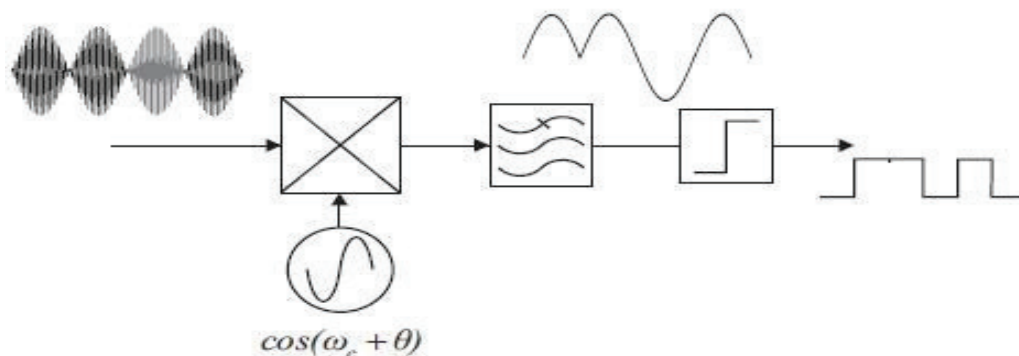
Για την παραγωγή ενός σήματος BPSK, χρησιμοποιείται ο διαμορφωτής του σχήματος που ακολουθεί. Ο διαμορφωτής αυτός χρησιμοποιεί γραμμικό πολλαπλασιασμό, ο οποίος επιτρέπει στην ακολουθία δεδομένων να προμορφοποιηθεί στη βασική ζώνη, πριν από τη διαδικασία διαμόρφωσης.



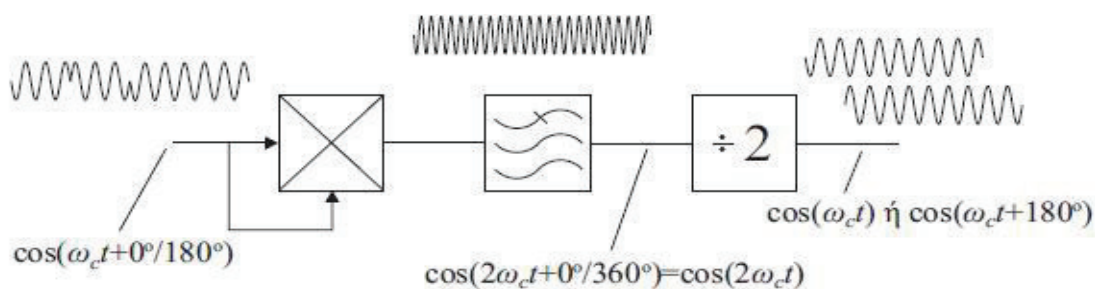
Σχήμα 2.15 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή BPSK

2.4.2.3 Σύμφωνη ανίχνευση

Καθώς δεν υπάρχει ασύμφωνος τρόπος ανίχνευσης του σήματος BPSK, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια μορφή σύγχρονης ανίχνευσης. Ένας ιδανικός ανιχνευτής απαιτεί την ακριβή γνώση της φάσης του αδιαμόρφωτου φορέα στο δέκτη. Το σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου αποδιαμορφωτή BPSK παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.16 Σχηματικό διάγραμμα ενός αποδιαμορφωτή BPSK



Σχήμα 2.17 Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης για την ανάκτηση του φέροντος στη διαμόρφωση BPSK.

Μια διάταξη που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του φέροντος φαίνεται στο σχήμα παραπάνω και αποτελείται από έναν τετραγωνιστή του εισερχόμενου στο δέκτη σήματος, ένα φίλτρο για την απομάκρυνση της dc συνιστώσας που προκύπτει και έναν διαιρέτη συχνότητας για την ανάκτηση του φέροντος $\cos\omega_c t$.

2.4.2.4 Αβεβαιότητα φάσης κατά την ανάκτηση του φέροντος στη διαμόρφωση PSK

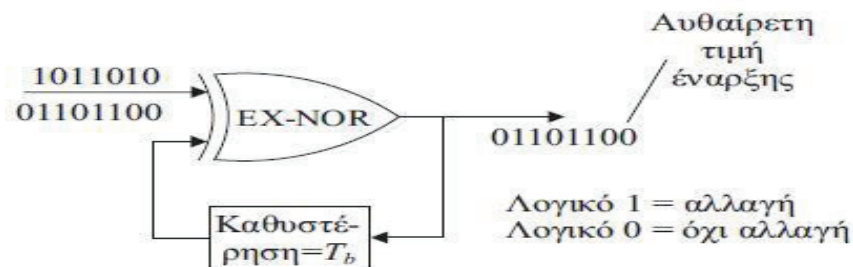
Η διαδικασία του τετραγωνισμού φαίνεται ιδανική για την ανάκτηση του φορέα, αλλά έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: η διαδικασία της διαίρεσης της συχνότητας του φέροντος διπλάσιας συχνότητας εισάγει μια αβεβαιότητα 180ο στη φάση του φέροντος αναφοράς. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί αν αποσταλεί μια γνωστή ακολουθία δοκιμής (training sequence) στο δέκτη από την οποία θα μπορεί αυτός να συμπεράνει αν έχει συμβεί αντιστροφή φάσης ή όχι, και να διορθώσει κατάλληλα. Ωστόσο, αυτή η ακολουθία δοκιμής όμως, δεν μπορεί να λειτουργήσει σωστά αν το κανάλι διακόπτεται συχνά, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε μια κυψελωτή ζεύξη που εμφανίζει απόσβεση, με αποτέλεσμα να εξαφανίζεται περιοδικά η συχνότητα του φέροντος. Κάθε φορά που επανέρχεται η αναφορά φέροντος θα υπάρχει μια νέα αβεβαιότητα φάσης, η οποία θα απαιτεί την εκ νέου αποστολή της ακολουθίας δοκιμής.

2.4.2.5 Διαφορική Κωδικοποίηση Δεδομένων

Μια εναλλακτική και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος που αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα φάσης στη διαδικασία ανάκτησης του φορέα είναι η διαφορική κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των δεδομένων εκπομπής και λήψης αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Διαφορικά Κωδικοποιημένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Φάσης (Differentially Encoded Phase Shift Keying, DEPSK). Η κωδικοποίηση των δεδομένων στην DEPSK στηρίζεται σε μια πύλη αποκλειστικού OR, όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω.

Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί μεταφράζοντας τα δεδομένα εισόδου σε μια κωδικοποιημένη ακολουθία δεδομένων, στην οποία το λογικό 1 στην είσοδο κωδικοποιείται ως αλλαγή της λογικής κατάστασης από το προηγούμενο κωδικοποιημένο bit και το λογικό 0 στην είσοδο κωδικοποιείται ως μη-αλλαγή κατάστασης, σε σχέση με το προηγούμενο κωδικοποιημένο bit. Η βαθμίδα καθυστέρησης μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με έναν χρονιζόμενο καταχωρητή μετατόπισης (shift register) ενός bit.

Αυτή η διαδικασία κωδικοποίησης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική καθώς δεν απαιτεί την εισαγωγή επιπλέον bit και επομένως δεν επηρεάζει την παροχή δεδομένων του modem.

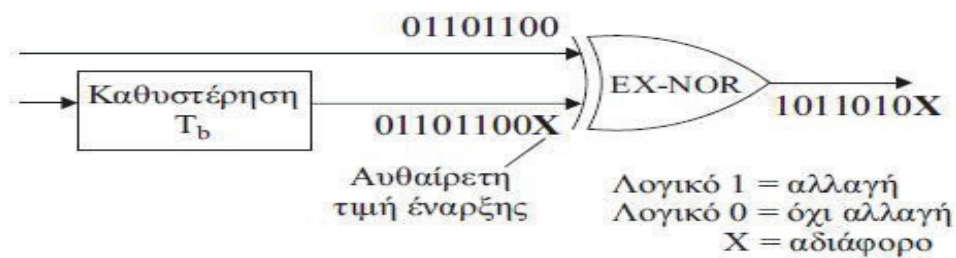


Σχήμα 2.18 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαφορικού κωδικοποιητή.

2.4.2.6 Διαφορική Αποκωδικοποίηση Δεδομένων

Η διαδικασία της διαφορικής αποκωδικοποίησης είναι εξίσου απλή στην υλοποίηση χρησιμοποιώντας μια δεύτερη πύλη αποκλειστικού OR και ένα κύκλωμα καθυστέρησης ενός bit, όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στόχος είναι να παρατηρηθεί αν η ανιχνευόμενη ακολουθία δεδομένων αλλάζει κατάσταση σε διαδοχικά bit, οπότε στην είσοδο πρέπει να υπήρχε ένα λογικό 1, ή αν δεν υπάρχει αλλαγή κατάστασης, οπότε συνάγεται ότι θα πρέπει να είχε σταλεί ένα λογικό 0. Η πληροφορία για την αλλαγή της κατάστασης δεν επηρεάζεται από τυχόν αντιστροφή των δεδομένων και συνεπώς η αβεβαιότητα φάσης του φέροντος δεν επηρεάζει την διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης.

Το μόνο μειονέκτημα της διαδικασίας αποκωδικοποίησης είναι ότι όταν εμφανίζονται μονά εσφαλμένα bit, τότε αυτά διαδίδονται ως σφάλματα διπλών bit. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αποκωδικοποιητής συγκρίνει τη λογική κατάσταση του τελευταίου εισερχόμενου bit με το τρέχον bit. Κατά συνέπεια αν το προηγούμενο bit είναι εσφαλμένο, τότε και το επόμενο bit που θα αποκωδικοποιηθεί θα είναι εσφαλμένο



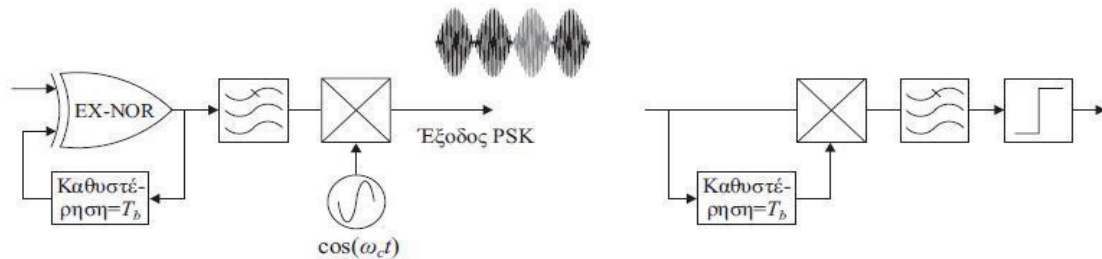
Σχήμα 2.19 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαφορικού αποκωδικοποιητή

2.4.2.7 Διαφορική Διαμόρφωση Δεδομένων PSK (DPSK)

Η Διαφορική Διαμόρφωση PSK (DPSK) βασίζεται στην λογική της «αλλαγής κατάστασης» για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των δεδομένων που έχει και η DEPSK, αλλά τη βελτιώνει ενσωματώνοντας τη λειτουργία της διαφορικής αποκωδικοποίησης στη λειτουργία της αποδιαμόρφωσης των δεδομένων. Συνεπώς δε χρειάζεται κανένα μηχανισμό ανάκτησης φέροντος.

Το τμήμα διαφορικής κωδικοποίησης και ο διαμορφωτής PSK είναι κοινά στις μεθόδους DPSK και DEPSK, αλλά ο δέκτης λειτουργεί συγκρίνοντας τη φάση του εισερχόμενου συμβόλου του φορέα με αυτήν του προηγούμενου. Κατά τη διαδικασία αυτή ο δέκτης εκτελεί ταυτόχρονα τη σύμφωνη ανίχνευση και τη διαφορική κωδικοποίηση ως μια λειτουργία. Το σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή σημάτων DPSK δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί παρακάτω.

Είναι φανερό ότι αυτή η διαδικασία ανίχνευσης είναι πολύ απλούστερη από αυτήν που απαιτείται στην αυθεντική σύμφωνη BPSK. Γι' αυτό η DPSK χρησιμοποιείται ευρύτατα σε ενσύρματα και ασύρματα modem για σηματοδότηση μέσω ρυθμού μετάδοσης. Εντούτοις, η DPSK έχει χειρότερη ανοχή στο θόρυβο από την BPSK, καθώς η φάση αναφοράς της DPSK είναι μια θορυβώδης και καθυστερημένη εκδοχή του σήματος εισόδου παρά μια καλά φιλτραρισμένη, πρακτικά απαλλαγμένη από το θόρυβο στάθμη αναφοράς, που προκύπτει από μια διαδικασία ανάκτησης φέροντος.

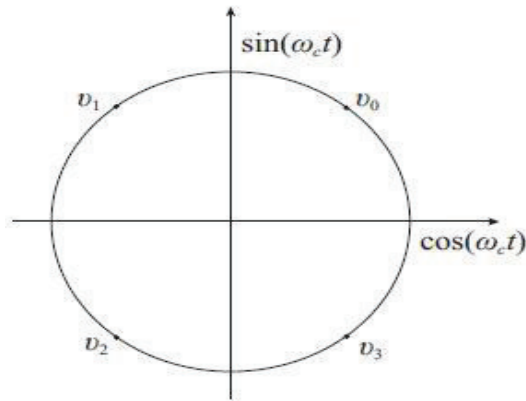


Σχήμα 2.20 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή DPSK.

2.4.2.8 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση των διαμορφώσεων φάσης πολλαπλών επιπέδων είναι η διαμόρφωση φάσης QPSK. Η διαμόρφωση αυτή χρησιμοποιεί τέσσερα σύμβολα, ορθογωνικά μεταξύ τους. Η ιδιότητα της ορθογωνικότητας της QPSK σημαίνει ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή πληροφορίας με ταχύτητα διπλάσια από αυτήν της BPSK στο ίδιο εύρος ζώνης, χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοση ανίχνευσης ως προς την BPSK. Αυτό συνεπάγεται ότι η φασματική απόδοση της QPSK είναι διπλάσια από αυτήν της BPSK, δηλαδή $Q=2$ bit/sec/Hz.

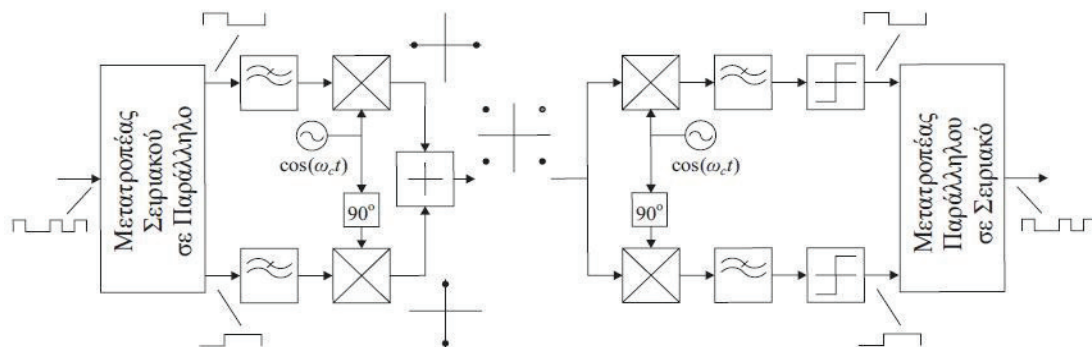
Το διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης QPSK αποτελείται από ένα σύνολο 4 σημείων πάνω σε ένα κύκλο ακτίνας A , όσο το πλάτος του φέροντος, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους κατά γωνία $\pi/2$ rad. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι καταστάσεις φάσεων είναι στραμμένες κατά 45° ως προς τους δύο άξονες ($\cos \omega_c t$ και $\sin \omega_c t$).



Σχήμα 2.21 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή DPSK.

2.4.2.9 Παραγωγή και λήψη του σήματος QPSK

Το σύστημα του διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή της QPSK αποτελείται στην πραγματικότητα από δύο συστήματα διαμόρφωσης BPSK που χρησιμοποιούν ορθογωνικά φέροντα. Το σχηματικό του διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.22 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή QPSK

Τα δεδομένα χωρίζονται αρχικά σε δύο ακολουθίες, μια άρτια και μια περιττή, οι οποίες εμφανίζουν το ήμισυ του αρχικού ρυθμού μετάδοσης. Στη συνέχεια, οι ακολουθίες φιλτράρονται και διαμορφώνουν δύο ορθογωνικά φέροντα ($\cos\omega_c t$ και $\sin\omega_c t$) τα οποία τελικά αθροίζονται προκειμένου να δημιουργηθεί το διαμορφωμένο κατά QPSK σήμα.

Στον αποδιαμορφωτή το διαμορφωμένο σήμα υφίσταται μίξη με τα δύο ορθογωνικά φέροντα τα οποία έχουν προηγουμένως ανακτηθεί. Στη συνέχεια οδηγείται σε ένα συγκριτή προκειμένου να ανακτηθούν οι δύο ακολουθίες

δεδομένων. Τέλος, τα δεδομένα ανασυντίθενται σε μια ενιαία ακολουθία με τη χρήση κατάλληλου μετατροπέα.

2.4.2.10 Διαφορική Διαμόρφωση QPSK (DQPSK)

Όπως και στη διαμόρφωση BPSK, έτσι και στην QPSK υπάρχει αβεβαιότητα φάσης στη διαδικασία ανάκτησης του φέροντος και για να ξεπεραστεί απαιτείται κάποια ειδική διαδικασία, όπως η τοποθέτηση προπομπών στην αρχή, η διαφορική κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση ή η χρήση διαφορικής κωδικοποίησης μαζί με διαφορική ανίχνευση φάσης. Έτσι, όπως και στην BPSK, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί διαφορική αποδιαμόρφωση της QPSK (Differential QPSK, DQPSK) αντί της σύμφωνης ανίχνευσης, εάν είναι σημαντικός παράγοντας η απλότητα της υλοποίησης.

Ο διαμορφωτής DQPSK χρησιμοποιεί τον ίδιο διαφορικό κωδικοποιητή δεδομένων για κάθε παράλληλη ακολουθία δεδομένων, όπως και ο αντίστοιχος δυαδικός διαμορφωτής DPSK, χρησιμοποιώντας την ίδια βασική αρχή: συγκρατεί το προηγούμενο σύμβολο για χρόνο μιας περιόδου και το χρησιμοποιεί ως αναφορά για την αποδιαμόρφωση.

2.4.2.11 Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης DQPSK

Η απόδοση της διαμόρφωσης DQPSK όσον αφορά το ρυθμό εμφάνισης εσφαλμένων bit είναι σημαντικά υποδεέστερη της απόδοσης της αντίστοιχης δυαδικής μεθόδου DPSK. Δυστυχώς η DQPSK δε μοιράζεται τη σπουδαία ιδιότητα της σύμφωνης QPSK, να μη ζημιώνεται η απόδοση σφάλματος όταν βελτιώνεται η απόδοση εύρους ζώνης. Αυτό οφείλεται στο θόρυβο που συνοδεύει τη μίξη του καθυστερημένου συμβόλου αναφοράς με τα ορθογώνια σύμβολα και δημιουργεί συνακρόαση στον αποδιαμορφωτή.

Ως αποτέλεσμα, ο σχεδιαστής δεν έχει σημαντικό κίνητρο να χρησιμοποιήσει τη μέθοδο DQPSK, καθώς η προσπάθεια ανάκτησης του φέροντος για την επίτευξη σύμφωνης ανίχνευσης θα έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση μόνο κατά 3 dB. Η πιθανότητα λήψης εσφαλμένου bit για την DQPSK δίνεται από τη σχέση:

$$P_B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_o}} \right)$$

2.4.2.12 Η μέθοδος π/4-QPSK

Μια πρόσφατη εκδοχή της QPSK που χρησιμοποιείται σήμερα στα περισσότερα ψηφιακά ραδιο-modem είναι η διαμόρφωση π/4-QPSK, η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το σύνολο των τεσσάρων συμβόλων περιστρέφεται κατά π/4 σε κάθε νέα εκπομπή συμβόλου.

Στόχος της περιστροφής αυτής είναι να διασφαλιστεί ότι η διαμορφωμένη περιβάλλουσα του φιλτραρισμένου σήματος QPSK δεν θα περνά ποτέ από το μηδέν, οπότε ελαχιστοποιείται ο λόγος της τιμής κορυφής προς τη μέση τιμή της διαμόρφωσης. Το γεγονός ότι η περιβάλλουσα του διαμορφωμένου σήματος δεν περνά ποτέ από το μηδέν έχει ιδιαίτερη σημασία για την σχεδίαση ενισχυτών ισχύος. Παραδοσιακά, οι ενισχυτές ισχύος RF είναι πολύ δύσκολο να σχεδιαστούν με γραμμική απόκριση που εκτείνεται μέχρι και για μηδενική τιμή ισχύος εξόδου. Έτσι είναι φανερό ότι προτιμάται η μέθοδος π/4-QPSK έναντι της συμβατικής QPSK.

Ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της π/4-QPSK είναι ίδιος με αυτόν της συμβατικής QPSK, θεωρώντας ότι η ανίχνευση είναι ιδανικά σύμφωνη.

2.4.2.13 Διαμόρφωση φάσης πολλαπλών επιπέδων PSK (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK)

Στις διαμορφώσεις πλάτους πολλαπλών επιπέδων (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK) η πληροφορία διαμορφώνει τη φάση ενός ημιτονοειδούς φέροντος $\cos \omega_c t$. Η μαθηματική παράσταση του μεταδιδόμενου συμβόλου είναι:

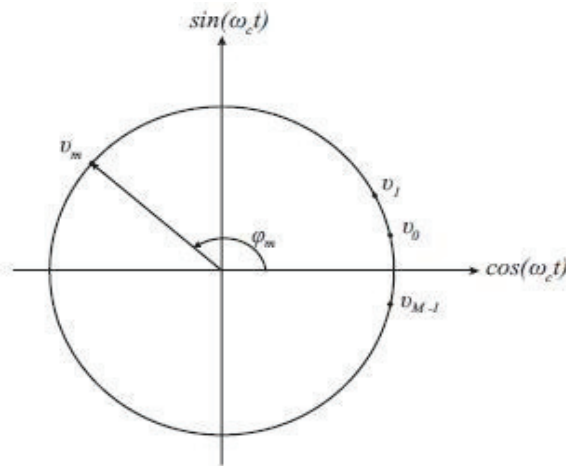
$$s_m(t) = A_m \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_m) \quad m=0,1,2,\dots,M-1$$

όπου φ_m είναι η φάση του συμβόλου $s_m(t)$ που δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_m = (2m + 1) \frac{\pi}{M} \quad (r=0,1,2,\dots,M-1)$$

Το πλήθος των πιθανών συμβόλων M που μπορούν να μεταδοθούν συνδέεται με τον αριθμό των bit m που κωδικοποιούνται ανά σύμβολο με τη σχέση $M = 2^m$.

Το διάγραμμα αστερισμού των διαμορφώσεων φάσης πολλαπλών επιπέδων φαίνεται στο σχήμα. Αποτελείται από ένα πλήθος συμβόλων που βρίσκονται πάνω σε ένα κύκλο ακτίνας A και ισαπέχουν μεταξύ τους κατά γωνία $2\pi/M$.

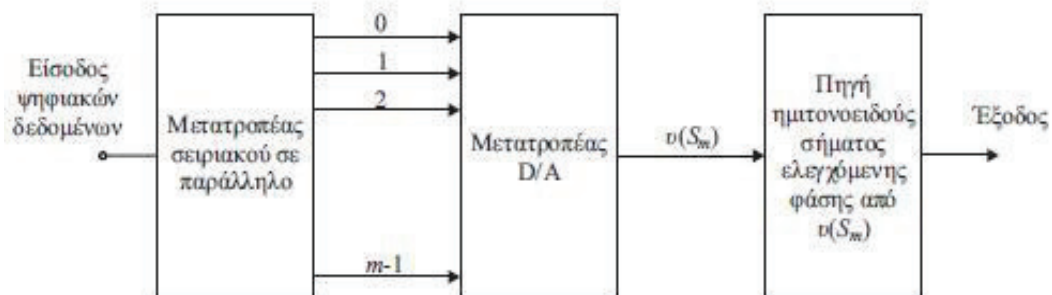


Σχήμα 2.23 Διάγραμμα αστερισμού των διαμορφώσεων M-PSK.

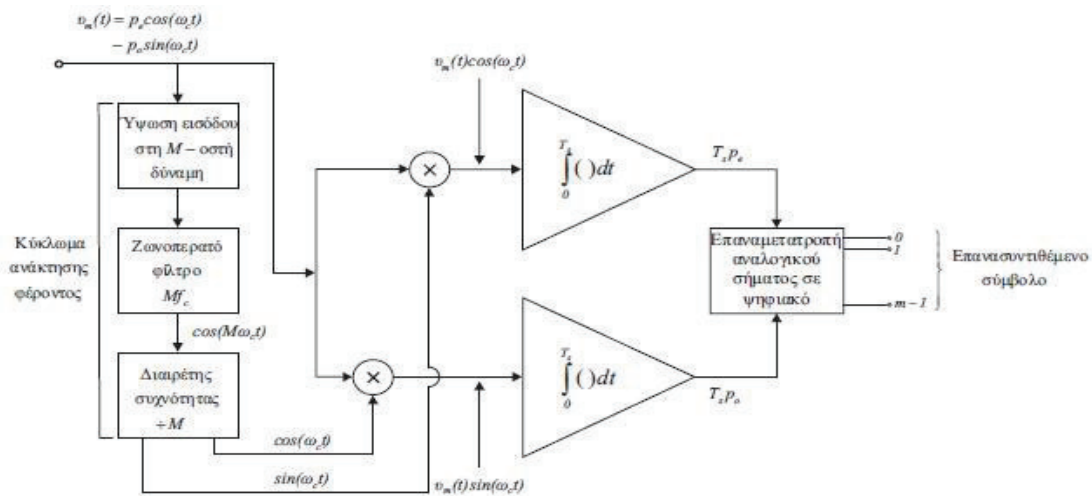
2.4.2.14 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-PSK

Τα σχηματικά διαγράμματα του διαμορφωτή και του αποδιαμορφωτή ενός σήματος M-PSK φαίνονται στα δυο παρακάτω αντίστοιχα σχήματα. Το σύστημα διαμόρφωσης αποτελείται από ένα μετατροπέα σειριακού σε παράλληλο, ο οποίος έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των m bit ενός συμβόλου. Η έξοδος του μετατροπέα εφαρμόζεται σε έναν μετατροπέα D/A ο οποίος παράγει μια τάση εξόδου ανάλογη με το σύμβολο εισόδου. Η τάση αυτή εφαρμόζεται σαν είσοδος ελέγχου σε μια ειδικού τύπου πηγή ημιτονοειδούς σήματος σταθερού πλάτους της οποίας καθορίζει τη φάση. Συνολικά λοιπόν, η έξοδος είναι μια ημιτονοειδής κυματομορφή συγκεκριμένου πλάτους, της οποίας η φάση είναι σε αντιστοιχία ένα-προς-ένα με το σύμβολο των m bit.

Ο δέκτης είναι παρόμοιος με το δέκτη της διαμόρφωσης QPSK. Το σύστημα ανάκτησης φέροντος απαιτεί μια διάταξη για την ύψωση του σήματος που λαμβάνεται στη M -οστή δύναμη και φίλτρο για να αποσπάται η συνιστώσα Mf_c η οποία στη συνέχεια διαιρείται με M



Σχήμα 2.24 Σχηματικό διάγραμμα του πομπού της διαμόρφωσης M-PSK.



Σχήμα 2.25 Σχηματικό διάγραμμα του δέκτη της διαμόρφωσης M-PSK.

2.4.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας FSK (Frequency Shift Keying)

Η ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Shift Keying, FSK) χρησιμοποιείται ευρέως για τη δημιουργία ψηφιακών σημάτων, επειδή είναι εύκολη στη δημιουργία και την ανίχνευση, ενώ παράλληλα είναι αναισθητή στις διακυμάνσεις πλάτους που προκαλεί το κανάλι. Η μέθοδος FSK μεταφέρει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας φορείς με διακριτές συχνότητες, ώστε να αναπαραστήσει με αυτές τις καταστάσεις συμβόλων. Μια σημαντική ιδιότητα της FSK είναι ότι το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος είναι σταθερό.

2.4.3.1 Δυαδική Διαμόρφωση Συχνότητας FSK (Binary Frequency Shift Keying, BFSK)

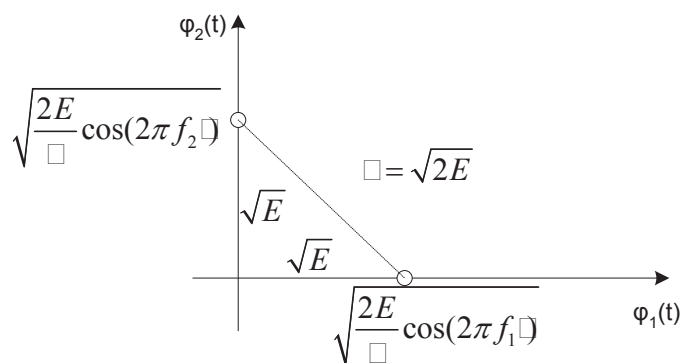
Η δυαδική διαμόρφωση BFSK χρησιμοποιεί δύο διακριτές συχνότητες για την παράσταση των λογικών καταστάσεων 0 και 1. Στην περίπτωση της μη φιλτραρισμένης FSK, η κυματομορφή μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ξεχωριστές ακολουθίες ASK που αθροίζονται προτού εκπεμφθούν από το κανάλι.

2.4.3.2 Παραγωγή και λήψη του σήματος BFSK

Η δυαδική διαμόρφωση FSK (BFSK) μπορεί να δημιουργηθεί με μεταγωγή μεταξύ διαφορετικών πηγών συχνοτήτων χρησιμοποιώντας ένα διακόπτη, αλλά τότε είναι πιθανό να συμβαίνουν άλματα φάσης μεταξύ των καταστάσεων συμβόλων κατά τις στιγμές μετακίνησης του διακόπτη. Κάθε ασυνέχεια φάσης στα όρια των συμβόλων ενισχύει την εμφάνιση υψίσυχνων όρων στο φάσμα που προκύπτει και επομένως αυξάνει το εύρος ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.

Η διαμόρφωση BFSK μπορεί να δημιουργηθεί και με άλλον τρόπο, εάν το σήμα των δεδομένων εφαρμοστεί ως τάση ελέγχου σε έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (voltage control oscillator, VCO). Η μετάβαση από τη μια κατάσταση συμβόλων στην επόμενη γίνεται ομαλά, χωρίς ασυνέχεια φάσης. Η διαμόρφωση FSK αυτού του είδους ονομάζεται FSK συνεχούς φάσης (continuous phase FSK, CPFSK).

Παρακάτω, στο Σχήμα , παρουσιάζεται ο σηματικός αστερισμός για την δυαδική FSK. Σε αυτόν η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων είναι, που αντιπροσωπεύουν τα δύο σύμβολα, είναι (όπως και στη γενικότερη περίπτωση FSK Μ σημείων) ίση με $\Delta = \sqrt{2E}$.

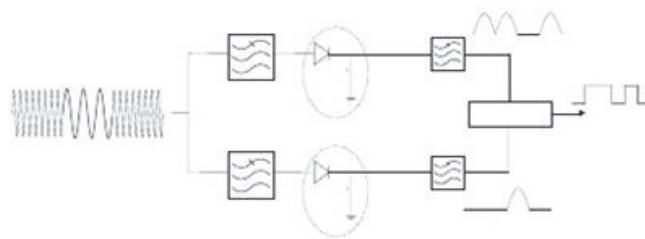


Σχήμα 2.26 Σχηματικό διάγραμμα του δέκτη της διαμόρφωσης M-PSK.

Μια τρίτη μέθοδος παραγωγής της διαμόρφωσης FSK είναι με τη χρήση ενός διανυσματικού ή ορθογωνικού διαμορφωτή (vector ή quadrature modulator), ο οποίος χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μερικές από τις πιο περίπλοκες μορφές διαμόρφωσης CPFSK.

2.4.3.3 Ασύμφωνη ανίχνευση

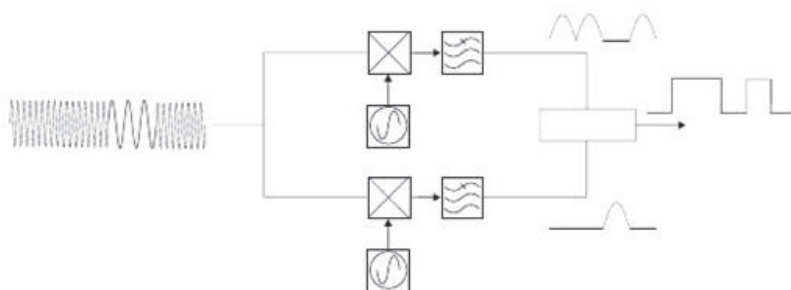
Ένας από τους απλούστερους τρόπους ανίχνευσης της δυαδικής διαμόρφωσης FSK είναι η διαβίβαση του συνολικού σήματος σε δύο φίλτρα διέλευσης ζώνης, που είναι συντονισμένα στις δύο συχνότητες σηματοδότησης, και η ανίχνευση της εξόδου που έχει τη μεγαλύτερη μέση τιμή κατά τη διάρκεια κάθε συμβόλου. Αυτός ο τρόπος συνιστά στην ουσία έναν ασύμφωνο ανιχνευτή περιβάλλουσας που εφαρμόζεται σε δύο ακολουθίες ASK, και οι δύο έξοδοι που προκύπτουν συγκρίνονται σε έναν συγκριτή. Η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη τη φάση των αντίστοιχων συμβόλων.



Σχήμα 2.27 Σχηματικό διάγραμμα ενός ασύμφωνου αποδιαμορφωτή BPSK.

2.4.3.4 Σύμφωνη ανίχνευση

Η σύμφωνη ανίχνευση της FSK έχει πολλές ομοιότητες με αυτήν της ASK, αλλά στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο ανιχνευτές συντονισμένοι στις δύο συχνότητες φορέα. Όπως και στην ASK, η σύμφωνη ανίχνευση και η χρήση προσαρμοσμένων φίλτρων ελαχιστοποιούν την επίδραση του θορύβου στο δέκτη.



Σχήμα 2.28 Σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου αποδιαμορφωτή BPSK.

2.4.3.5 Πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης FSK

- Η διαμόρφωση FSK αποτελεί μια διαμόρφωση σταθερής περιβάλλουσας και επομένως είναι αναίσθητη στις μεταβολές πλάτους που συμβαίνουν στο κανάλι και συμβατή με συστήματα μη γραμμικών πομπών και δεκτών.
- Η ανίχνευση της FSK μπορεί να στηριχτεί στις σχετικές μεταβολές συχνότητας μεταξύ των καταστάσεων συμβόλων και συνεπώς δεν απαιτεί απόλυτη ακρίβεια των τιμών συχνοτήτων που διαδίδονται στο κανάλι. Άρα, η FSK είναι λοιπόν σχετικά ανεκτική στην ολίσθηση συχνότητας του τοπικού ταλαντωτή και τη μετατόπιση Doppler.

2.4.3.6 Μειονεκτήματα της διαμόρφωσης FSK

- Η FSK έχει σχετικά μικρότερη απόδοση εύρους ζώνης από τις ASK και PSK (με εξαίρεση την MSK).
- Ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit και συμβόλων της FSK είναι χειρότερος από της PSK.

Σε αντίθεση με τη Μ-αδική σηματοδοσία ASK και την Μ-αδική σηματοδοσία PSK, η Μ-αδική FSK είναι μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα μέθοδος διαμόρφωσης, επειδή αυξάνει την ανοχή στο θόρυβο του συστήματος ως προς την δυαδική διαμόρφωση FSK και επομένως επιτρέπει στο σχεδιαστή να επιτύχει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλον υψηλού θορύβου. Αυτό είναι δυνατόν μόνο αν χρησιμοποιηθεί ένα σύνολο ορθογώνιων συμβόλων με ακριβώς προσδιορισμένες ισαπέχουσες συχνότητες, το οποίο απαιτεί ένα μεγάλο εύρος ζώνης. Η Μ-αδική διαμόρφωση FSK με ορθογώνια σηματοδοσία είναι μια από τις λίγες τεχνικές όπου η απόδοση του modem πλησιάζει το όριο Shannon για λειτουργία με τον ελάχιστο λόγο E_b/N_0 , δηλαδή -1.59 dB.

Η διαμόρφωση Μ-FSK είναι δυνατόν να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μη ορθογώνιες συχνότητες συμβόλων. Τοποθετώντας τις συχνότητες πολύ κοντά τη μια στην άλλη, είναι δυνατόν να βελτιώσουμε την απόδοση του εύρους ζώνης ως προς την δυαδική FSK, αλλά τότε η ανοχή στο θόρυβο του Μ-αδικού FSK μειώνεται σε σύγκριση με αυτήν του δυαδικού συστήματος, καθώς οι συχνότητες των συμβόλων δεν είναι πια ορθογώνιες.

Για την παράσταση στο χώρο των σημάτων ενός Μ-αδικού ορθογώνιου FSK μπορούμε να φανταστούμε ένα σύστημα συντεταγμένων με Μ αμοιβαία

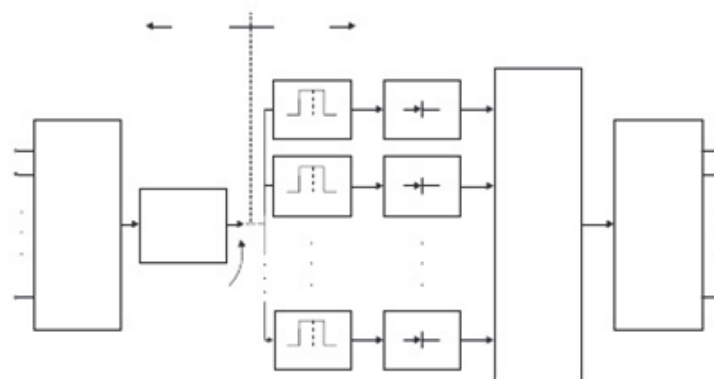
ορθογώνιους άξονες συντεταγμένων. Τότε, τα ανύσματα των σημάτων είναι παράλληλα προς αυτούς τους άξονες.

2.4.3.7 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-FSK

Στον πομπό ενός συστήματος M-FSK εμφανίζεται ένα σύμβολο των m bit στο διάστημα ενός συμβόλου σε έναν μετατροπέα D/A των m bit. Η έξοδος του μετατροπέα εφαρμόζεται σε έναν διαμορφωτή συχνότητας, δηλαδή ένα τμήμα κυκλώματος το οποίο παράγει μια κυματομορφή φέροντος, η συχνότητα της οποίας καθορίζεται από τη διαμορφώνουσα κυματομορφή. Το σήμα που μεταδόθηκε, για τη διάρκεια του διαστήματος συμβόλου, είναι συχνότητας f_0 ή f_1 ή ... ή f_{M-1} με $M=2m$.

2.4.3.8 Ασύμφωνη ανίχνευση της MFSK

Στο δέκτη, το εισερχόμενο σήμα εφαρμόζεται σε M παράλληλα ζωνοπερατά φίλτρα καθένα από τα οποία ακολουθείται από έναν ανιχνευτή περιβάλλουσας. Τα ζωνοπερατά φίλτρα έχουν κεντρικές συχνότητες f_0, f_1, \dots, f_{M-1} . Οι ανιχνευτές περιβάλλουσας εφαρμόζουν τις εξόδους τους σε μία διάταξη που καθορίζει ποια από τις ενδείξεις του ανιχνευτή είναι η μεγαλύτερη και μεταδίδει αυτήν την έξοδο περιβάλλουσας σε έναν μετατροπέα D/A των m bit. Στο σχήμα 2.38 [3] φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα παραγωγής και λήξης ενός σήματος M-FSK, θεωρώντας ασύμφωνη ανίχνευση.

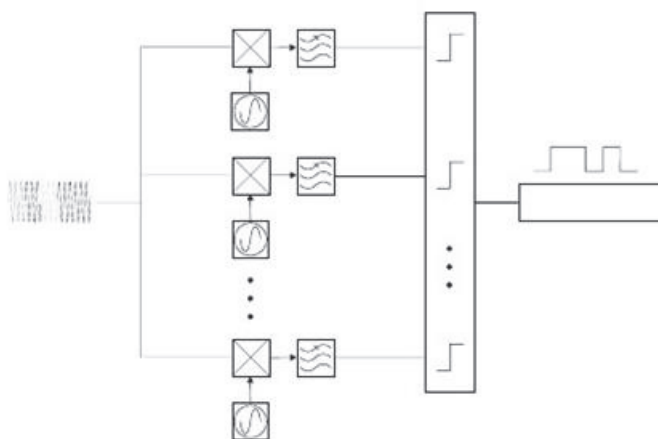


Σχήμα 2.29 Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων με τη χρήση των διαμορφώσεων M-FSK.

2.4.3.9 Σύμφωνη Ανίχνευση

Ένας τυπικός ανιχνευτής της M-αδικής FSK φαίνεται στο σχήμα 2.39 [2]. Αποτελείται από ένα σύνολο συσχετιστών που ακολουθούνται από ένα κύκλωμα λήψης απόφασης, το οποίο αποφασίζει ποιος συσχετιστής έχει μεγαλύτερη έξοδο και επομένως ποιο σύμβολο είχε σταλεί.

Καθώς ο αριθμός των καταστάσεων συμβόλων που χρησιμοποιούνται τείνει στο άπειρο, ο χρόνος υπολογισμού του κάθε συμβόλου αυξάνει υπερβολικά οπότε η επίδραση του θορύβου μειώνεται στο μηδέν. Η απαιτούμενη τιμή του λόγου E_b/N_0 για μετάδοση χωρίς σφάλματα θα προσεγγίζει τότε το όριο του Shannon-Hartley (-1.59 dB), για το οποίο μπορεί να επιτευχθεί επικοινωνία χωρίς σφάλματα ανεξάρτητα από το πόσο μεγάλο εύρος ζώνης χρησιμοποιείται.



Σχήμα 2.30 Σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου ανιχνευτή M-FSK.

2.4.4 Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM/APK)

Μέχρι τώρα έχουν περιγραφεί διαμορφωτές μίας ιδιότητας, χρησιμοποιώντας σύμβολα φάσης, πλάτους ή συχνότητας για τη μεταφορά των δεδομένων. Η απόδοση της διαμόρφωσης μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω συνδυάζοντας δύο ή περισσότερα είδη συμβόλων, κάνοντας τον αναπόφευκτο συμβιβασμό ανάμεσα στην τελική φασματική απόδοση και την ανοχή στο θόρυβο. Ο συνδυασμός που χρησιμοποιείται συχνότερα είναι μεταξύ πλάτους και φάσης, που άλλοτε αποκαλείται M-αδική σηματοδότηση APK (Amplitude and Phase Keying) και άλλοτε M-αδική σηματοδότηση QAM (Quadrature Amplitude Modulation), ανάλογα με τους περιορισμούς που τίθενται στη σχέση πλάτους και φάσης.

2.4.4.1 Παραγωγή και λήψη του σήματος M-QAM

Η απλούστερη μορφή διαμόρφωσης QAM είναι στην πραγματικότητα το σύνολο των συμβόλων της QPSK, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως δύο ορθογώνιοι φορείς (με διαφορά φάσης 90ο) διαμορφωμένοι κατά πλάτος, με στάθμες πλάτους $+A$ και $-A$.

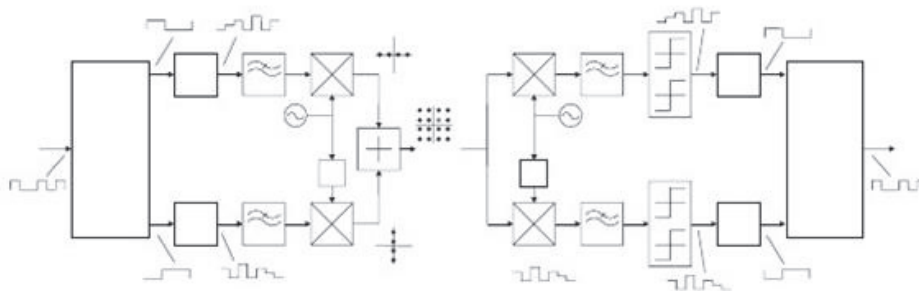
Αυξάνοντας τον αριθμό των σταθμών πλάτους κάθε φορέα σε τέσσερις, για παράδειγμα $\pm A$ και $\pm 3A$, προκύπτουν 16 συνδυασμοί συμβόλων στην έξοδο του πομπού, οι οποίοι απέχουν εξίσου στο διάγραμμα αστερισμού και αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένο πλάτος και φάση ο καθένας. Μπορεί να γίνει επιπλέον μορφοποίηση των παλμών με φιλτράρισμα των ακολουθιών συμβόλου εισόδου βασικής ζώνης με τον ίδιο τρόπο που θα γινόταν στην περίπτωση της δυαδικής μετάδοσης ASK.

Ο διαμορφωτής χρησιμοποιεί και πάλι την ορθογωνικότητα μεταξύ ημιτονικού και συνημιτονικού φέροντος και έτσι επιτρέπει την ανεξάρτητη ανίχνευση των δύο M-αδικών ακολουθιών δεδομένων ASK που εισέρχονται στο δέκτη.

2.4.4.2 Ανίχνευση της QAM

Η μέθοδος διαμόρφωσης QAM μπορεί να αποκωδικοποιηθεί χρησιμοποιώντας σύμφωνη ή διαφορικά σύμφωνη ανίχνευση, όπως ακριβώς και στα συστήματα διαμόρφωσης PSK.

Όσον αφορά τη σύμφωνη ανίχνευση, ένας αποδιαμορφωτής QAM απαιτεί την ανάκτηση των ορθογώνιων φερόντων στο δέκτη, όπως ακριβώς και στη μέθοδο QPSK. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρόμοια κυκλώματα ανίχνευσης φορέα N-οστής δύναμης, παρόλο που το πρόβλημα αβεβαιότητας φάσης που εμφανίζεται στο ανακτημένο φέρον περιπλέκεται εδώ σημαντικά, καθώς τώρα στα δεδομένα υπάρχει και το στοιχείο του πλάτους.



Σχήμα 2.31 Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή – αποδιαμορφωτή 16-QAM.

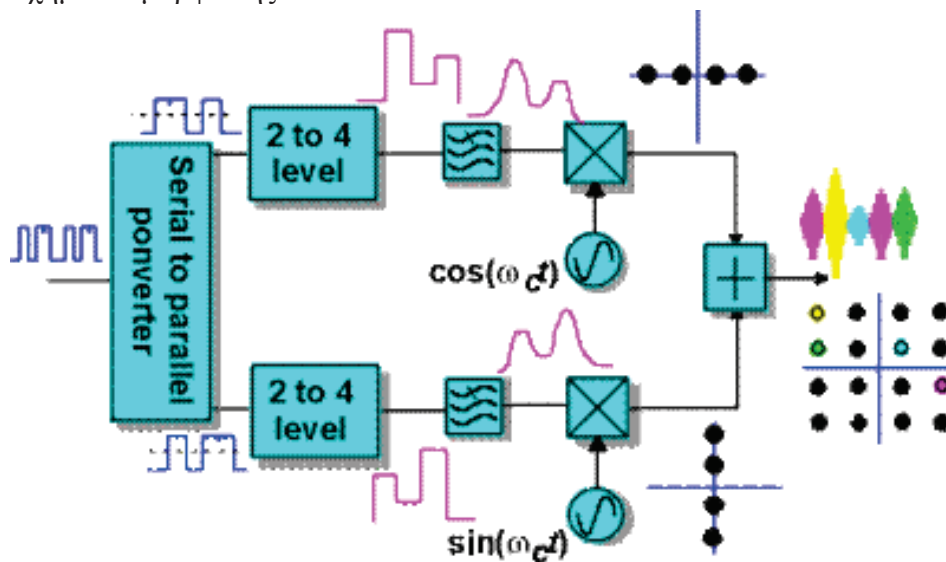
Η έξοδος κάθε αποδιαμορφωτή είναι ένα σύνολο συμβόλων βασικής ζώνης πολλαπλών επιπέδων. Στην ιδανική περίπτωση τα σήματα αυτά θα έπρεπε να υποστούν προσαρμοσμένο φιλτράρισμα έτσι ώστε η ανοχή στο θόρυβο να γίνει μέγιστη πριν αυτά διαβιβαστούν σε ένα σύνολο συγκριτών, οι οποίοι θα προσδιορίσουν τη στάθμη της εξόδου κάθε αποδιαμορφωτή κατά τη στιγμή της δειγματοληψίας και επομένως θα προσδιορίσουν ποιο σύμβολο έχει αποσταλεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΑΛΤΟΥΣ (QAM)

Η διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation) είναι ένας συνδυασμός των τεχνικών διαμόρφωσης PSK και ASK. Συγκεκριμένα, η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με τη βοήθεια σήματος το οποίο είναι διαμορφωμένο τόσο κατά πλάτος όσο και κατά φάση.

Σε σύγκριση με τη διαμόρφωση φάσης, η QAM χρησιμοποιεί λιγότερα επίπεδα φάσης για τον ίδιο αριθμό συμβόλων. Η διαμόρφωση QPSK αποτελεί την απλούστερη μορφή της, αφού είναι συνδυασμός δύο ορθογώνιων μεταξύ τους συνιστωσών με πλάτη $+A$ και $-A$ αντίστοιχα. Πρόκειται δηλαδή για ένα 4-QAM σχήμα διαμόρφωσης.



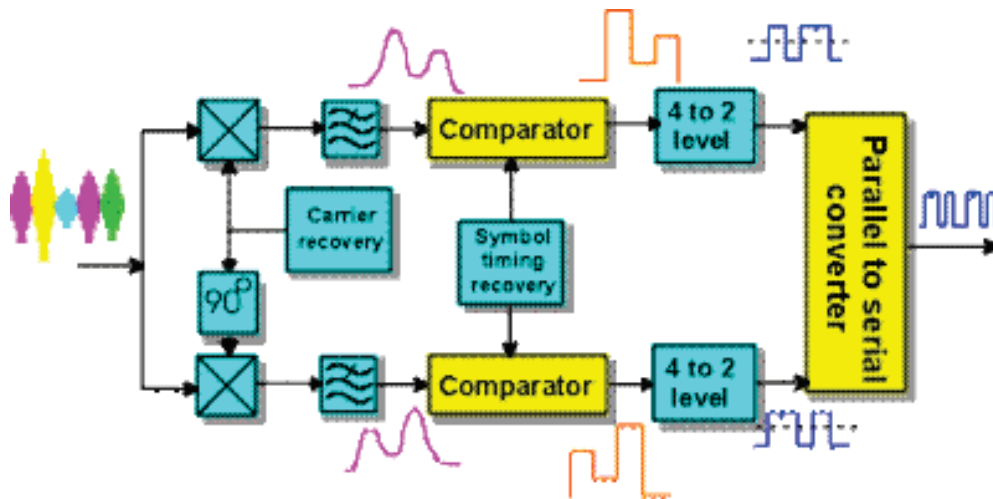
Σχημα 3.1 Διαμορφωση QAM

Αυξάνοντας τον αριθμό των σταθμών πλάτους κάθε φορά σε τέσσερις, για παράδειγμα $\pm A$ και $\pm 3A$, προκύπτουν 16 δυνατοί συνδυασμοί συμβόλων στην έξοδο του πομπού, οι οποίοι απέχουν εξίσου στο διάγραμμα αστερισμού και αντιπροσωπεύονται από συγκεκριμένο πλάτος και φάση ο καθένας.

Τα σημεία του διαγράμματος αστερισμού μπορούν να έχουν τετραγωνική μορφή (square QAM) -σχήμα 3.1 (β) ή να βρίσκονται σε ομόκεντρους κύκλους (star QAM) -σχήμα 3.1 (α). Στην περίπτωση του κυκλικού διαγράμματος, κάθε διαφορά φάσης μεταξύ των συμβόλων αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο διάγραμμα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα πλάτους, ο σηματοθορυβικός λόγος εξαρτάται από το μέγεθος ring ratio (RR) ο οποίος είναι ο λόγος των ακτινών των δύο κύκλων, πάνω στους οποίους βρίσκονται τα σύμβολα.

Η διάταξη αυτή των συμβόλων είναι εύκολο να δημιουργηθεί από κυκλωματική άποψη . Από την άλλη όμως, δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση όσον αφορά το θόρυβο, αφού όπως φαίνεται και στο σχήμα τα σύμβολα στον εσωτερικό κύκλο είναι πιο κοντά σε σχέση με τον εξωτερικό . Το παραπάνω οδήγησε στη χρήση της QAM τετραγωνικής μορφής, η οποία προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τον θόρυβο. Το βασικό τους πλεονέκτημα όμως είναι ότι επιτρέπουν τη χρήση απλών διατάξεων διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης.

Η διαμόρφωση QAM μπορεί να αποκωδικοποιηθεί είτε με σύμφωνη είτε με διαφορετικά σύμφωνη ανίχνευση, όπως η QPSK.



Σχήμα 3.2 Αποδιαμόρφωση QAM

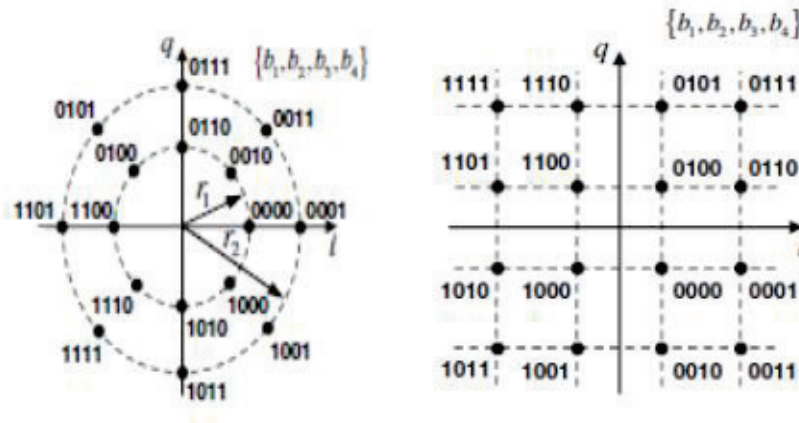
Για την ανίχνευση του σήματος M-QAM απαιτείται η ανάκτηση των ορθογωνικών φερόντων. Το πρόβλημα της αβεβαιότητας φάσης περιπλέκεται ακόμα περισσότερο επειδή στα δεδομένα υπάρχει πλέον και το στοιχείο του πλάτους.

Στην έξοδο κάθε ορθογωνικού αποδιαμορφωτή προκύπτουν τα σύμβολα βασικής ζώνης πολλαπλών επιπέδων, τα οποία θα πρέπει πριν αναγνωριστούν από το κύκλωμα ανίχνευσης του δέκτη να υποστούν προσαρμοσμένο φιλτράρισμα.

Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των δύο ορθογώνιων φερόντων σημάτων και τη σχεδίαση των συμβόλων παράλληλα στους δύο άξονες. Ενώ τέτοιοι πομποί ήταν ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οπτικά συστήματα άργησαν να αναπτυχθούν . Το βασικό τους πλεονέκτημα όμως είναι ότι επιτρέπουν τη χρήση απλών διατάξεων διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης.

Η QAM χρησιμοποιείται ευρύτατα στις ψηφιακές επικοινωνίες. Εμφανίζει μεγαλύτερη φασματική απόδοση καθώς έχει τη δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων ψηφίων ανά σύμβολο υπό την ίδια μέση ενέργεια συμβόλου. Οι συνηθέστερες μορφές της είναι η 16-QAM , η 64-QAM και η 256-QAM. Προφανώς όσο τα bits ανά σύμβολο στο δέκτη αυξάνονται, το σύστημα γίνεται περισσότερο ευάλωτο στο

θόρυβο και άλλες παρεμβολές, εφόσον η απόσταση των συμβόλων στο διάγραμμα αστερισμού μειώνεται.



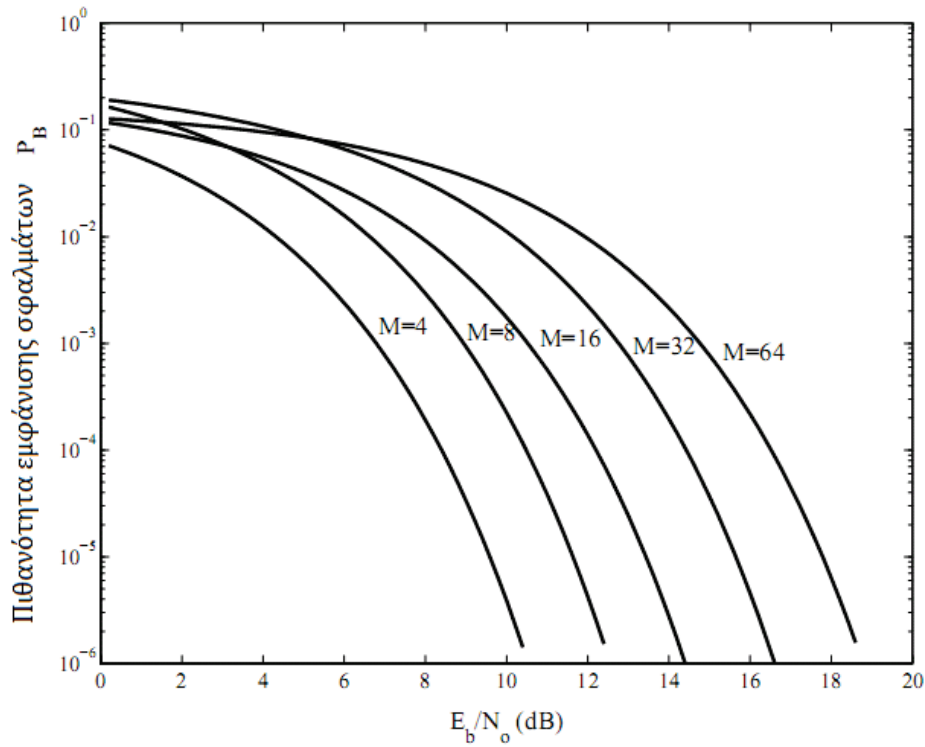
Σχήμα 3.1 Διάγραμμα Αστερισμού 16-QAM (α) κυκλικής μορφής (β) τετραγωνικής μορφής

3.1.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη M-QAM

Φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density – PSD) [f_c συχνότητα φέροντος]:

$$P(f) = \frac{mE_b}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \pi (f - f_c) mT}{\pi (f - f_c) mT} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi (f + f_c) mT}{\pi (f + f_c) mT} \right]^2 \right\}$$

όπου E_b η ενέργεια ανά bit και m το πλήθος των bits/symbol ($M = 2^m$).



- Φασματική Απόδοση

$$Q = m \text{ bits/sec/Hz}$$

Αύξηση απόδοσης Q με την αύξηση των ομαδοποιημένων bits ανά σύμβολο, συνεπώς και με τον αριθμό των συμβόλων M .

- Ρυθμός λήψης λανθασμένων συμβόλων P_S

$$P_S \leq 2 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{2(M-1)}} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right)$$

- Πιθανότητα εμφάνισης λανθασμένων bits P_B

$$P_B = \frac{P_S}{\log_2 M}$$

Στη συνέχεια αναλύεται επιγραμματικά, η συμπεριφορά των τρόπων διαμόρφωσης που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε σχέση με τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

3.1.2 Θόρυβος

Η απόδοση ως προς το θόρυβο υποβαθμίζεται όσο τα ψηφία ανά σύμβολο αυξάνονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ευκλείδια απόσταση μεταξύ των συμβόλων γίνεται μικρότερη. Συγκρίνοντας τα σχήματα διαμόρφωσης για σύμφωνους ασύγχρονους δέκτες, στους οποίους επικεντρωνόμαστε στην παρούσα εργασία διαπιστώνουμε τα εξής. την 4-PSK με την BPSK (δυαδική διαμόρφωση φάσης) βλέπουμε ότι η πρώτη παρουσιάζει απόδοση περίπου 1dB χειρότερη από τη δεύτερη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο τα bits/σύμβολο αυξάνονται. Για παράδειγμα η 8-PSK απαιτεί σηματοθορυβικό λόγο (SNR) 3.5dB μεγαλύτερο από την QPSK και η 16-PSK, SNR 4.5dB μεγαλύτερο από την 8-PSK.

Την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν τα σχήματα QAM σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα για συγκεκριμένο αριθμό bits/ σύμβολο. Για παράδειγμα η 16-QAM έχει OSNR 4dB μεγαλύτερο από την 16-PSK.

3.1.3 Φασματική γραμμή laser

Οι απαιτήσεις όσον αφορά τη φασματική γραμμή του laser που χρησιμοποιείται αυξάνονται όσο αυξάνονται τα επίπεδα της φάσης που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των συμβόλων. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο θόρυβος φάσης του laser είναι επίσης μεγαλύτερος όσο περισσότερα είναι τα επίπεδα της φάσης που πρέπει να μεταδοθούν. Στα σύμφωνα συστήματα οι απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα συστήματα IMDD. Ιδιαίτερα στους ομόδυνους σύγχρονους δέκτες οι οποίοι θα αναφερθούν στα παρακάτω κεφάλαια, η φασματική γραμμή του laser είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος όταν χρησιμοποιούνται διαμορφώσεις όπως η 16-PSK, 16-QAM και 64-QAM ακόμα και όταν στη συνέχεια η επεξεργασία του σήματος γίνεται ψηφιακά. Για παράδειγμα, για ρυθμό μετάδοσης 40 Gb/s απαιτούνται φάσματα 240kHz, 120kHz και 1kHz για διαμορφώσεις 16-PSK, 16-QAM και 64-QAM αντίστοιχα. Στις απαιτήσεις αυτές, μπορούν να ανταποκριθούν τα lasers που είναι εμπορικά διαθέσιμα σήμερα, ωστόσο η πρακτική τους χρήση κρίνεται απαγορευτική λόγω του μεγάλου τους κόστους.

3.1.4 Οπτικοί Διαμορφωτές QAM

Στη διαμόρφωση QAM μπορούν να δημιουργηθούν κυκλικά και τετραγωνικά διαγράμματα αστερισμού. Ανάλογα με το διάγραμμα αστερισμού που δημιουργείται, οι πομποί QAM χωρίζονται σε κατηγορίες. Οι διατάξεις που δημιουργούν κυκλικά διαγράμματα λέγονται star QAM και ανιχνεύονται από δέκτες που εκτελούν διαφορική αποδιαμόρφωση. Σε αντίθεση με τους πομπούς που παράγουν σήματα

QAM με διάγραμμα αστερισμού κυκλικής μορφής, οι πομποί τετραγωνικής μορφής QAM (square QAM) παράγουν σήματα που ανιχνεύονται από σύμφωνους σύγχρονους δέκτες και ονομάζονται πομποί square QAM. Στη βιβλιογραφία συναντώνται με τις εξής ονομασίες: συμβατικός IQ transmitter, σειριακός τετραγωνικός QAM transmitter, enhanced IQ transmitter, tandem QPSK transmitter, multi parallel MZM transmitt

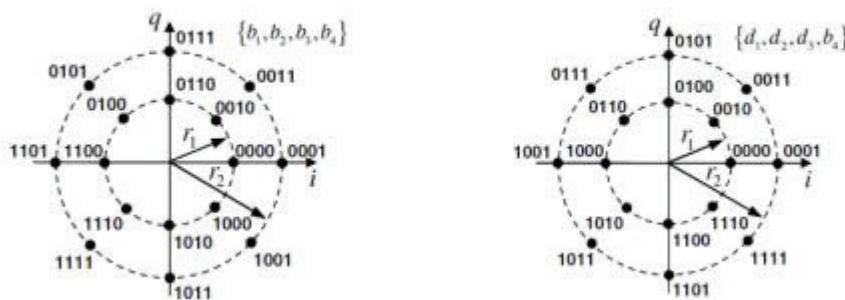
3.1.5 Star QAM

Το γεγονός ότι στη star QAM οι διαφορές φάσης δύο οποιονδήποτε συμβόλων αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο φάσης στο διάγραμμα αστερισμού σημαίνει ότι η πληροφορία στη φάση του σήματος μπορεί να υποστεί διαφορική κωδικοποίηση όπως στην περίπτωση των σημάτων DPSK. Στο σχήμα 2.4.7 βλέπουμε έναν σειριακό πομπό κατάλληλο για τη δημιουργία 16-QAM ή 2ASK-8DPSK σημάτων. Όπως παρατηρείται, το μεγαλύτερο μέρος είναι ίδιο με αυτό ενός πομπού DPSK.

Ουσιαστικά, στο μέρος που αφορά τη διαμόρφωση της φάσης (DPSK) προστίθεται ένας διαμορφωτής Mach-Zehnder ο οποίος εκτελεί τη διαμόρφωση πλάτους και οδηγεί στη δημιουργία των διαφορετικών 'δαχτυλιδιών' έντασης. Ο διαμορφωτής οδηγείται από το ψηφίο $4k b$, το οποίο ορίζει αν το τρέχον σύμβολο βρίσκεται στον εσωτερικό ή εξωτερικό κύκλο του αστερισμού.

Για την καλύτερη αντίληψη της διαδικασίας δημιουργίας των 16-QAM σημάτων είναι ευκολότερο να μελετώνται τα διαγράμματα αστερισμού. Στο σχήμα 3.3 (α) φαίνεται το αρχικό διάγραμμα αστερισμού, όπου αποτυπώνονται τα δεκαέξι σημεία χρησιμοποιώντας κώδικα Gray. Πρόκειται δηλαδή για τα bits $b_1 b_2 b_3 b_4 \{ , , , \} b b b b$ που προκύπτουν μετά την αποπολυπλεξία των αρχικών δεδομένων. Στη συνέχεια, στο σχήμα 3.3 (β) φαίνεται η αναδιάταξη των σημείων του αστερισμού μετά τη διαφορική κωδικοποίηση, από την οποία προκύπτουν τα bits $d_1 d_2 d_3 d_4 \{ d , d , d , d \}$. Όπως και στην περίπτωση της διαμόρφωσης 16-DPSK, υπάρχουν 4 bits/σύμβολο.

Παρ' όλα αυτά στην περίπτωση της 16-QAM επιτυγχάνεται μεγαλύτερη φασματική απόδοση χωρίς να χρησιμοποιείται κάποιος πολύπλοκος κωδικοποιητής.



Σχήμα 3.3 Κωδικοποίηση στον πομπό 16-QAM: Διαγράμματα αστερισμού (α) πριν την κωδικοποίηση (β) μετά την κωδικοποίηση

Στη γενική περίπτωση ενός σειριακού QAM πομπού παλμών NRZ το σήμα που παράγεται είναι (θεωρώντας ότι έχει 2 επίπεδα πλάτους)

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} \cdot e^{j \frac{u_{PM_1}(t)}{V_\pi} \pi} \cdot \dots \cdot e^{j \frac{u_{PM_{m-1}}(t)}{V_\pi} \pi} \cdot \cos\left(\frac{u_{IM}(t)}{2V_\pi} \pi\right)$$

όπου τα ηλεκτρικά σήματα u_{PM} δίνονται από την εξίσωση. Το ηλεκτρικό σήμα το οποίο θα οδηγήσει το MZM εξαρτάται από την παράμετρο ring ratio RR, και αφορά το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης και είναι :

$$u_{IM}(t) = -\frac{2 \arccos\left(\frac{1}{RR}\right)}{\pi} \cdot V_\pi + \frac{2 \arccos\left(\frac{1}{RR}\right)}{\pi} \cdot V_\pi \cdot \sum_k (b_{mk} \cdot p(t - kT_s)), b_{mk} \in \{0,1\}$$

όπου b_{mk} το τελευταίο ψηφίο ενός συμβόλου με m bits συνολικά.

3.1.6 Σειριακός Τετραγωνικός QAM Πομπός

Το γεγονός ότι τα επίπεδα της φάσης στο διάγραμμα αστερισμού του square QAM δεν ισαπέχουν όπως στο star QAM σημαίνει ότι δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε τα επίπεδα της φάσης των συμβόλων μόνο με τη χρήση διαδοχικών διαμορφωτών φάσης που οδηγούνται με δυαδικά ηλεκτρικά σήματα.

Το οπτικό κομμάτι ενός σειριακού QAM transmitter αποτελείται από δύο διαδοχικούς οπτικούς διαμορφωτές :έναν διαμορφωτή Mach-Zehnder (MZM) και έναν διαμορφωτή φάσης (PM), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του πλάτους και της φάσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που παράγονται παλμοί RZ, χρησιμοποιείται ένας MZM ακόμα.

Γενικά ένα οποιοδήποτε σήμα QAM μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση ενός διαμορφωτή Mach-Zehnder. Όσο αυξάνονται όμως τα bits ανά σύμβολο, αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του ηλεκτρικού μέρους της διάταξης. Για τη δημιουργία ηλεκτρικών σημάτων πολλαπλών επιπέδων, τα οποία θα οδηγούν τους διαμορφωτές χρησιμοποιείται ένας level generator, όπως και στην περίπτωση του συμβατικού IQ transmitter. Από άποψη κυκλώματος, αποτελείται από κάποιες πύλες AND, NOR, XOR, XNOR, έναν αντιστροφέα και έναν εξασθενητή. Η διάταξη αυτή αποτελεί και την κυριότερη πρόκληση όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή των συγκεκριμένων πομπών.

Στην περίπτωση NRZ παλμών το σήμα στην έξοδο του πομπού δίνεται από την εξίσωση:

$$E_s(t) = \sqrt{P_s} \cdot e^{j(\omega_s t + \phi_s)} \cdot \cos\left(\frac{u_{IM}(t)}{2V_\pi} \pi\right) \cdot e^{j \frac{u_{PM}(t)}{V_\pi} \pi}$$

Για να δημιουργηθούν τα κατάλληλα επίπεδα πλάτους και φάσης, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικά σήματα με εξισώσεις:

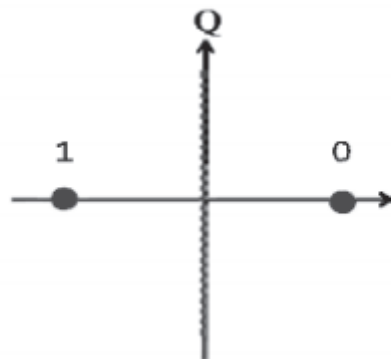
$$u_{IM}(t) = -V_\pi + \frac{2V_\pi}{\pi} \cdot \sum_k (\arcsin(\frac{\sqrt{i_k^2 + q_k^2}}{2}) \cdot p(t - kT_s))$$

$$u_{PM}(t) = \frac{V_\pi}{\pi} \cdot \sum_k (\arg[i_k, q_k] \cdot p(t - kT_s))$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις εφαρμόζονται για κάθε είδος QAM σήματος.

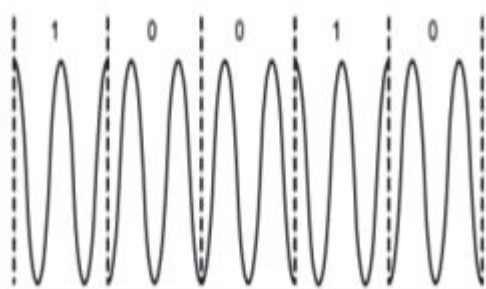
3.2 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης –PSK

Στη διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (Phase Shift Keying –PSK) τα ψηφιακά δεδομένα μεταδίδονται με την αλλαγή της φάσης του φέροντος. Ανάλογα με τον αριθμό των συμβόλων και των bits ανά σύμβολο, χρησιμοποιείται ένας καθορισμένος αριθμός φάσεων του φέροντος. Στην απλούστερη μορφή της, τη δυαδική διαμόρφωση φάσης (BPSK) η φάση του οπτικού σήματος λαμβάνει τις τιμές 0 και π ανάλογα με το αν το μεταδιδόμενο σήμα ψηφίο είναι '0' ή '1'. Όσον αφορά, το διάγραμμα αστερισμού της BPSK κωδικοποίησης, αποτελείται από δύο σημεία, σε θέσεις συμμετρικές ως προς την αρχή των αξόνων. Αντίστοιχα με τα άλλα σχήματα διαμόρφωσης, υπάρχει η m-αδική διαμόρφωση φάσης, στην οποία $\log m$ διαδοχικά bit κωδικοποιούνται σε μία από τις m δυνατές φάσεις.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα Αστερισμού BPSK

Βασικό πλεονέκτημα της διαμόρφωσης φάσης είναι ότι το πλάτος του πεδίου παραμένει σταθερό, κάτι που οδηγεί σε μικρότερη παραμόρφωση από μη-γραμμικά φαινόμενα



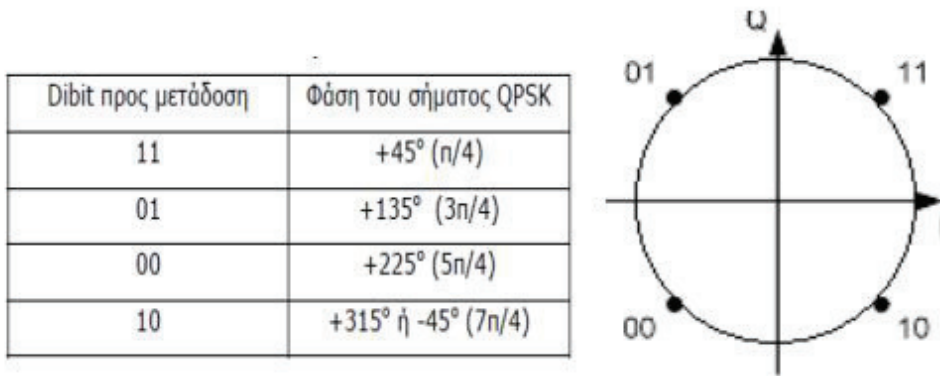
Σχημα 3.5 M-αδική ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (M-αδική PSK)

Εάν εκπέμπουμε δυαδική πληροφορία PSK στο συνημιτονικό όρο ενός φέροντος και ταυτόχρονα εκπέμπουμε ένα δεύτερο σήμα δυαδικής πληροφορίας στον ημιτονικό του ίδιου φέροντος, τότε θα είναι δυνατό να ανιχνεύσουμε ανεξάρτητα τα δύο σήματα. Για να γίνει αυτό η μόνη προϋπόθεση είναι ο κάθε ανιχνευτής να υπολογίσει τη μέση τιμή κατά την διάρκεια μιας περιόδου συμβόλου, που να διαρκεί έναν ακέραιο αριθμό πλήρων κύκλων του φέροντος.

Μπορούμε να φανταστούμε ένα σύστημα διαμόρφωσης PSK με τέσσερις καταστάσεις φάσης, 0° , 90° , 180° και 270° , σε ορθογωνικότητα φάσης (quadrature) 90° η μία από την άλλη. Επομένως αυτή η τετραδική μέθοδος PSK ονομάζεται Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK). Η ιδιότητα της ορθογωνικότητας της QPSK σημαίνει ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή πληροφορίας με ταχύτητα διπλάσια από αυτήν της BPSK στο ίδιο εύρος ζώνης, χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοση της ανίχνευσης ως προς την BPSK.

3.2.1 Ορθογώνια Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης -Quadrature Phase Shift Keying

Πρόκειται για μια πιο εξελιγμένη μορφή της PSK. Βασίζεται στην έκφραση του σήματος σε μία συμφασική και μία ορθογώνια συνιστώσα. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως 4-PSK, αφού έχουμε μετάδοση 2 bit ανά σύμβολο. Πρόκειται για τα σύμβολα 11, 01, 10, 00. Ανάλογα με το προς μετάδοση σύμβολο η φάση του σήματος παίρνει συγκεκριμένες τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.



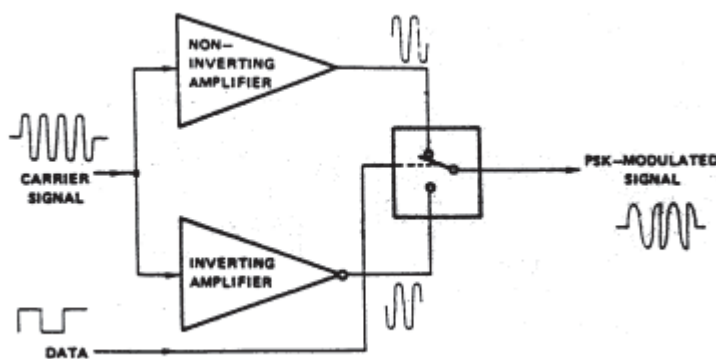
Σχημα 3.6 Διαγραμμα Αστερισμού QPSK

Το διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης QPSK φαίνεται στο σχήμα. Όπως παρατηρείται, εφόσον πρόκειται για 4-αδική διαμόρφωση θα έχουμε 4 σημεία με ίδιο πλάτος που σχηματίζουν τις γωνίες που αναφέρονται παραπάνω.

3.2.2 Παραγωγή και εκπομπή PSK

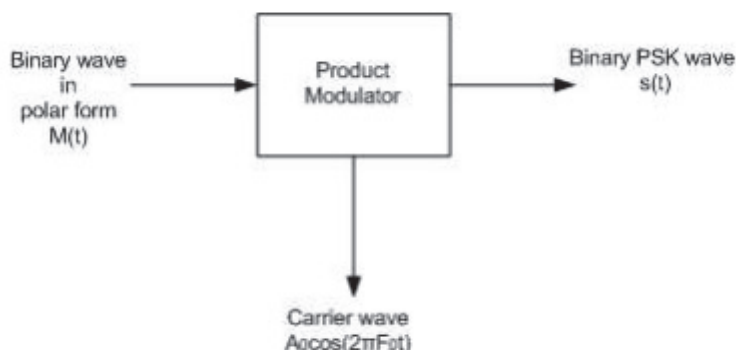
Ο πομπός εκπομπής ψηφιακών κατά φάση διαμορφωμένων σημάτων αποτελείται από τις παρακάτω τρεις δομικές μονάδες :

α) Τον διαμορφωτή που λαμβάνει την ψηφιακή ακολουθία δεδομένων, το φορέα του οποίου η φάση αλλάζει ανάλογα με το προς διαμόρφωση πληροφοριακό σήμα και τον κανόνα “κωδικοποίησης” που με τη σειρά του εξαρτάται από το συγκεκριμένο είδος Phase-modulation. Αν πρόκειται για Binary Phase - Shift Keying (BPSK), ουσιαστικά ο διαμορφωτής αποτελεί έναν διακόπτη ο οποίος επιλέγει τον φορέα ή την αναστραμμένη κυματομορφή του φορέα ελεγχόμενος από την ακολουθία δεδομένων, όπως φαίνεται και από το παρακάτω Σχήμα.



Σχημα 3.7 Διαμορφωτής BPSK

Η υλοποίηση του διαμορφωτή στην περίπτωση αυτή γίνεται με τη βοήθεια ενός product modulator όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα



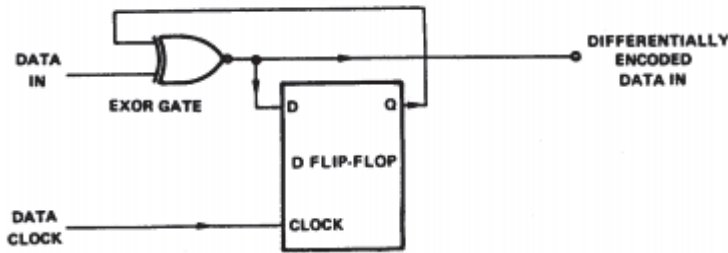
Σχίμα 3.8 Υλοποίηση Διαμορφωτή BPSK

Όσον αφορά την παραγωγή Differential Phase-Shift Keying (DPSK) σημάτων, έχουμε ένα επιπλέον στάδιο που είναι αυτό του differential encoding. Στην περίπτωση αυτή κωδικοποιούμε το πληροφοριακό περιεχόμενο μιας ακολουθίας δεδομένων σε μεταβάσεις φάσεων του προς μετάδοση σήματος. Για παράδειγμα, μπορεί το σύμβολο 0 να αντιπροσωπεύει αλλαγή bit σε μια ακολουθία δεδομένων, ενώ το σύμβολο 1 να αντιπροσωπεύει την μη αλλαγή bit. Το Σχήμα δείχνει τα δύο βήματα για την παραγωγή ενός DPSK σήματος υποθέτοντας ότι η ακολουθία ψηφιακών δεδομένων είναι η 10010011. Παρατηρούμε στην περίπτωση αυτή την ανάγκη ύπαρξης ενός επιπλέον bit (το 1 στο συγκεκριμένο παράδειγμα).

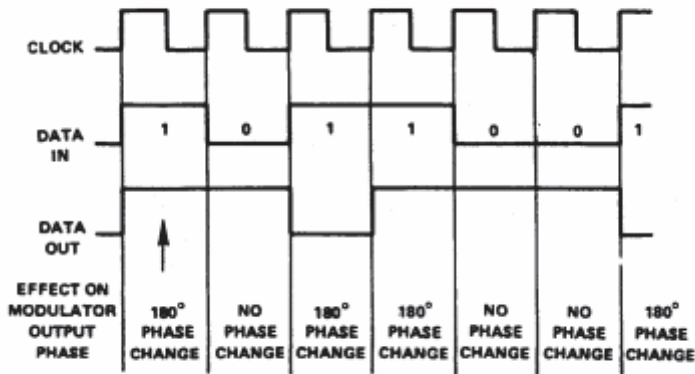
Binary Data		1	0	0	1	0	0	1	1
Differentially Encoded Binary Data	1 Initial Bit	1	0	1	1	0	1	1	1
Phase of DPSK Signal (Radians)	0	0	π	0	0	π	0	0	0

Σχίμα 3.9 Παραγωγή DPSK σήματος

Το λογικό διάγραμμα ενός differential encoder παρατίθεται στο παρακάτω Σχήμα ενώ στο επόμενο Σχήμα παρατίθεται ένα ακόμα παράδειγμα και όπου φαίνεται ότι τελικά τα data bits αντιπροσωπεύονται από αλλαγή ή μη αλλαγή φάσης. Αυτό το τελευταίο, υποδηλώνει ότι δεν είναι πλέον αναγκαία η ύπαρξη στον DPSK δέκτη "αντιγράφου" του χρησιμοποιούμενου στον πομπό φορέα.



(a) Differential encoder



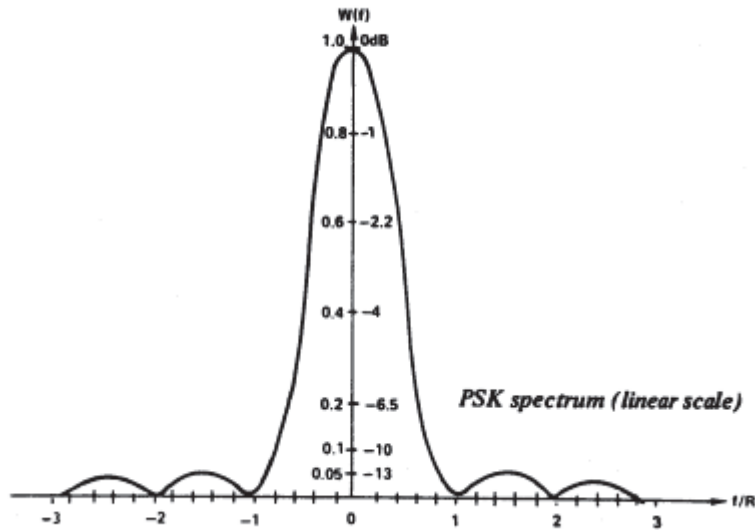
Σχημα 3.10 Λογικο Διαγραμμα differential encoder

β) Τον ενισχυτή ισχύος που ενισχύει το διαμορφωμένο σήμα και το φέρνει στην επιθυμητή στάθμη. Καθώς ο ενισχυτής ισχύος λαμβάνει σήμα σταθερού πλάτους και πρέπει να παράγει ομοίως σήμα σταθερού πλάτους, αυτός δεν θα πρέπει να είναι ένας linear amplifier. Για το σκοπό αυτό στην τελική βαθμίδα ενός PSK πομπού χρησιμοποιούνται ενισχυτές Class C.

γ) Το φίλτρο εξόδου το οποίο έχει σκοπό να μειώσει τις εκπεμπόμενες αρμονικές και τη στάθμη των πλευρικών λοβών του μεταδιδόμενου φάσματος. Η εξάλειψη των εκπεμπόμενων αρμονικών είναι αναγκαία καθώς οι Class C ενισχυτές παράγουν μεγάλο αριθμό αυτών. Η κύρια λειτουργία όμως ενός φίλτρου εξόδου είναι η εξασθένιση των πλευρικών λοβών που συνοδεύουν τον κύριο λοβό των μεταδιδόμενων PSK σημάτων. Η μαθηματική έκφραση που δίνει το φάσμα PSK σημάτων είναι:

$$W(f) = T \left[\frac{\sin(\pi f T)}{R - \pi f T} \right]^2 = \frac{1}{R} \left[\frac{\sin(\pi f / R)}{R - (\pi f / R)} \right]^2$$

Το Σχήμα απεικονίζει το φάσμα PSK σημάτων, όπου το εύρος του κύριου λοβού είναι διπλάσιο του symbol rate, το πλάτος των πλευρικών λοβών εξασθενεί αργά καθιστώντας συνεπώς αναγκαία την ύπαρξη του φίλτρου εξόδου.

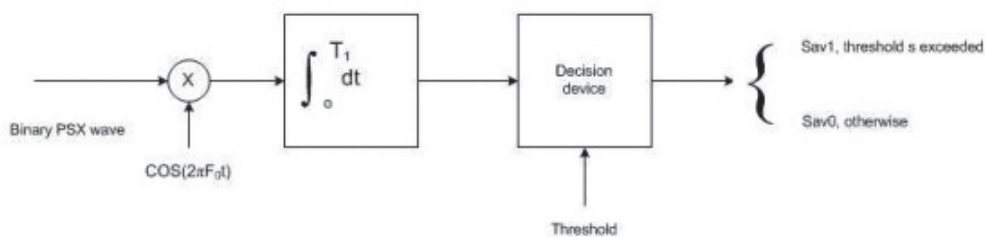


Σχήμα 3.11 Φάσμα PSK σημάτων

3.2.3 Ανίχνευση και λήψη BPSK και DPSK σημάτων

Για την αποδιαμόρφωση BPSK χρησιμοποιείται ο coherent detector του Σχήματος που αποτελείται από τις παρακάτω μονάδες :

- (a) Ένα πολλαπλασιαστή στον οποίο εφαρμόζεται και ένας τοπικά παραγόμενος φορέας.
- (b) Ένα ολοκληρωτή που ουσιαστικά επιτελεί low-pass φιλτράρισμα.
- (c) Μία μονάδα απόφασης που συγκρίνει την έξοδο του ολοκληρωτή με μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, διαφορετικά για τιμή bit "0".



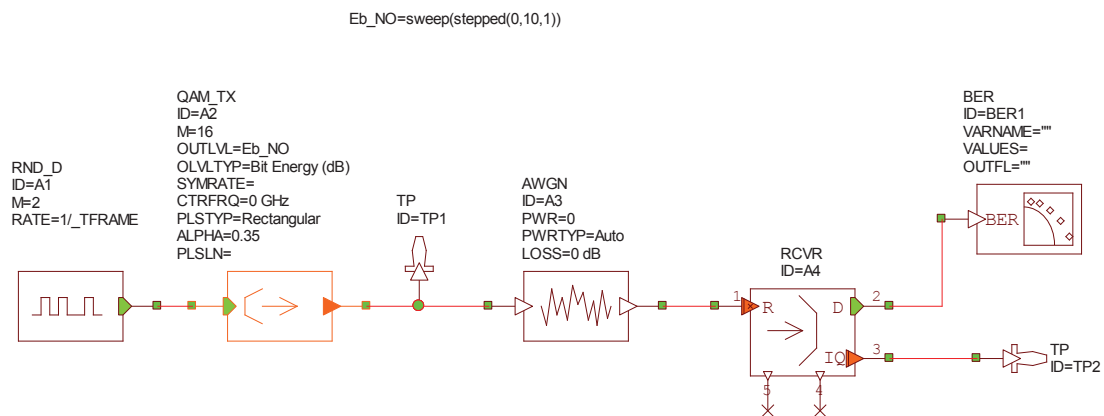
Σχήμα 3.12 Αποδιαμορφωτής BPSK

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ QAM ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Θα υλοποιήσουμε την διαμόρφωση QAM παρουσία θορύβου (AWGN) παρουσιάζοντας και τα διαγράμματα των μετρήσεων που προκύπτουν.

Αρχικά δημιουργήσαμε την τοπολογία της προσομοίωσης. :



Σχημα 4.1 Τοπολογία Προσομοίωσης MPSK

Γεννήτρια τυχαίων Σημάτων

Χρησιμοποιήσαμε αρχικά μια γεννήτρια που παράγει ψευδοτυχαίες ακολουθίες δυαδικών συμβόλων (RND_D) .

Διαμορφωτής QAM

Το τυχαίο σήμα διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας ένα διαμορφωτή παλμών QAM_TX . Ο διαμορφωτής παράγει το σήμα βασικής ζώνης μιγαδικής περιβάλλουσας (baseband , complex-envelope) βάση του τυχαίου σήματος στην είσοδο του.

Ο διαμορφωτής QAM παρέχει δυνατότητες επιλογής παραμέτρων σε σχέση με το είδος της QAM που επιθυμούμε αλλάζοντας την τιμή M . Στο σενάριο που υλοποιήσαμε επιλέξαμε τιμή M=16 . Στο πεδίο OUTLVL ορίζεται το μέσο επίπεδο σήματος εξόδου το οποίο καθορίζεται από τον τύπο του OLVLTYP του επόμενου πεδίου. Η επιλογή του OLVLTYP μπορεί να είναι :

- Symbol Energy: Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση κανονικοποιημένη ενέργεια συμβόλου σε dB.
- Bit Energy: Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση κανονικοποιημένη ενέργεια ενός bit dB.
- Average Power (dBW): Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση ισχύς σε dBW.
- Average Power (dBm): Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση ισχύς σε dBm.

Επιλέξαμε για την περίπτωση μας τιμή για OLVLTYP : Bit Energy οπότε το OUTLVL θα αναπαριστά τον λόγο Eb_No . Ακολούθως υπάρχει η επιλογή του ρυθμού εξόδου του διαμορφωμένου σήματος σε μονάδα σύμβολα / sec (SYMRATE). Αν το πεδίο παραμείνει άδειο από το χρήστη τότε ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται με τον ρυθμό της πηγής. Αυτή ήταν και η επιλογή στην παρούσα προσομοίωση.

Επόμενη δυνατότητα που δίνεται είναι στο πεδίο CTRFRQ στο οποίο επιλέγουμε την κεντρική συχνότητα του σήματος μιγαδικής περιβάλλουσας. Στο πεδίο αυτό επιλέξαμε ως κεντρική συχνότητα την μηδενική.

Ακολουθεί η απόφαση για το είδος του παλμού του γραμμικού φίλτρου. Στο πεδίο PLSTYP ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ των :

- Root Raised Cosine (φίλτρο τετραγωνικής ρίζας υψωμένου συνημίτονου) Το φίλτρο έχει απόκριση συχνότητας που είναι η τετραγωνική ρίζα της απόκρισης συχνότητας ανυψωμένου συνημιτόνου
- Raised Cosine (υψωμένου συνημίτονου): Το φίλτρο έχει απόκριση συχνότητας ανυψωμένου συνημιτόνου.
- GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying:

$$b(t) = \frac{1}{2T} \left(Q \left(2\pi B t - \frac{T}{2} \right) - Q \left(2\pi B t + \frac{T}{2} \right) \right) \quad 0 \leq B T \leq 1$$

$$Q(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau$$

- Half Sine (ημίσειωσ ημιτόνου): Φίλτρο απόκρισης θετικής ημιπεριόδου ημιτονοειδούς σήματος.
- Gaussian (Std. Dev.): Φίλτρο απόκρισης Γκαουσιανής αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας:

$$b(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha}} \exp\left(-\frac{f^2}{2\alpha^2}\right)$$

- Rectangular (Ορθογωνίου παλμού): Φίλτρο απόκρισης ορθογωνίου παλμού.
- Gaussian (BT): Φίλτρο μοναδιαίας απόκρισης Γκαουσιαν'ης αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας με συχνότητα αποκοπής στα 3dB.

$$b(f) = BT \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi^2 BT^2 f^2}{\ln 2}\right)$$

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε φίλτρο ορθογωνίου παλμού Rectangular.

Επόμενο πεδίο για τον διαμορφωτή είναι ο συντελεστής roll-off $0 < r < 1$ που καθορίζει το πόσο απότομη είναι η μεταβατική ζώνη. (ALPHA) . Για $r=0$ έχουμε θεωρητικά βέλτιστο BW αλλά πολύ δύσκολη υλοποίηση , ενώ στην πράξη χρησιμοποιείται ευρύτατα η τιμή $r=0.35$ την οποία και διατηρήσαμε.

Τέλος στο πεδίο (PLZEN) καθορίζεται το συνολικό μήκος του διαμορφωμένου παλμού σε συσχέτιση με κάθε ξεχωριστό σύμβολο. Αν το πεδίο παραμένει κενό από το χρήστη , το προκαθορισμένο μήκος του παλμού τίθεται αυτομάτως στα 30 σύμβολα. Εξαίρεση αυτού του κανόνα αποτελούν η περίπτωση του GMSK παλμού οπότε το default μήκος του παλμού τίθεται στα 5 σύμβολα και η περίπτωση του ορθογωνίου παλμού όπου το μήκος τίθεται στο 1 σύμβολο. Αυτή η τιμή αποτελεί και την επιλογή μας για την προσομοίωση.

Μετρητής σημείου (Test Point)

Το λογισμικό προσομοίωσης μας επιτρέπει σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος να τοποθετήσουμε μετρητές (test points, TP) , τα οποία μετρούν χαρακτηριστικά των σημάτων όπως , την ισχύ , το φάσμα , την συχνότητα , την αντίσταση της γραμμής κ.οκ.

Στοιχείο προσθήκης Αθροιστικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου (AWGN)

Με το στοιχείο AWGN προσθέτουμε στο σήμα Λευκό Προσθετικό Θόρυβο. Το μοντέλο αυτό προσθέτει πραγματικό ή μιγαδικό θόρυβο στο σήμα εισόδου. Ο θόρυβος έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(\frac{-\eta^2}{N_0}\right)$$

Όταν επιθυμούμε να μετρήσουμε το BER ή το SER(Symbol Error Rate) , το μπλόκ AWGN θα πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε το σήμα εξόδου να αναπαριστά τον σηματοθορυβικό λόγο που πρόκειται να μετρηθεί. Επί παραδείγματι όταν θέλουμε να μετρήσουμε σηματοθορυβικό λόγο , τοποθετούμε το μπλόκ AWGN ακριβώς πριν την είσοδο του δέκτη. Τα πεδία παραμέτρων που διατίθενται είναι το PWR το οποίο μας δείχνει το μέσο επίπεδο προσθετικού λευκού θορύβου με default τιμή 0. Η επιλογή του πεδίου PWR_TYP συνδέεται με την επιλογή OL_VLTYP του διαμορφωτή που στην περίπτωση του Eb_No , τίθεται αυτόματα σε θέση auto.

Δέκτης –φωρατής (RCVR)

Ο RCVR είναι ένας γενικής χρήσης δέκτης που υποστηρίζει διάφορους αλγόριθμους αναδιαμόρφωσης και εντοπισμού ψηφιακών σημάτων. Ενεργεί σε θορυβώδη δειγματοληπτημένα δεδομένα και παράγει εκτιμήσεις του αυθεντικού bit stream του πομπού. Το μπλόκ είναι σχεδιασμένο να εντοπίζει αυτόματα τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί ο πομπός και υποστηρίζει τα παρακάτω σχήματα διαμόρφωσης : BPSK, MPSK, MSK, OQPSK, PAM, Pi/4 QPSK, QAM and QPSK.

Μετρητής BER (BER meter)

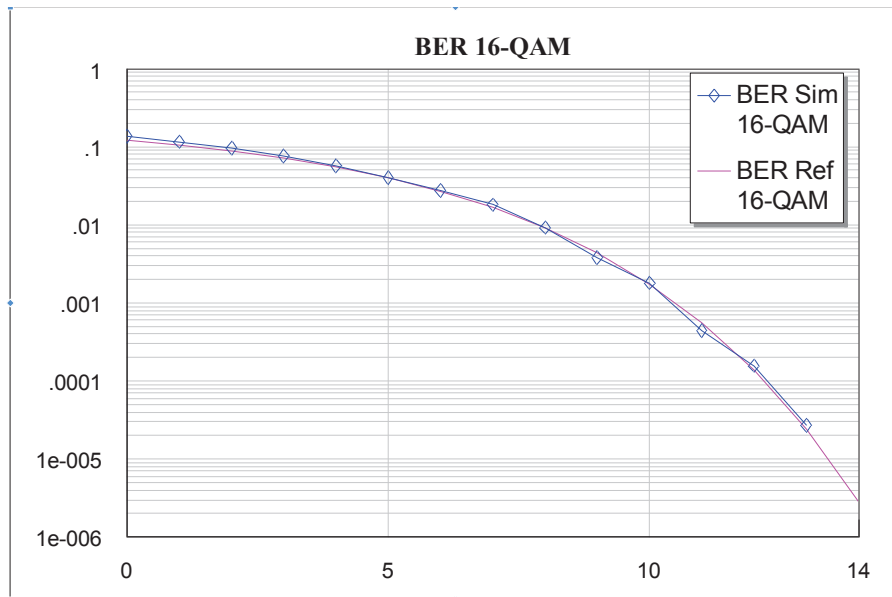
Ο μετρητής BER υπολογίζει το the bit error rate (BER) ενός ψηφιακού σήματος . Το μπλοκ αυτό χρησιμοποιείται για την δημιουργία της γραφικής απεικόνισης του BER καθώς και για την παρουσίαση του σε μορφή παραθύρου τιμών. Ο μετρητής BER εντοπίζει αυτόματα την διαμόρφωση του σήματος αναφοράς αν πρόκειται για πηγές QAM_SRC, QAM_TX ή QPSK_TX. Για οποιαδήποτε άλλη πηγή ο μετρητής επιχειρεί την αναγνώριση της διαμόρφωσης . Τα πεδία VARNAME , VALUES και OUTFL παραμένουν κενά διότι η αναγνώριση γίνεται αυτομάτως.

4.1.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (QAM)

Με την χρήση της περιγραφείσας τοπολογίας δημιουργήσαμε τη ζητούμενη προσομοίωση της διαμορφωσης M-QAM , παρουσία λευκού προσθετικού θορυβου AWGN.

4.1.2 Προσομοίωση 16- QAM

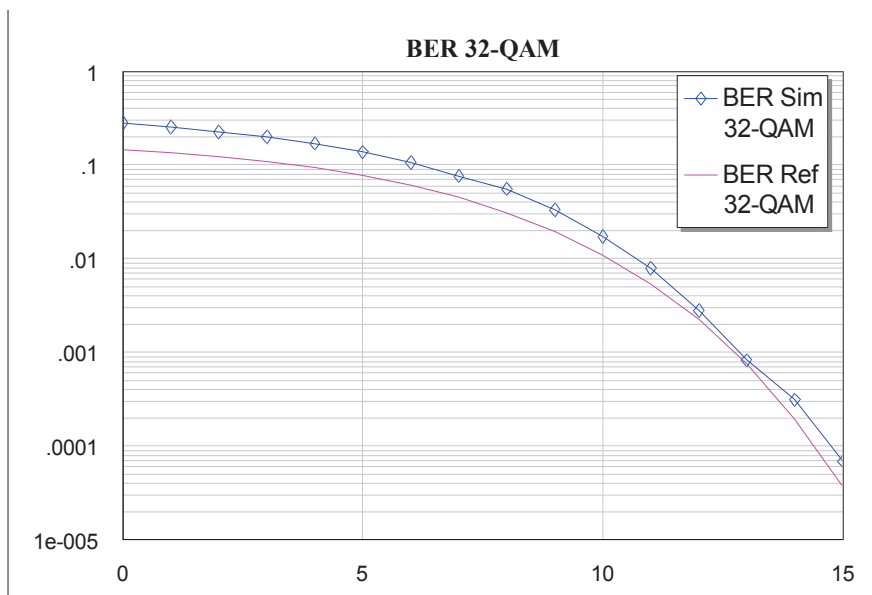
Στον Διαμορφωτή QAM επιλέξαμε $M=16$ και στο μπλοκ προσθετικού θορυβου AWGN στο πεδίο $PWR=0$. Το διαγραμμα που προέκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχημα 4.2. Σημειώνουμε ότι στο διαγραμμα εμφανίζονται δυο καμπυλες . Η καμπυλη χρωματος μπλε (BER Sim) αναπαριστά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης , δηλαδή τη μετρηση του BER παρουσία θορυβου. Η καμπύλη χρωματος κόκκινου (BER Ref) αναπαριστά τη θεωρητικά αναμενομενη τιμη και χρησιμοποιείται ως καμπυλη αναφοράς.



Σχήμα 4.2 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 16-QAM

4.1.3 Προσομοίωση 32- QAM

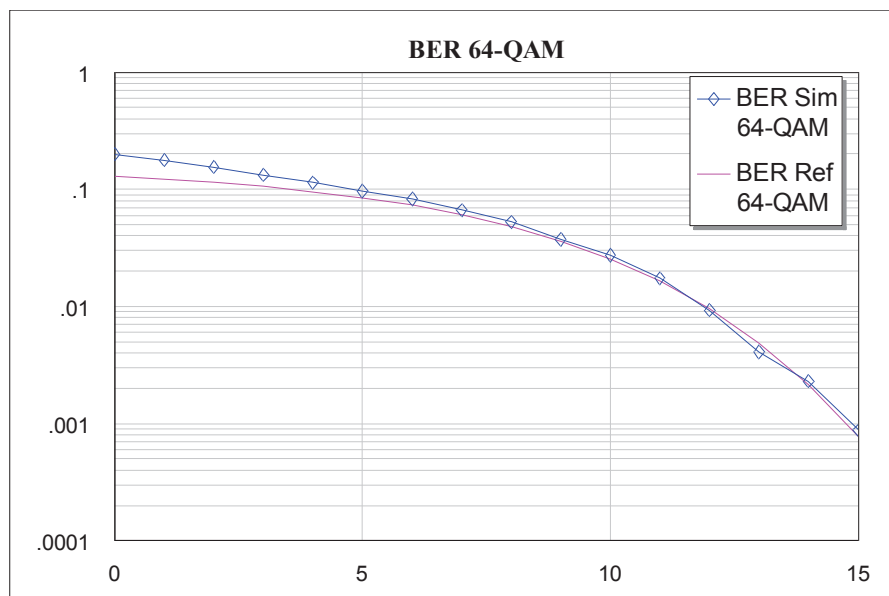
Στον Διαμορφωτή QAM επιλέξαμε $M=32$ και στο μπλοκ προσθετικού θορύβου AWGN στο πεδίο $PWR=0$. Το διάγραμμα που πρόεκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 32-QAM

4.1.4 Προσομοίωση 64- QAM

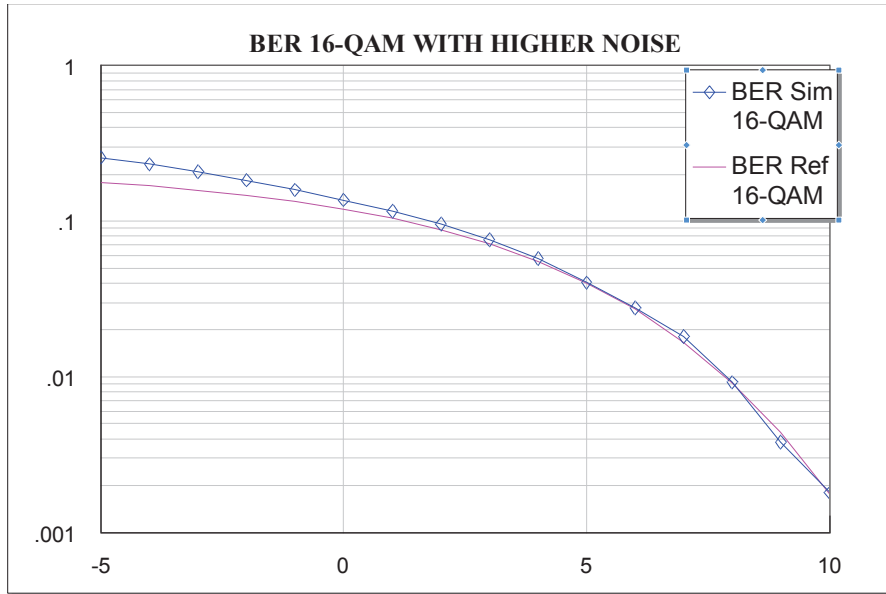
Στον Διαμορφωτή QAM επιλέξαμε $M=64$ και στο μπλοκ προσθετικού θορύβου AWGN στο πεδίο PWR=0. Το διάγραμμα που πρόεκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4



Σχήμα 4.4 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 64-QAM

4.1.5 Προσομοίωση 16- QAM με αυξημένο Θορυβο

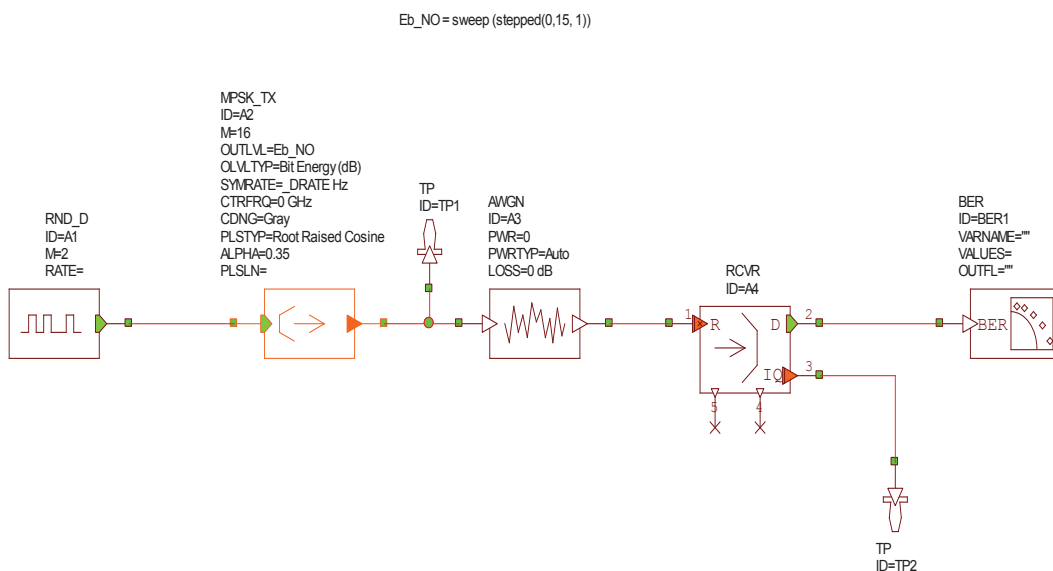
Με σκοπό την εξέταση της επίδραση που θα έχει μια αύξηση του επιπέδου θορύβου, στο ρυθμο εσφαλμενων bit που λαμβανει ο δεκτης , επαναλαβαμε την μετρηση του BER της διαμορφωσης 16-QAM. Για να το επιτύχουμε αυτό αλλαξαμε την τιμη στο πεδιο PWR του μπλοκ του λευκου θορυβου , από 0 dB σε 5 dB. Το αποτελεσμα αυτης της μεταβολης φαινεται στο σχημα 4.5.



Σημα 4.5 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 16-QAM με αυξημένο επίπεδο θορυβού.

4.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MPSK ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Δημιουργούμε στον προσομοιωτή την τοπολογία της προσομοίωσης για την διαμορφωση MPSK η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχημα :



Σημα 4.6 Τοπολογία Προσομοίωσης MPSK

Τα μπλοκ που απαιτούνται για την προσομοίωση είναι ίδια με αυτά που χρησιμοποιήσαμε και στη διαμορφωση QAM με μονη εξαίρεση την αντικατάσταση του QAM_TX με τον διαμορφωτή MPSK_TX . Ο διαμορφωτής παράγει το σήμα βασικής ζώνης μιγαδικής περιβάλλουσας (baseband , complex-envelope) βάση του τυχαίου σήματος στην είσοδο του.

Ο διαμορφωτής MPSK παρέχει δυνατότητες επιλογής παραμέτρων σε σχέση με το είδος της διαμορφωσης που επιθυμούμε αλλάζοντας την τιμή M . Στο σενάριο που υλοποιήσαμε επιλέξαμε τιμή M=16 . Στο πεδίο OUTLVL ορίζεται το μέσο επίπεδο σήματος εξόδου το οποίο καθορίζεται από τον τύπο του OLVLTYP του επόμενου πεδίου. Η επιλογή του OLVLTYP μπορεί να είναι :

- Symbol Energy: Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση κανονικοποιημένη ενέργεια συμβόλου σε dB.
- Bit Energy: Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση κανονικοποιημένη ενέργεια ενός bit dB.
- Average Power (dBW): Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση ισχύς σε dBW.
- Average Power (dBm): Οπότε το OUTLVL ερμηνεύεται ως μέση ισχύς σε dBm.

Επιλέξαμε για την περίπτωση μας τιμή για OLVLTYP : Bit Energy οπότε το OUTLVL θα αναπαριστά τον λόγο Eb_No . Ακολούθως υπάρχει η επιλογή του ρυθμού εξόδου του διαμορφωμένου σήματος σε μονάδα σύμβολα / sec (SYMRATE). Αν το πεδίο παραμείνει άδειο από το χρήστη τότε ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμόζεται με τον ρυθμό της πηγής. Αυτή ήταν και η επιλογή στην παρούσα προσομοίωση.

Επόμενη δυνατότητα που δίνεται είναι στο πεδίο CTRFRQ στο οποίο επιλέγουμε την κεντρική συχνότητα του σήματος μιγαδικής περιβάλλουσας. Στο πεδίο αυτό επιλέξαμε ως κεντρική συχνότητα την μηδενική.

Ακλουθεί η απόφαση για το είδος του παλμού του γραμμικού φίλτρου. Στο πεδίο PLSTYP ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ των :

- Root Raised Cosine (φίλτρο τετραγωνικής ρίζας υψωμένου συνημίτονου) Το φίλτρο έχει απόκριση συχνότητας που είναι η τετραγωνική ρίζα της απόκρισης συχνότητας ανυψωμένου συνημιτόνου
- Raised Cosine (υψωμένου συνημίτονου): Το φίλτρο έχει απόκριση συχνότητας ανυψωμένου συνημιτόνου.
- GMSK: Gaussian Minimum Shift Keying:

$$b(t) = \frac{1}{2T} \left(\mathcal{Q} \left(\frac{2\pi B t - T/2}{\sqrt{\ln 2}} \right) - \mathcal{Q} \left(\frac{2\pi B t + T/2}{\sqrt{\ln 2}} \right) \right) \quad 0 \leq B T \leq 1$$

$$Q(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau$$

- Half Sine (ημίσεως ημιτόνου): Φίλτρο απόκρισης θετικής ημιπεριόδου ημιτονοειδούς σήματος.
- Gaussian (Std. Dev.): Φίλτρο απόκρισης Γκαουσιανής αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας:

$$b(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha}} \exp\left(-\frac{f^2}{2\alpha^2}\right)$$

- Rectangular (Ορθογωνίου παλμού): Φίλτρο απόκρισης ορθογωνίου παλμού.
- Gaussian (BT): Φίλτρο μοναδιαίας απόκρισης Γκαουσιανής αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας με συχνότητα αποκοπής στα 3dB.

$$b(f) = BT \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{\ln 2}} \cdot \exp\left(-\frac{2\pi^2 BT^2 f^2}{\ln 2}\right)$$

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε φίλτρο ορθογωνίου παλμού Rectangular.

Επόμενο πεδίο για τον διαμορφωτή είναι ο συντελεστής roll-off $0 < r < 1$ που καθορίζει το πόσο απότομη είναι η μεταβατική ζώνη. (ALPHA) . Για $r=0$ έχουμε θεωρητικά βέλτιστο BW αλλά πολύ δύσκολη υλοποίηση , ενώ στην πράξη χρησιμοποιείται ευρύτατα η τιμή $r=0.35$ την οποία και διατηρήσαμε.

Επόμενο πεδίο του διαμορφωτή MPSK_TX είναι το (CDNG) στο οποίο καθορίζεται ο τρόπος κωδικοποίησης των bits εισόδου , στα σημεία αστερισμού (constellation points). Οι επιλογές που προσφέρονται είναι :

- Κωδικοποίηση Gray : όπου τα σφάλματα συμβολων μεταξύ γειτονικών σημειων αντιστοιχουν σε ένα σφαλμα bit.
- Δυαδικη κωδικοποιηση : απλη δυαδικη κωδικοποιηση όπου οι δεικτες αυξανουν με αντιωρολογιακή φορα.

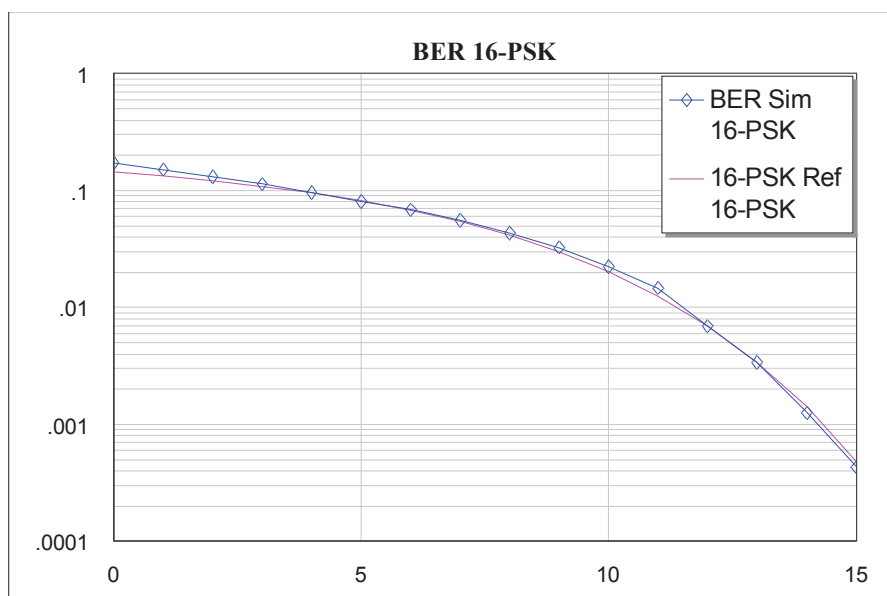
Τέλος στο πεδίο (PLZEN) καθορίζεται το συνολικό μήκος του διαμορφωμένου παλμού σε συσχέτιση με κάθε ξεχωριστό σύμβολο. Αν το πεδίο παραμείνει κενό από το χρήστη , το προκαθορισμένο μήκος του παλμού τίθεται αυτομάτως στα 30 σύμβολα. Εξάιρεση αυτού του κανόνα αποτελούν η περίπτωση του GMSK παλμού οπότε το default μήκος του παλμού τίθεται στα 5 σύμβολα και η περίπτωση του ορθογωνίου παλμού όπου το μήκος τίθεται στο 1 σύμβολο. Αυτή η τιμή αποτελεί και την επιλογή μας για την προσομοίωση.

4.2.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (MPSK)

Με την χρήση της περιγραφείσας τοπολογίας δημιουργήσαμε τη ζητούμενη προσομοίωση της διαμορφωσης M-PSK , παρουσία λευκού προσθετικού θορύβου AWGN.

4.2.1.1 Προσομοίωση 16- PSK

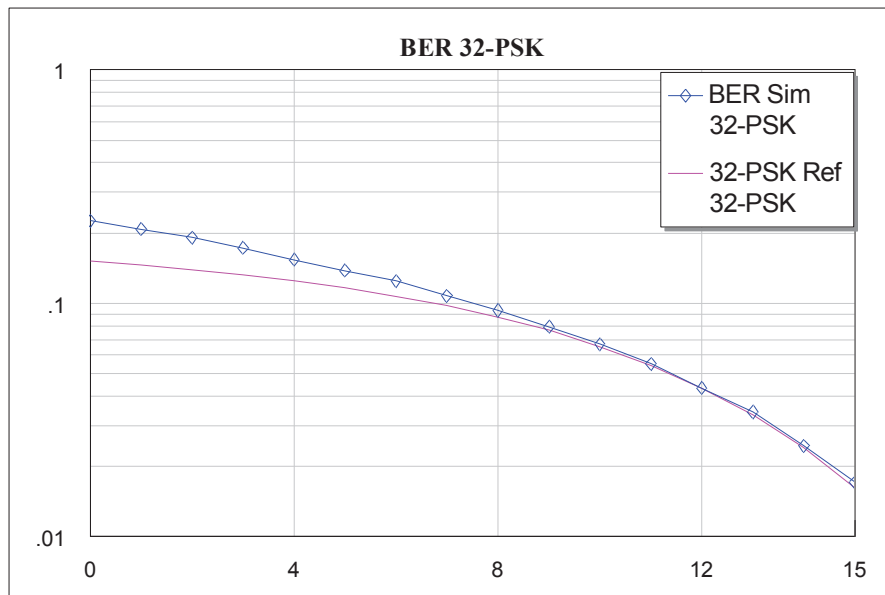
Στον Διαμορφωτή PSK επιλέξαμε $M=16$ και στο μπλοκ προσθετικού θορύβου AWGN στο πεδίο $PWR=0$. Το διάγραμμα που πρόεκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7. Στο διάγραμμα εμφανίζονται δυο καμπύλες . Η καμπύλη χρώματος μπλε (BER Sim) αναπαριστά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης , δηλαδή τη μέτρηση του BER παρουσία θορύβου. Η καμπύλη χρώματος κόκκινου (BER Ref) αναπαριστά τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή και χρησιμοποιείται ως καμπύλη αναφοράς



Σχήμα 4.7 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 16-PSK

4.2.1.2 Προσομοίωση 32- PSK

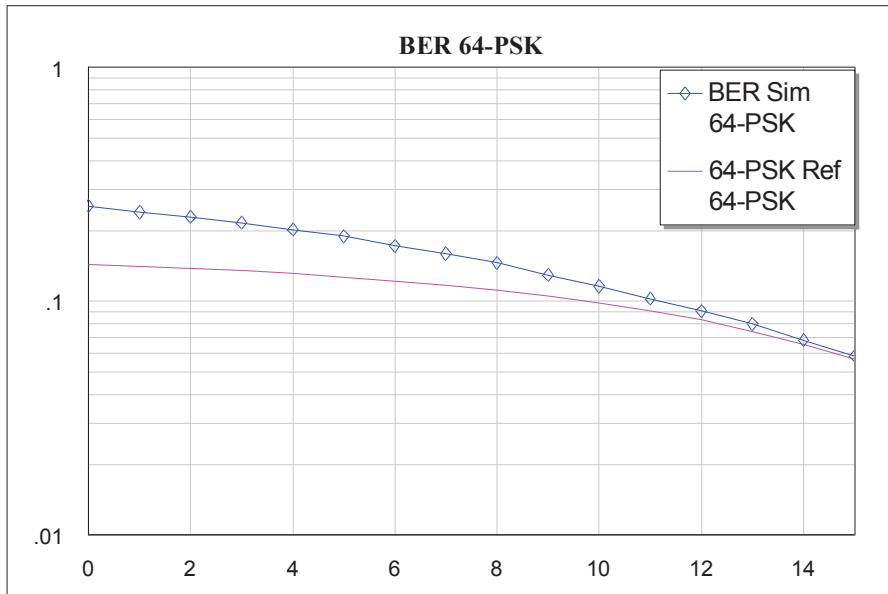
Στον Διαμορφωτή PSK επιλέξαμε $M=32$ και στο μπλοκ προσθετικού θορύβου AWGN στο πεδίο $PWR=0$. Το διάγραμμα που πρόεκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8



Σχήμα 4.8 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 32-PSK

4.2.1.3 Προσομοίωση 64- PSK

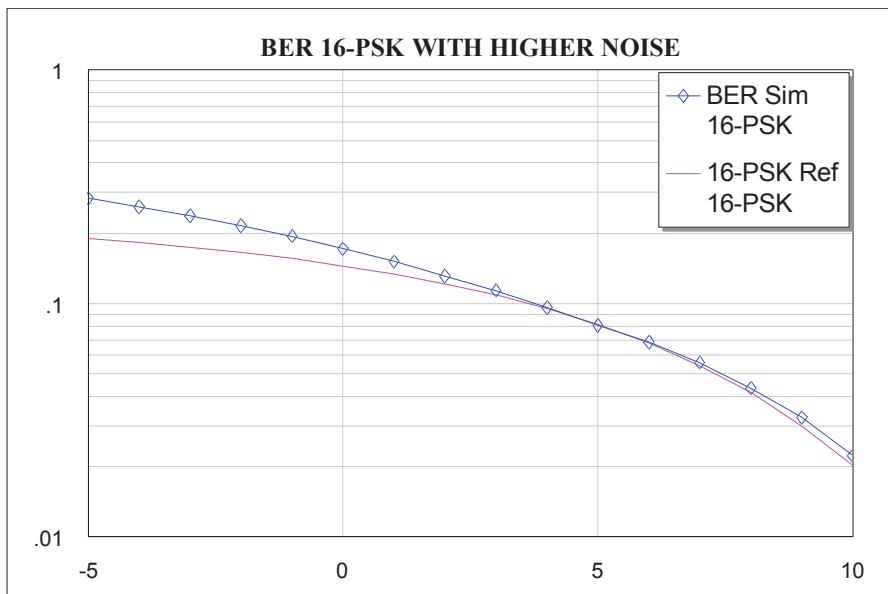
Στον Διαμορφωτή PSK επιλέξαμε $M=64$ και στο μπλοκ προσθετικού θορύβου AWGN στο πεδίο $PWR=0$. Το διάγραμμα που πρόεκυψε για τον ρυθμό των εσφαλμένων bits παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9



Σχημα 4.9 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 64-PSK

4.2.1.4 Προσομοίωση 16- PSK με αυξημένο Θορυβό

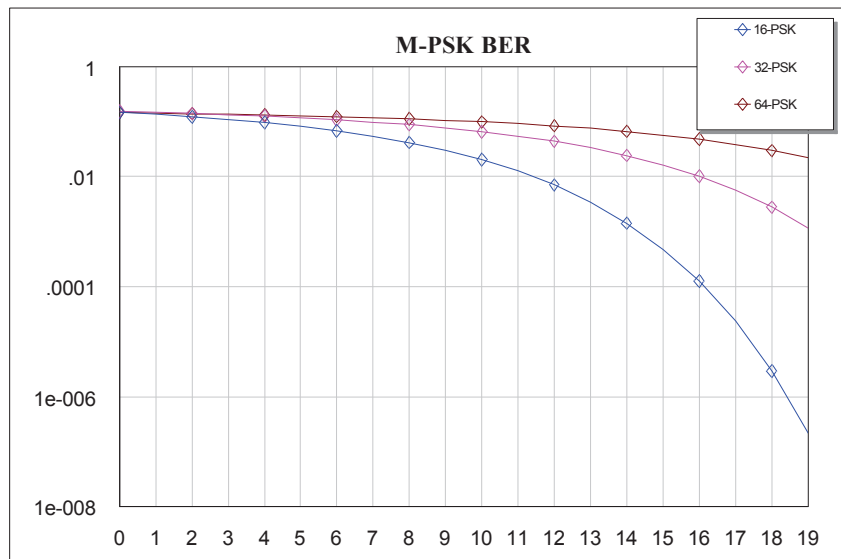
Με σκοπό την εξέταση της επίδραση που θα έχει μια αύξηση του επιπέδου θορύβου, στο ρυθμό εσφαλμένων bit που λαμβάνει ο δέκτης , επαναλαβαμε την μετρηση του BER της διαμορφωσης 16-PSK. Για να το επιτύχουμε αυτό αλλαξαμε την τιμη στο πεδιο PWR του μπλοκ του λευκου θορυβου , από 0 dB σε 5 dB. Το αποτελεσμα αυτης της μεταβολης φαινεται στο σχημα 4.10.



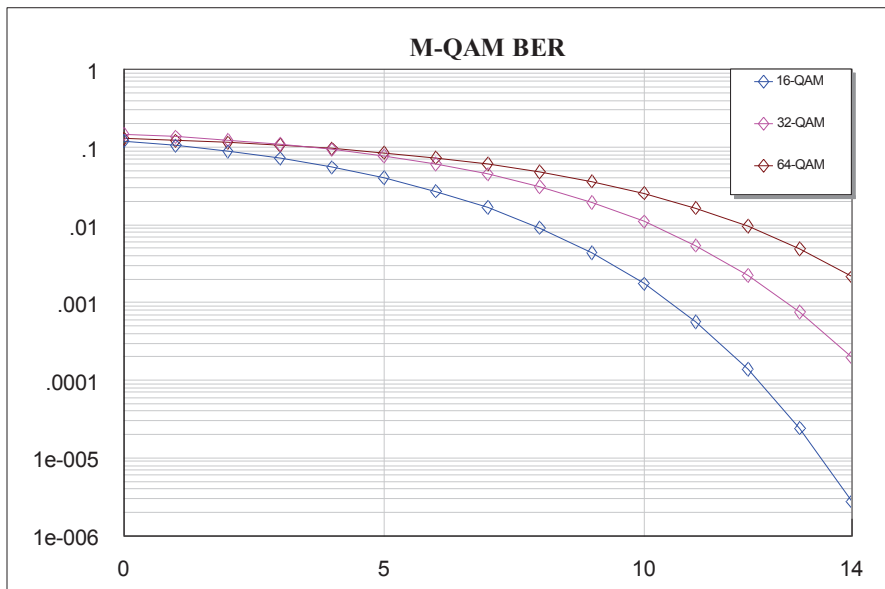
Σχημα 4.10 Αποτελεσματα Προσομοίωσης 16-PSK με αυξημένο επίπεδο θορυβου.

4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Παρουσιάζουμε στα σχήματα 4.11 και 4.12 τα διαγράμματα BER για τις διαμορφώσεις M-PSK και τις M-QAM που υλοποιήσαμε με την προσομοίωση για επίπεδο θορύβου PWR=0 dB.



Σχήμα 4.11 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα M-PSK



Σχήμα 4.12 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα M-QAM

4.4 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία ολοκληρώσαμε την μελέτη δυο από τις πιο σημαντικές τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης , των M-PSK και M-QAM. Χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης AWR για την δημιουργία των διαμορφώσεων και την παραγωγή των αποτελεσμάτων.

Επιχειρώντας μια σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής. Αρχικά παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα ανεξάρτητου του είδους της διαμόρφωσης το BER δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων , μειώνεται μονότονα καθώς αυξάνει ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Eb/No). Το αποτέλεσμα αυτό ήταν και το θεωρητικό αναμενόμενο καθώς το BER για όλα τα συστήματα μετρείται σε σχέση με την απόσταση δυο γειτονικών σημείων στο διάγραμμα αστερισμού (constellation diagram) . Έτσι καθώς μειώνεται η απόσταση μεταξύ δυο σύμβολων αυξάνεται η πιθανότητα σφάλματος. Εφόσον λοιπόν αυξάνεται το πλήθος των σημείων του αστερισμού (16 σε 32 και 64) , μειώνεται η απόσταση μεταξύ των σύμβολων και συνεπώς αυξάνεται το BER. (αναφορά στα σχήματα 4.11 και 4.12)

Ειδικότερα όσον αφορά την M-QAM διαμόρφωση παρατηρούμε καταρχάς στο Σχήμα 4.2 για την 16-QAM ότι η πειραματικές τιμές προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις θεωρητικά αναμενόμενες . Αυξάνοντας το πλήθος των σημείων της κωδικοποίησης σε 32 , έχουμε μια αύξηση του BER (συνεπώς μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος) Σχήμα 4.3. Επίσης παρατηρούμε μια μεγαλύτερη απόκλιση από την αναμενόμενη τιμή θεωρητικά. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούμε να κάνουμε μελετώντας και το Σχήμα 4.4 που αφορά την 64-QAM. Το BER αυξάνει ακόμα περισσότερο σε σχέση με τις προηγούμενες διαμορφώσεις.

Αυτή η παρατηρούμενη επιδείνωση της απόδοσης φυσικά μοιάζει να ευνοεί τις διαμορφώσεις με λιγότερα σημεία όμως δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι όσο αυξάνουμε τα σημεία στον αστερισμό της διαμόρφωσης τόσο αυξάνουμε και τα bit που κωδικοποιούνται ανά σύμβολο και συνεπώς τον ρυθμό μετάδοσης. Επί παραδείγματι με την 16-QAM μπορούμε να κωδικοποιήσουμε 4 bit ανά σύμβολο , με την 32-AM 5 bit ανά σύμβολο και με την 64-QAM , 6 Bit ανά σύμβολο.

Όμοιες παρατηρήσεις μπορούμε να κάνουμε και για τις διαμορφώσεις M-PSK. Καθώς αυξάνει το πλήθος των σύμβολων του αστερισμού , αυξάνεται το BER και στα τρία είδη (16-32-64 PSK). Σχήματα 4.7 , 4.8, 4.9 .

Για την εξέταση της επίδρασης της αύξησης του θορύβου στα δυο είδη διαμόρφωσης αυξήσαμε το μέσο επίπεδο λευκού θορύβου στις 16-QAM και 16-PSK.

Σχήματα 4.5 και 4.10. Η αύξηση του θορύβου επιδεινώνει την απόδοση του συστήματος και κυρίως στην διαμόρφωση 16-PSK όπου έχουμε και απόκλιση του αποτελέσματος της προσομοίωσης από την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή.

Τέλος στα Σχήματα 4.11 και 4.12 όπου παρουσιάζονται και οι δυο διαμορφώσεις για τα διαφορετικά πλήθη σύμβολων παρατηρούμε ότι η QAM παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από την PSK . Η διάφορα είναι αρκετά σημαντική κυρίως στις διαμορφώσεις με λιγότερα σύμβολα.

Συμπεράσματα

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, το βασικότερο κίνητρο για τη σχημάτων διαμόρφωσης ανώτερης τάξης στις οπτικές επικοινωνίες είναι η υψηλή φασματική απόδοση . Η χρήση συγκεκριμένων τύπων διαμόρφωσης , επηρεάζει παράλληλα τη γενικότερη απόδοση του συστήματος. Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα εκτός από τον αυξημένο ρυθμό μετάδοσης, αφορούν ακόμη την ανοχή στα φαινόμενα της χρωματικής διασποράς καθώς και της διασποράς τρόπων πόλωσης. Βασικότερα μειονεκτήματα τους, είναι η μεγαλύτερη ευαισθησία τους στο θόρυβο και τα μη γραμμικά φαινόμενα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. John G. Proakis, Masoud Salehi, “Συστήματα Επικοινωνιών”, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2002
2. Taub Herbert 1918-,Schilling Donald L. “Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα”, Εκδόσεις Τζιόλα 2006
3. Αθ. Λιάβας, Σημειώσεις Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα II, Χανιά, Απρίλιος 2005
4. Andy Bateman, Ψηφιακές Επικοινωνίες», εκδόσεις Τζιόλα, 2000
5. Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης, Διαφάνειες Σεμιναρίου IEEE, 2012
6. Αποτίμηση, Αξιολόγηση, Κατάταξη Ψηφιακών Διαμορφώσεων» μεταπτυχιακή διατριβή Ελ. Στριβά, Δημοκρίτειο Παν. Θράκης, 2007

7. Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα ΙΙ (Θεωρία), Τμήμα Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Δικτύων,
<https://openececlass.teimes.gr/modules/document/document.php?course=CIED103&openDir=/514df251mjtx>
8. Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες, σημειώσεις μαθήματος του τμήματος Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος, ΑΘΗΝΑ 2006 <http://www.scribd.com/doc/49652052/Eisagogi-stis-tilepikoinonies>
9. Παναγιώτης Γ. Κωττής “ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ”, Εκδόσεις Τζιόλα 2005
10. Εκπαιδευτικό υλικό του ΤΕΙ Σερρών http://anamorfosi.teiser.gr/ekp_yliko/e-notes/Data/comm2/main.htm#_Toc207524230
11. Μελέτη Σύμφωνων Διατάξεων Πομποδεκτών για τη Δημιουργία Σχημάτων Διαμόρφωσης Ανώτερης Τάξης, Διπλωματική εργασία , Σακελλαροπούλου Δήμητρα ΑΘΗΝΑ 2013.