



ΑΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ-
Παράρτημα Σπάρτης
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

***ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ***

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΟΥΛΟΥΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ Α.Μ:2005105
ΠΟΥΛΛΑ ΑΝΝΑ-ΜΑΡΙΑ ΑΜ:2005112**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΚΑΡΑΛΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΣΠΑΡΤΗ 2010

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	6
1.1. Διαμόρφωση Στενής Ζώνης.....	6
1.2. Απόδοση Τεχνικών Διαμόρφωσης	6
1.2.1. Φασματική Απόδοση και Απόδοση Ισχύος.....	7
1.3. Διαμόρφωση Ψηφιακού Σήματος.....	8
1.3.1 Πλεονεκτήματα Διαμόρφωσης Ψηφιακού Σήματος.....	9
1.4. Βασικές τεχνικές Διαμόρφωσης Ψηφιακού Σήματος.....	9
1.4.1. Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude-shift keying, ASK)	10
1.4.2. Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency-shift keying, FSK).....	15
1.4.3. Διαμόρφωση MSK (Minimum Shift Keying).....	18
1.4.4. Η διαμόρφωση GMSK (Gaussian MSK).....	21
1.4.5 Ψηφιακή Διαμόρφωση φάσης (Phase-shift keying, PSK)	24
1.4.6 Διαφορική Μεταλλαγή Μετατόπισης Φάσης (Differential Phase Shift Keying, DPSK).....	27
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	31
ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	31
2.1 Μ-ΑΔΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	31
2.2. Τεχνικές Ψηφιακής Διαμορφωσης Πολλαπλών επιπέδων	32
2.2.1 Διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων ASK (M-ary Amplitude Shift Keying, M-ASK).....	32
2.2.2 Διαμόρφωση συχνότητας πολλαπλών επιπέδων FSK (M-ary Frequency Shift Keying, M-FSK).....	37
2.2.3 Διαμόρφωση Φάσης πολλαπλών επιπέδων PSK (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK).....	43
2.2.3.1 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK).	47
2.2.4 Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM)	51
2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη σύγχρονη εποχή που ζούμε οι τηλεπικοινωνίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην επικοινωνία των ανθρώπων. Σε μια εποχή όπου η ροή της πληροφορίας είναι μια καθοριστική διαδικασία για την πρόοδο σε κάθε τομέα της κοινωνικής, πολιτιστικής, οικονομικής και επιστημονικής ζωής, η επικοινωνία των πληροφοριών, αποτελεί την πιο σημαντική διαδικασία, από την οποία εξαρτώνται όλες οι διαστάσεις της όποιας εξέλιξης.

Όταν αναφερόμαστε σε τηλεπικοινωνίες, εννοούμε τη κάθε μορφής ενσύρματη ή ασύρματη, ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτρική, ακουστική και οπτική επικοινωνία, που πραγματοποιείται ανεξαρτήτως του μήκους απόστασης. Στους σύγχρονους καιρούς, αυτή η διαδικασία σχεδόν πάντα περιλαμβάνει την αποστολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή ηλεκτρικών σημάτων από κατάλληλες ηλεκτρονικές συσκευές. Η επικοινωνία μπορεί να γίνει με δυο τρόπους, ασύρματα είτε ενσύρματα. Το ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN).

Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά. Αντίθετα με την ασύρματη επικοινωνία, η ενσύρματη περιλαμβάνει όλων των ειδών τις εναέριες, τις επίγειες ή τις υπόγειες συνδέσεις αυτού του είδους. Παραδείγματα τέτοιων δικτύων αποτελούν όλα τα χάλκινα καλωδιακά δίκτυα, όπως επίσης και τα οπτικά δίκτυα. Οι πρώτοι εφευρέτες των τηλεπικοινωνιών ήταν ο Ελίσα Γκρέι (Elisha Gray), ο Νικόλα Τέσλα, ο Γουλιέλμο Μαρκόνι και ο Τζον Μπερντ (John Logie Baird). Τα τηλεπικοινωνιακά τους συστήματα ήταν αναλογικά αλλά κατά τις τελευταίες δεκαετίες του εικοστού αιώνα επικράτησαν καθολικά τα ψηφιακά συστήματα, καταγόμενα από τα δίκτυα υπολογιστών.

Έτσι οι περισσότερες τηλεπικοινωνιακές συσκευές σήμερα ουσιαστικώς είναι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ακόμα και αν δεν έχουν την εμφάνιση ενός τυπικού μικροϋπολογιστή γενικής χρήσης. Επίσης στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούμε διαμορφώσεις.

Γενικά όταν μιλάμε για διαμόρφωση εννοούμε τη διαδικασία μεταβολής ενός περιοδικού σήματος με στόχο την κωδικοποίηση σε αυτό ενός σήματος χαμηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει κωδικοποιημένη πληροφορία. Υπάρχουν δυο κατηγορίες διαμορφώσεων αναλογική διαμόρφωση και ψηφιακή διαμόρφωση. Όσον αφορά την αναλογική διαμόρφωση τα χαρακτηριστικά της φέρουσας (πλάτος, συχνότητα, φάση) μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο σύμφωνα με την πληροφορία. Στην αναλογική διαμόρφωση έχουμε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι η διαμόρφωση πλάτους (AM), η διαμόρφωση συχνότητας (FM) και η διαμόρφωση γωνίας. Αντίθετα στη ψηφιακή διαμόρφωση, τα χαρακτηριστικά της φέρουσας (πλάτος, συχνότητα, φάση) μεταβάλλονται με διακριτό τρόπο σύμφωνα με την πληροφορία. Στην ψηφιακή διαμόρφωση έχουμε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι η μεταλλαγή μετατόπισης πλάτους (ASK), η μεταλλαγή μετατόπισης συχνότητας (FSK) και η μεταλλαγή μετατόπισης γωνίας (PSK). Τέλος πρέπει να αναφερθούμε ότι οι ψηφιακές διαμορφώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως σε κινητά συστήματα επικοινωνίας και σε ψηφιακές τεχνικές, καθώς η ψηφιακή διαμόρφωση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αναλογική διαμόρφωση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά σε αυτή την εργασία θα αναλύσουμε και θα περιγράψουμε με κάθε λεπτομέρεια τις τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων τις οποίες χρησιμοποιούμε ευρέως στα κινητά συστήματα επικοινωνίας όπως επίσης και σε ψηφιακές τεχνικές.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να κατανοήσουμε τις τεχνικές διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων και να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους ώστε στη συνέχεια να επιλέξουμε εκείνη τη διαμόρφωση η οποία έχει τα χαρακτηριστικά τα οποία ταιριάζουν στο κανάλι μετάδοσης και η οποία μπορεί να καλύψει καλύτερα τις αποδόσεις του συστήματος.

Αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται ο ορισμός της διαμόρφωσης στενής ζώνης καθώς επίσης γίνεται και ανάλυση των παραγόντων οι οποίοι καθορίζουν την απόδοση μιας τεχνικής διαμόρφωση. Ακόμα περιγράφεται η φασματική απόδοση αλλά και η απόδοση ισχύος των διάφορων τεχνικών διαμόρφωσης. Στη συνέχεια αναλύεται η διαμόρφωση ψηφιακού σήματος και δίνονται τα πλεονεκτήματα της.

Τέλος γίνεται μια εκτενής περιγραφή των βασικών ψηφιακών διαμορφώσεων ASK, FSK, BFSK, MSK, GMSK, PSK, DPSK. Συγκεκριμένα περιγράφεται η παραγωγή και η λήψη του σήματος της κάθε μια από τις παραπάνω ψηφιακές διαμορφώσεις. Επίσης δίνεται η σχέση που περιγράφει την φασματική πυκνότητα ισχύος για κάθε διαμόρφωση αλλά και τη σχέση που δίνει το ρυθμό εμφάνισης εσφαλμένων bit της κάθε διαμόρφωσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια ανάλυση της ψηφιακής διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων όπως επίσης γίνεται και μια λεπτομερής περιγραφή των ψηφιακών διαμορφώσεων M-ASK, M-FSK, M-PSK, QPSK, QAM. Συγκεκριμένα περιγράφεται ο τρόπος παραγωγής και λήψης του σήματος της κάθε μια από τις παραπάνω ψηφιακές διαμορφώσεις πολλαπλών επιπέδων. Επίσης δίνεται η σχέση που περιγράφει την φασματική πυκνότητα ισχύος για κάθε ψηφιακή διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων αλλά και τη σχέση που δίνει το ρυθμό εμφάνισης εσφαλμένων bit της κάθε διαμόρφωσης. Ακόμα υπάρχουν σχήματα πομπού και δέκτη καθώς επίσης και διαγράμματα BER τα οποία δείχνουν τη πιθανότητα σφάλματος της κάθε ψηφιακής διαμόρφωσης.

Στο τελευταίο μέρος γίνεται μια προσπάθεια να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα, στα όποια περιγράφουμε ποιες ψηφιακές διαμορφώσεις είναι αποδοτικές ως προς το φάσμα, που έχουν δηλαδή υψηλή φασματική απόδοση αλλά χαμηλή απόδοση ισχύος, αλλά και ποιες ψηφιακές διαμορφώσεις είναι αποδοτικές ως προς την απόδοση ισχύος, που έχουν δηλαδή υψηλή απόδοση ισχύος αλλά χαμηλή φασματική απόδοση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

1.1. Διαμόρφωση Στενής Ζώνης

Στις τηλεπικοινωνίες διαμόρφωση ονομάζεται η διαδικασία μεταβολής ενός περιοδικού σήματος, συνήθως υψίσυχνου, με στόχο την κωδικοποίηση σε αυτό ενός σήματος χαμηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει κωδικοποιημένη πληροφορία. Το υψίσυχνο σήμα τότε καλείται φέρον και συνήθως είναι σήμα μιας συχνότητας (π.χ. μία ημιτονοειδής κυματομορφή). Η διαμόρφωση απαιτείται για να μπορέσει να διέλθει ένα σήμα από κάποιο τηλεπικοινωνιακό κανάλι (ένα καλώδιο, στις ενσύρματες επικοινωνίες, ή ο ελεύθερος χώρος, στις ασύρματες επικοινωνίες) το εύρος ζώνης του οποίου δεν επικαλύπτεται με το εύρος ζώνης του σήματος. Στο άλλο άκρο της επικοινωνίας, στον παραλήπτη, λαμβάνει χώρα η ανάστροφη διαδικασία προκειμένου να ανακτηθεί το αρχικό σήμα, η αποδιαμόρφωση[2].

1.2. Απόδοση Τεχνικών Διαμόρφωσης

Αρκετοί είναι οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την απόδοση μιας τεχνικής διαμόρφωσης και από τους οποίους εξαρτάται η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για την κάθε εφαρμογή. Ένα επιθυμητό σχήμα διαμόρφωσης παρέχει χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων δυαδικού ψηφίου (Bit Error Rate, BER) ακόμα και όταν ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal-to-Noise Ratio, SNR) είναι χαμηλός, αποδίδει καλά σε συνθήκες εξασθένησης, πολυδιόδευσης και παρεμβολών, καταλαμβάνει το ελάχιστο δυνατό εύρος ζώνης και είναι εύκολο και οικονομικό στην υλοποίηση. Οι υπάρχουσες τεχνικές διαμόρφωσης δεν ικανοποιούν ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Κάποιες είναι καλύτερες για παράδειγμα ως προς το ρυθμό σφαλμάτων και άλλες είναι καλύτερες ως προς το εύρος ζώνης που απαιτούν. Ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις μιας εφαρμογής, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να επιλέξει την πιο κατάλληλη τεχνική, θυσιάζοντας κάποιον παράγοντα προς όφελος κάποιου άλλου [4].

1.2.1. Φασματική Απόδοση και Απόδοση Ισχύος

Η απόδοση των διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης εκτιμάται συχνά με βάση τη φασματική αποδοτικότητα και την αποδοτικότητα ισχύος. Ως φασματική αποδοτικότητα (spectral efficiency) ορίζεται ο ρυθμός μεταδιδόμενη πληροφορίας ανά Hz του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης. Μονάδα μέτρησής της είναι το bit/s/Hz. Η φασματική αποδοτικότητα μετράει την ικανότητα ενός σχήματος διαμόρφωσης να μεταδίδει ένα μεγάλο ρυθμό πληροφορίας στο ελάχιστο δυνατό εύρος ζώνης ή διαφορετικά να χρησιμοποιεί αποδοτικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η ικανότητα αυτή αποτελεί βασικό στόχο στις ασύρματες επικοινωνίες, όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περιορισμένο και επομένως πολύτιμο. Γενικά, η αύξηση του ρυθμού δεδομένων σημαίνει μείωση της χρονικής διάρκειας του παλμού ενός συμβόλου και επομένως αύξηση του εύρους ζώνης του σήματος. Υπάρχει δηλαδή μια αναπόφευκτη σχέση μεταξύ ρυθμού δεδομένων και χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης. Ωστόσο, κάποιες τεχνικές διαμόρφωσης χειρίζονται καλύτερα αυτή την ανταλλαγή.

Ο όρος αποδοτικότητα ισχύος (power efficiency) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα μιας τεχνικής διαμόρφωσης να διατηρεί την ακρίβεια της μεταδιδόμενη πληροφορίας σε χαμηλά επίπεδα ισχύος. Σε αντιστοιχία με τη φασματική αποδοτικότητα, θα μπορούσε να οριστεί ως ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας ανά Watt λαμβανόμενης ισχύος. Ωστόσο, η ποσότητα αυτή δεν είναι και τόσο χρήσιμη αφού η λαμβανόμενη ισχύς δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ του σήματος αλλά κι από την ισχύ του θορύβου. Για το λόγο αυτό, για τη μέτρηση της αποδοτικότητας ισχύος χρησιμοποιείται ο λόγος φέρουσας προς θόρυβο (CNR) ή ισοδύναμα ο λόγος ενέργειας συμβόλου προς πυκνότητα ισχύος θορύβου, E_s/N_0 (symbol energy to noise power spectral density ratio). Η σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών ως προς την ισχύ, γίνεται μετρώντας τον απαιτούμενο λόγο CNR ή E_s/N_0 , ώστε για δεδομένο ρυθμό πληροφορίας να επιτυγχάνονται οι ίδιοι ρυθμοί σφαλμάτων. Όταν αναφερόμαστε στο CNR εννοούμε το λόγο της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου στο δέκτη και δίδεται από την εξίσωση:

$$SNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (1.1)$$

όπου προφανώς S είναι η ισχύς του σήματος και N η ισχύς του θορύβου.

Ο βασικός ρόλος του SNR είναι η δυνατότητα που μας παρέχει να μετρήσουμε το μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δεδομένων του καναλιού, υπό συνθήκες παρουσίας θορύβου. Η μονάδα μέτρησης του SNR είναι το **decibel (db)**. Όταν όμως αναφερομαστε στο BER εννοούμε στο ρυθμό που αναγνωρίζονται λανθασμένα τα λαμβανόμενα ψηφία από το δέκτη.

$$BER = n_0 p(0|1) + n_1 p(1|0) \quad (1.2)$$

Όπου n_0 και n_1 είναι το ποσοστό των '0' και '1' που έχουν μεταδοθεί. Αντίστοιχα $p(0|1)$ και $p(1|0)$ είναι οι δεσμευμένες πιθανότητες. Δηλαδή να αναγνωρίσει ο δέκτης '0' (η '1') ενώ έχει μεταδοθεί '1' (η '0'). Αν σταλούν ίσοι αριθμοί '1' και '0' τότε έχουμε:

$$BER = \frac{1}{2} [p(0|1) + p(1|0)] \quad (1.3)$$

Στα σημερινά συστήματα απαιτείται **BER= 10^{-12}** .

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η φασματική αποδοτικότητα και η αποδοτικότητα ισχύος είναι συνήθως αλληλοσυγκρουόμενα μεγέθη. Η υιοθέτηση δηλαδή μιας μεθόδου που οδηγεί σε αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας, οδηγεί ταυτόχρονα σε μείωση της αποδοτικότητας ισχύος και αντίστροφα [4].

1.3. Διαμόρφωση Ψηφιακού Σήματος

Στη Διαμόρφωση ψηφιακού σήματος 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 [4].

1.3.1 Πλεονεκτήματα Διαμόρφωσης Ψηφιακού Σήματος

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

Α) **Ανθεκτικότητα** στο θόρυβο και τις υποβαθμίσεις που εισάγει το κανάλι.

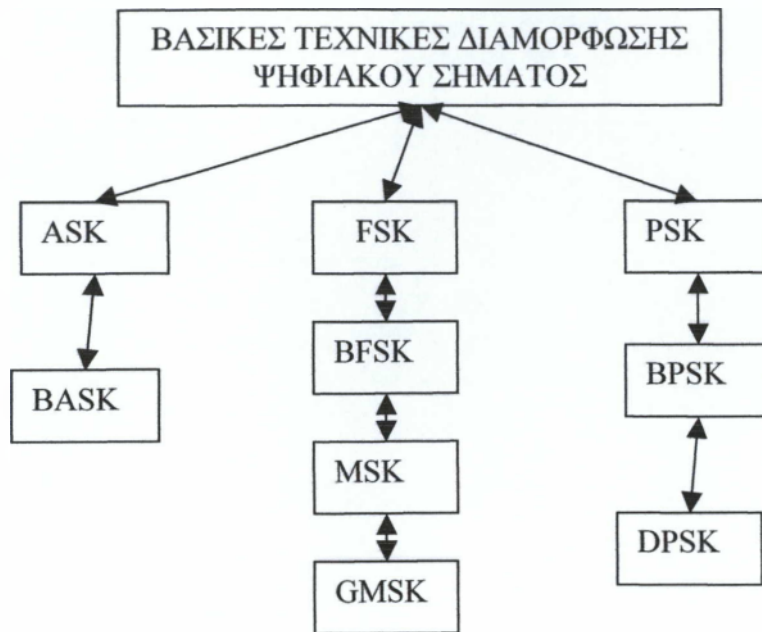
Β) **Ευελιξία** σε πολυπλεξία διαφόρων μορφών πληροφορίας (π.χ. φωνή, δεδομένα, βίντεο).

Γ) **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.

Δ) **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 [4].

1.4. Βασικές τεχνικές Διαμόρφωσης Ψηφιακού Σήματος

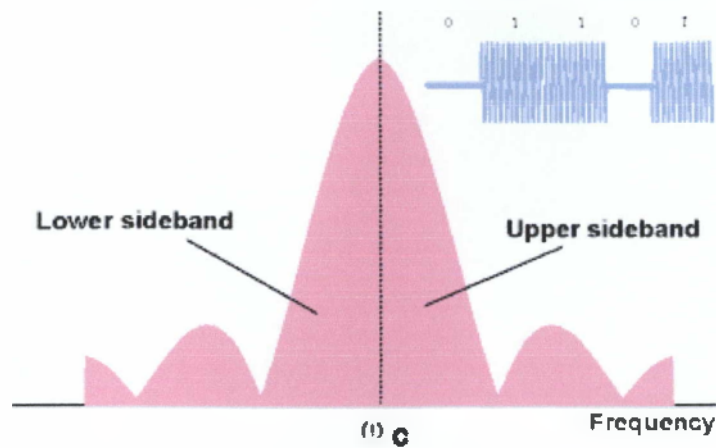
Όπως και στην Διαμόρφωση αναλογικού σήματος, έτσι και στην Διαμόρφωση ψηφιακού σήματος υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες τεχνικών διαμόρφωσης, πάνω στις οποίες στηρίζονται όλες οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί. Έτσι, ανάλογα με το αν μεταβάλλεται το πλάτος, η συχνότητα ή η αρχική φάση της φέρουσας, σύμφωνα με τα σύμβολα προς μετάδοση, διακρίνουμε τις ακόλουθες τεχνικές όπως παρουσιάζονται στο Σχ.1:



Σχήμα 1: Βασικές Τεχνικές Διαμόρφωσης Ψηφιακού Σήματος

1.4.1. Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude-shift keying, ASK)

Η πιο απλή μορφή διαμόρφωσης διέλευσης ζώνης μίας ακολουθίας δεδομένων είναι η Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους (Amplitude Shift Keying-ASK). Εδώ τα σύμβολα παριστάνονται ως διακριτές τιμές πλάτους ενός φέροντος συγκεκριμένης συχνότητας [1]. Στη διαμόρφωση ASK, το πλάτος του φέροντος σήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με τα σύμβολα της προς μετάδοση ακολουθίας συμβόλων. Στη δυαδική ASK απαιτούνται μόνο δύο καταστάσεις συμβόλων, οπότε το φέρον απλά ενεργοποιείται ή διακόπτεται και γι' αυτό η διαδικασία ονομάζεται επίσης Διαμόρφωση ON-OFF (On-Off Keying-OOK). Αρα πρόκειται για μια δυαδική διαμόρφωση ASK (Binary ASK-BASK) [3].



Σχήμα 2: Φάσμα διαμορφωμένου σήματος κατά ASK

Για τον περιορισμό του εύρους ζώνης που καταλαμβάνεται από το εκπεμπόμενο σήμα, πραγματοποιείται μορφοποίηση (φιλτράρισμα) των παλμών στην ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης. Ακολουθεί μια γραμμική διαδικασία διαμόρφωσης, ώστε να διατηρηθεί η πληροφορία για το πλάτος του σήματος δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός μίκτη, ο οποίος πολλαπλασιάζει το φέρον με την ακολουθία δεδομένων βασικής ζώνης (Σχ.3) [7].

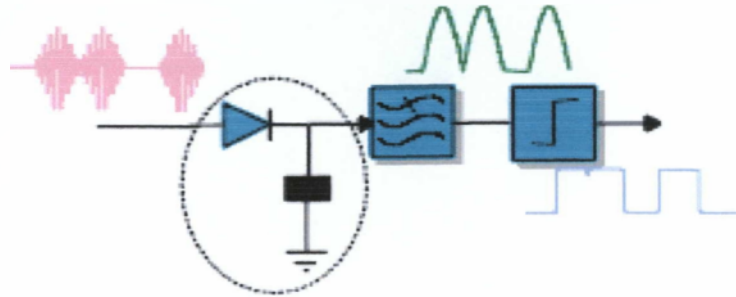


Σχήμα 3: Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή BASK

Η απλούστερη υλοποίηση ενός τέτοιου ανιχνευτή γίνεται με χρήση μιας διόδου που λειτουργεί ως ανορθωτής και ενός φίλτρου εξομάλυνσης, καταλήγοντας σε έναν ασύμφωνο ανιχνευτή (non-coherent detector) [7].

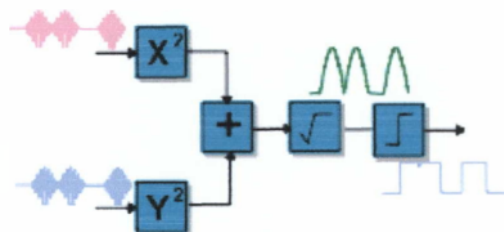
Ασύμφωνη ανίχνευση

Με τη μέθοδο διαμόρφωσης ASK, η πληροφορία που θέλουμε να μεταφερθεί αποθηκεύεται στο πλάτος ή αλλιώς την περιβάλλουσα (envelope) του διαμορφωμένου φέροντος. Έτσι, τα δεδομένα μπορούν να ανακτηθούν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή περιβάλλουσας (Σχ.4) [1].



Σχήμα 4: Ανιχνευτής διόδου για αποδιαμόρφωση ASK

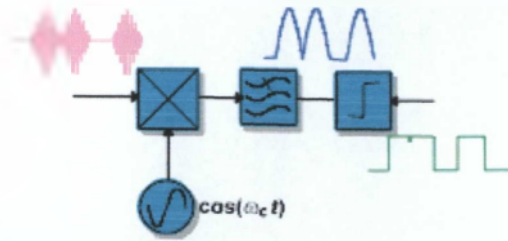
Εάν υπάρχει διαθέσιμη η ορθογωνική (quadrature) εκδοχή του διαμορφωμένου φέροντος στο δέκτη τότε ο ανιχνευτής που φαίνεται στο Σχ.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί [1].



Σχήμα 5: Ασύμφωνη ανίχνευση με την ορθογωνική μέθοδο

Σύμφωνη ανίχνευση

Εδώ ο ανιχνευτής (detector) λειτουργεί αναμιγνύοντας το εισερχόμενο στο δέκτη διαμορφωμένο σήμα δεδομένων με ένα φέρον αναφοράς που παράγεται τοπικά και επιλέγοντας τη συνιστώσα διαφοράς από την έξοδο του μίκτη. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχ.6 [1].



Σχήμα 6: Κύκλωμα Σύμφωνης ανίχνευσης

Η διαδικασία της σύγχρονης ανίχνευσης περιγράφεται μαθηματικά ως:

$$y(t) = a(t) \cdot \cos(\omega_c t + \theta) \cdot \cos(\omega_c \cdot t) = 0.5 \cdot a(t) \cdot [\cos(\theta) + \cos(2\omega_c t + \theta)] \quad (1.4)$$

Αν ο φορέας είναι σύμφωνος σε φάση (phase coherent) με το εισερχόμενο διαμορφωμένο σήμα, τότε η έξοδος είναι ανάλογη της κυματομορφής $a(t)$ και επιτυγχάνεται τέλεια ανίχνευση [1]. 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). Παρότι η σύμφωνη ανίχνευση φαίνεται πιο περίπλοκη από την ασύμφωνη, μπορεί να ανιχνεύει ακριβέστερα το σήμα σε περιβάλλον θορύβου [7].

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 τη σχέση

$$P(f) = K \frac{T_b}{2} \cdot \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)T_b}{\pi(f - f_c)T_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)T_b}{\pi(f + f_c)T_b} \right]^2 \right\} \quad (1.5)$$

όπου T_b είναι η διάρκεια των bit δεδομένων και f_c η συχνότητα του φέροντος [7].

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης BASK

Ο απλούστερος τρόπος παράστασης της απόδοσης 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, παρουσία θορύβου φασματικής πυκνότητας ισχύος N_0 , η οποία απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου ρυθμού σφαλμάτων.

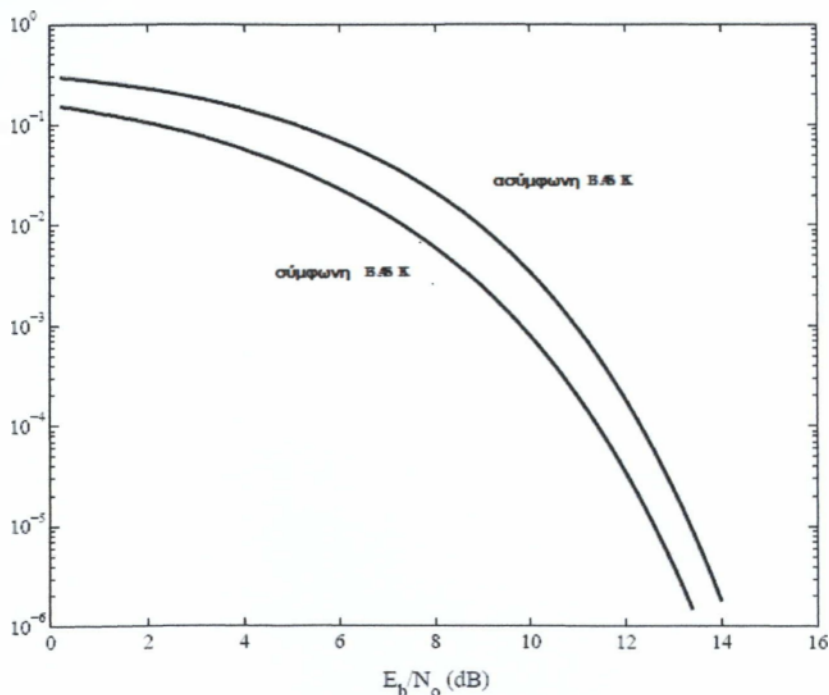
Η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης BASK σε ένα κανάλι που παρουσιάζει προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο δίνεται από τις σχέσεις [7]:

Για ασύμφωνη ανίχνευση:

$$P_B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) \quad (1.6)$$

Για σύμφωνη ανίχνευση:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \quad (1.7)$$



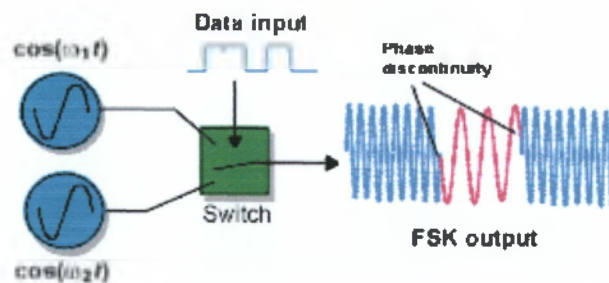
Σχημα 7: Διάγραμμα BER για σύμφωνη και ασύμφωνη BASK

1.4.2. Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency-shift keying, FSK)

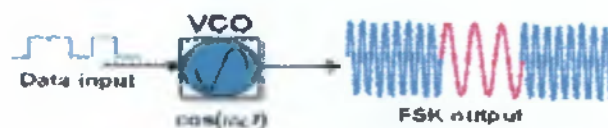
Στη μέθοδο αυτή μεταβάλλεται η συχνότητα του φέροντος σήματος σύμφωνα με τα σύμβολα της προς μετάδοση ακολουθίας συμβόλων.

Η Ψηφιακή Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Shift Keying – FSK) έχει χρησιμοποιηθεί τα τελευταία χρόνια κατά κόρο για την μετάδοση ψηφιακών σημάτων, επειδή είναι εύκολη στην δημιουργία αλλά και την ανίχνευση, ενώ παράλληλα είναι αναισθητή στις διακυμάνσεις πλάτους που επιφέρει το κανάλι [2].

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, καθώς μεταβαίνουμε από μία σε άλλη συμβολική κατάσταση. Η διαμόρφωση FSK μπορεί να δημιουργηθεί με μεταγωγή μεταξύ διαφορετικών πηγών συχνοτήτων χρησιμοποιώντας ένα διακόπτη, αλλά τότε είναι πιθανόν 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 την μετάδοση [1].



Σχήμα 8: Ασύμφωνη δημιουργία FSK

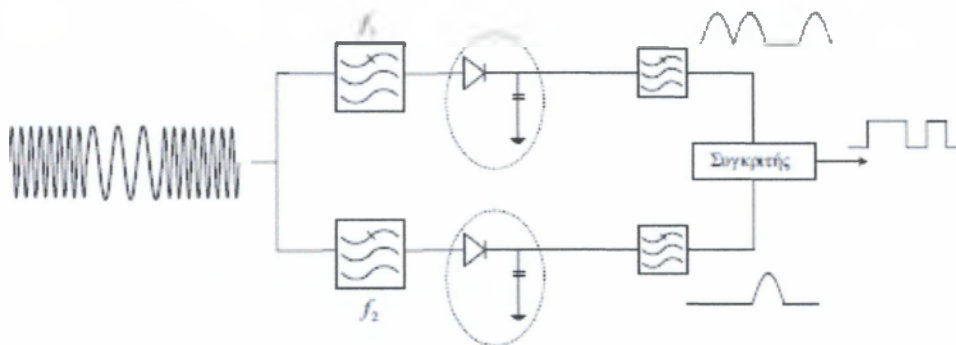


Σχήμα 9: Σύμφωνη δημιουργία FSK

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 την μεγαλύτερη μέση τιμή κατά την διάρκεια κάθε συμβόλου.

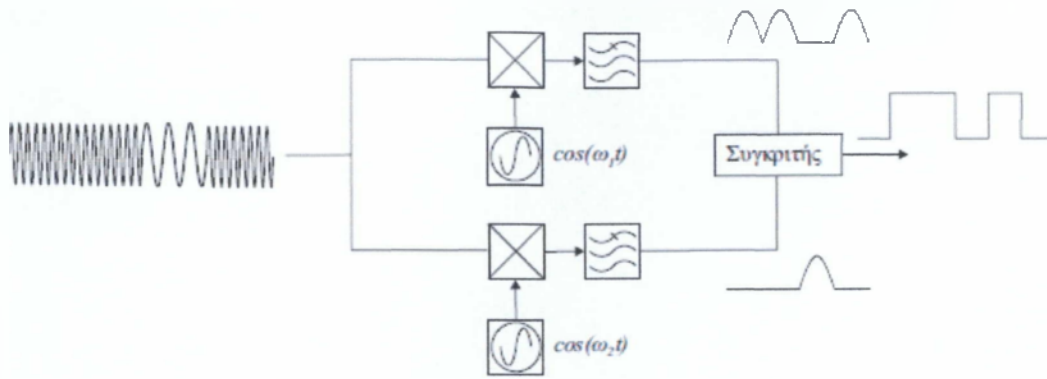
Αυτός ο τρόπος συνιστά στην ουσία ένα ασύμφωνο ανιχνευτή περιβάλλοντας που εφαρμόζεται σε δύο ακολουθίες ASK,. Η μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη τη φάση των αντίστοιχων συμβόλων και έτσι, κατ' αναλογία με τη ASK, δεν αποδίδει τόσο καλά όσο ένα σύστημα ανίχνευσης της διαμόρφωσης FSK [7].



Σχημα 10: Σχηματικό διάγραμμα ενός ασύμφωνου αποδιαμορφωτή FSK

Σύμφωνη ανίχνευση

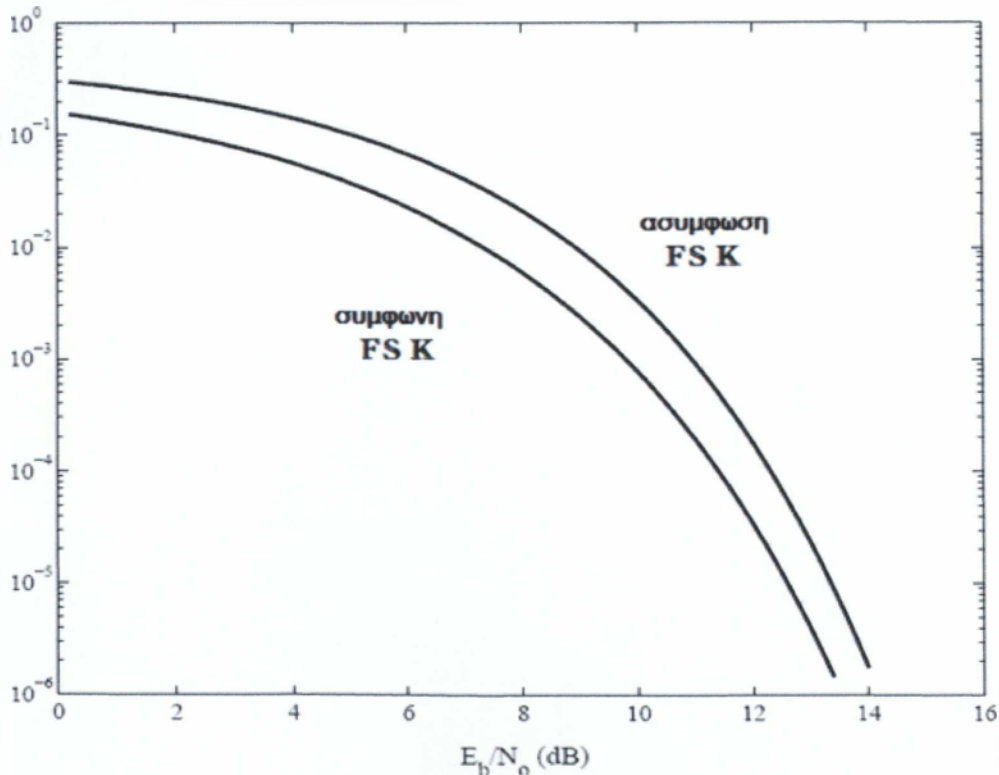
Η σύμφωνη ανίχνευση της διαμόρφωσης FSK έχει πολλές ομοιότητες με αυτήν της ASK, αλλά στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο ανιχνευτές συντονισμένοι στις δύο συχνότητες φορέα. Όπως και στην ASK, η σύμφωνη ανίχνευση και η χρήση προσαρμοσμένων φίλτρων ελαχιστοποιούν την επίδραση του θορύβου στο δέκτη. Η ανάκτηση των φερόντων αναφοράς στο σύμφωνο ανιχνευτή γίνεται εύκολα εάν η απόσταση συχνότητας των συμβόλων καταστεί ίση με το ρυθμό εκπομπής συμβόλων, καθώς τότε το διαμορφωμένο φάσμα θα περιέχει δύο διακριτές φασματικές γραμμές στις συχνότητες των φορέων (FSK κατά Sunde). Το μειονέκτημα που έχει η χρήση της FSK κατά Sunde είναι ότι το εύρος ζώνης του σήματος FSK που προκύπτει είναι περίπου 1.5 έως 2 φορές αυτό ενός δυαδικού σήματος ASK ή PSK που είναι φιλτραρισμένο με τον βέλτιστο τρόπο [7].



Σχημα 11: Σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου αποδιαμορφωτή FSK

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης FSK

Για ορθογωνική επιλογή των συχνοτήτων που αναπαριστούν τα σύμβολα αποδεικνύεται ότι ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit ισούται με τον αντίστοιχο της σύμφωνης ASK, δηλαδή $P_e^{COHFSK} = Q(\sqrt{E_b / N_0})$. Στην περίπτωση της ασύμφωνης FSK ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit δίδεται από τη σχέση $P_e^{NONCOHFSK} = 0.5 \exp(-E_b / 2N_0)$ [7].



Σχημα 12: Διαγραμμα BER για σύμφωνη και ασύμφωνη FSK

1.4.3. Διαμόρφωση MSK (Minimum Shift Keying)

Η διαμόρφωση ελάχιστης απόκλισης συχνότητας (Minimum-shift keying-MSK) είναι μια συνεχούς φάσης FSK με τον ελάχιστο λόγο απόκλισης συχνότητας ($h=0.5$) ο οποίος μπορεί να κάνει ορθογώνιες τις κυματομορφές $s_1(t)$ και $s_2(t)$. Το πλεονέκτημα της μεθόδου παραγωγής MSK σήματος είναι ότι το ομόδυνο των σημάτων και ο λόγος απόκλισης δεν επηρεάζονται από μεταβολές του ρυθμού δεδομένων εισόδου [4].

Ο λόγος απόκλισης συχνότητας ορίζεται ως

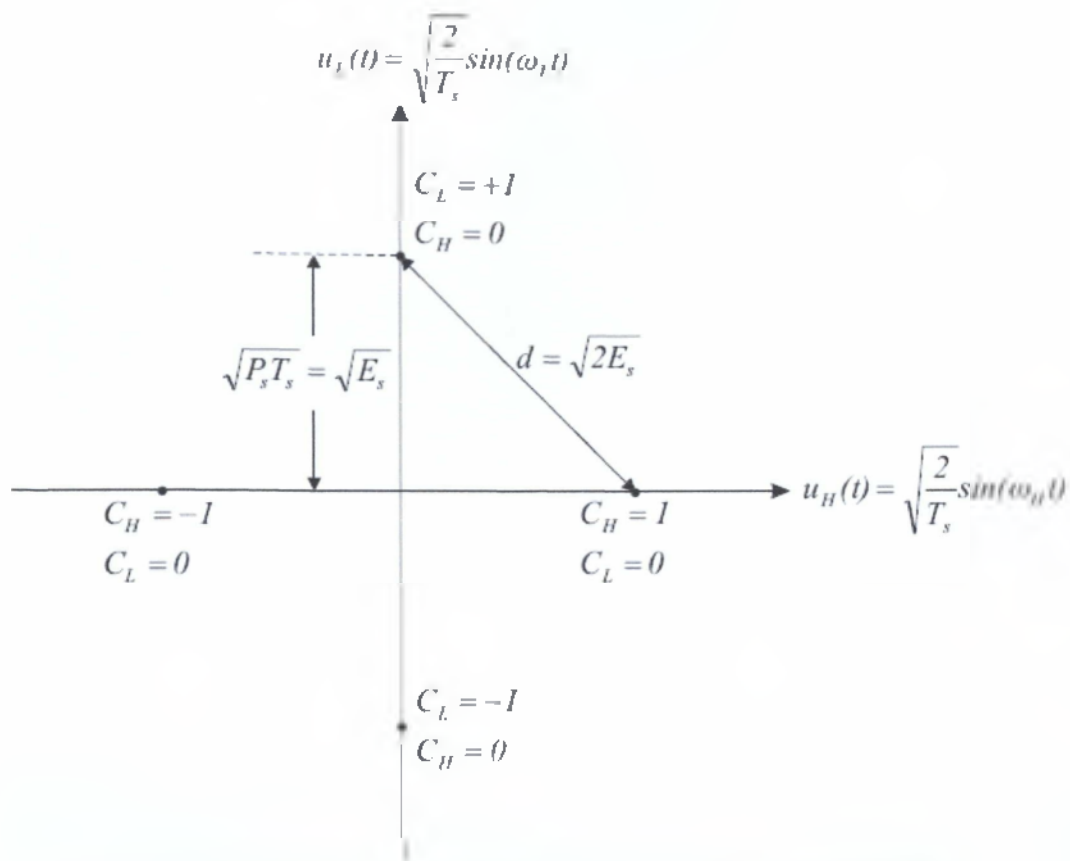
$$h = (f_1 - f_2)T_b \quad (1.11)$$

Στην διαμόρφωση MSK το σήμα που μεταδίδεται είναι:

$$U(t) = \sqrt{2P_s} \left[b_c(t) \sin 2\pi \left(\frac{t}{4T_b} \right) \right] \cos \omega_c t + \sqrt{2P_s} \left[b_o(t) \sin 2\pi \left(\frac{t}{4T_b} \right) \right] \sin \omega_c t \quad (1.12)$$

Στο Σχ.13 φαίνεται η παράσταση της MSK στο χώρο των σημάτων. Τα άκρα των τεσσάρων δυνατών διανυσμάτων των σημάτων σημειώνονται με τελείες. Η μικρότερη απόσταση μεταξύ των σημείων είναι:

$$d = \sqrt{2E_s} = \sqrt{4E_b}$$



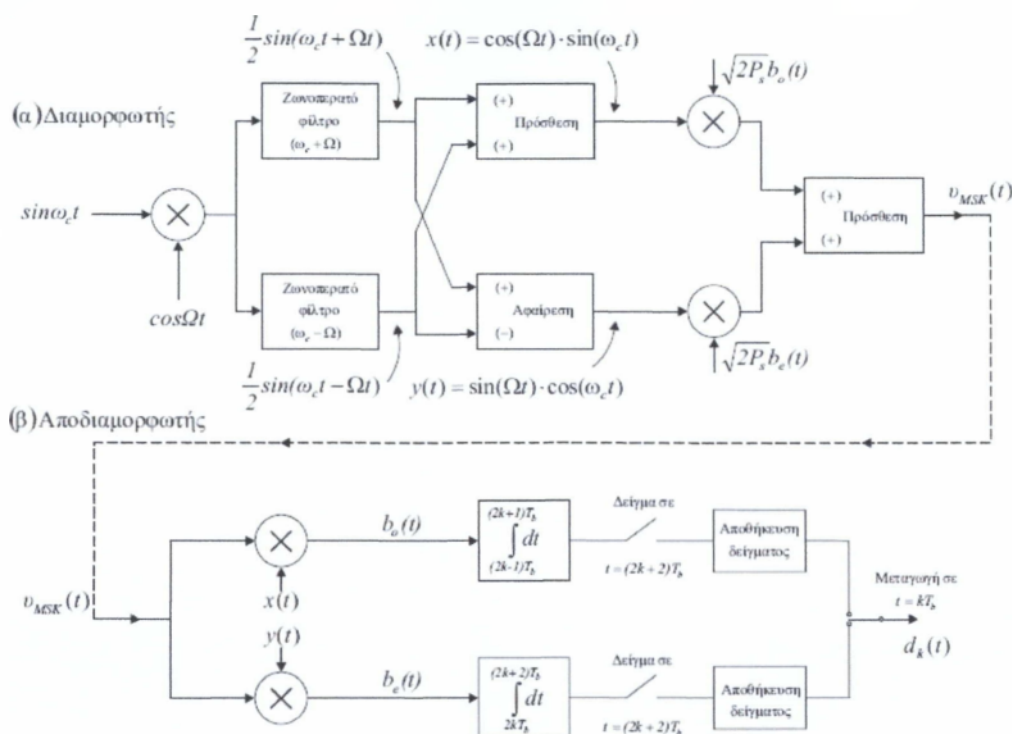
Σχήμα 13: Γεωμετρική παράσταση των σημάτων MSK

Πομπός και δέκτης

Ένας τρόπος για την παραγωγή του σήματος MSK είναι ο ακόλουθος: Ξεκινώντας από τα $\sin \Omega t$ και $\sin \omega_c t$, χρησιμοποιούνται μετατοπιστές φάσης των 90° για την παραγωγή των $\sin(\Omega t + \pi/2) = \cos \Omega t$ και $\sin(\omega_c t + \pi/2) = \cos(\omega_c t)$. Έπειτα χρησιμοποιούνται πολλαπλασιαστές για τον σχηματισμό των γινομένων $\sin \Omega t \cdot \cos \omega_c t$ και $\cos \Omega t \cdot \sin \omega_c t$. Πρόσθετοι πολλαπλασιαστές παράγουν τα γινόμενα $\sqrt{2P_s} \cdot b_c(t) \sin \Omega t \cdot \cos \omega_c t$ και $\sqrt{2P_s} \cdot b_o(t) \sin \Omega t \cdot \sin \omega_c t$. Τελικά χρησιμοποιείται ένας αθροιστής για να σχηματίσει το άθροισμα.

Στο Σχ.14 παρουσιάζεται ο δέκτης MSK. Η ανίχνευση πραγματοποιείται σύγχρονα, δηλαδή προσδιορίζοντας τη συσχέτιση του σήματος που λαμβάνεται με την κυματομορφή $x(t) = \cos \Omega t \cdot \sin \omega_c t$ για να καθοριστεί το bit $b_o(t)$ και με την $y(t) = \sin \Omega t \cdot \cos \omega_c t$ για να καθοριστεί το bit $b_c(t)$. Όπως συνηθίζεται, τέτοια συσχέτιση πραγματοποιείται με πολλαπλασιασμό και ολοκλήρωση στο διάστημα συμβόλου.

Οι ολοκληρωτές ολοκληρώνουν σε κλιμακωτά επικαλυπτόμενα διαστήματα διάρκειας συμβόλου $T_s = 2T_b$. Στο τέλος κάθε χρόνου ολοκλήρωσης, η έξοδος του ολοκληρωτή αποθηκεύεται και στη συνέχεια αποβάλλεται. Η αποβολή (εκφόρτιση) δεν δεικνύεται επακριβώς στο σχήμα. Ο διακόπτης της εξόδου μετάγεται πίσω και μπροστά με ρυθμό bit έτσι ώστε τελικά η κυματομορφή εξόδου να είναι η αρχική παλμοσειρά δεδομένων [7].



Σχήμα 14:διάγραμμα ενός διαμορφωτή – αποδιαμορφωτή MSK.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος MSK

Η φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος MSK δίνεται από την παρακάτω σχέση [7]:

$$P(f) = \frac{8}{\pi^2} E_b \cdot \left\{ \left[\frac{\cos 2\pi(f - f_c) \cdot T_b}{1 - [4(f - f_c) \cdot T_b]^2} \right]^2 + \left[\frac{\cos 2\pi(f + f_c) \cdot T_b}{1 - [4(f + f_c) \cdot T_b]^2} \right]^2 \right\} \quad (1.13)$$

Η MSK είναι στην ουσία μία FSK διαμόρφωση, κατά συνέπεια το εύρος ζώνης ενός διαμορφωμένου κατά MSK σήματος δίνεται από τον κανόνα του Carson [7]:

$$W = 2\Delta f + 2f_M = 2(\beta + 1)f_M \quad (1.14)$$

όπου $f_M = f_b / 2$ και $\beta = 0.5$. Συνεπώς, προκύπτει ότι

$$W = 2(0.5+1)\frac{f_b}{2} = 1.5f = 1.5R \quad (1.15)$$

Από τη σχέση (1.15) συνεπάγεται ότι η φασματική απόδοση της διαμόρφωσης MSK ισούται με [7]:

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R}{1.5R} = 1.67 \quad (1.16)$$

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης MSK

Ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων της MSK με σύγχρονη ανίχνευση δίνεται από τη σχέση [7]:

$$\text{SER:} \quad P_s = \text{erfc}\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \quad (1.17)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit δίνεται από τη σχέση

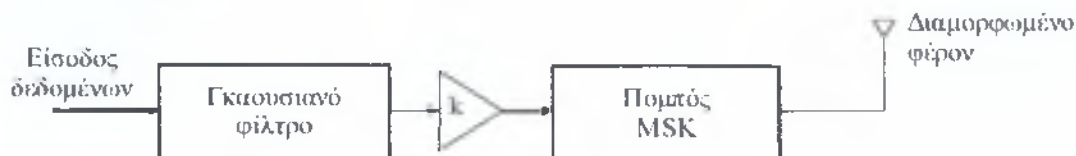
$$\text{BER:} \quad P_s = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \quad (1.18)$$

1.4.4. Η διαμόρφωση GMSK (Gaussian MSK)

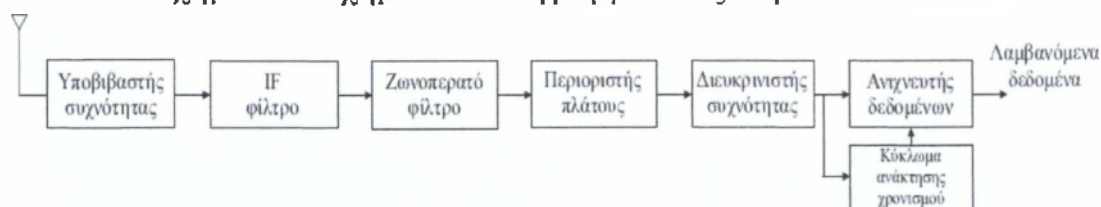
Οι ρυθμιστικές αρχές επιβάλλουν τον περιορισμό του εύρους ζώνης σε κινητές επικοινωνίες που χρησιμοποιούν σήματα διαμορφωμένα κατά FM. Οι αρχές αυτές επιβάλλουν επίσης τον περιορισμό της εκπεμπόμενης ισχύος σε γειτονικά κανάλια σε 60 – 80 dB κάτω από την ισχύ που εκπέμπεται στο επιθυμητό κανάλι. Για να ικανοποιηθούν αυτοί οι περιορισμοί, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί το εύρος ζώνης στην έξοδο του πομπού. Ο έλεγχος του εύρους ζώνης είναι ευκολότερο να γίνει στη βασική ζώνη. Η GMSK είναι μία διαμόρφωση σταθερής περιβάλλουσας που είναι συμβατή με αυτούς τους περιορισμούς [7].

Πομπός και Δέκτης

Η GMSK χρησιμοποιεί ένα φίλτρο μορφοποίησης παλμών με χαρακτηριστική Gaussian πριν από το διαμορφωτή, το οποίο έχει την ιδιότητα να αποκόπτει σημαντικά τη φασματική περιοχή έξω από τον κύριο λοβό. Ο πομπός και ο δέκτης της GMSK φαίνονται στα Σχ.15 και Σχ.16 αντίστοιχα [7].



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα ενός πομπού GMSK



Σχήμα 16: Σχηματικό διάγραμμα ενός δέκτη GMSK.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος GMSK

Το γκαουσιανό φίλτρο που χρησιμοποιείται στην GMSK μπορεί να οριστεί από το μέγεθος $W_{3dB} \cdot T_b$, όπου W_{3dB} είναι το εύρος ζώνης μισής ισχύος του φίλτρου και T_b είναι η διάρκεια του bit. Στο Σχ.20 φαίνεται η φασματική πυκνότητα ισχύος της GMSK για $W_{3dB} \cdot T_b = 0.3$ και $W_{3dB} \cdot T_b = 0.5$ καθώς και η φασματική πυκνότητα ισχύος της MSK [7].

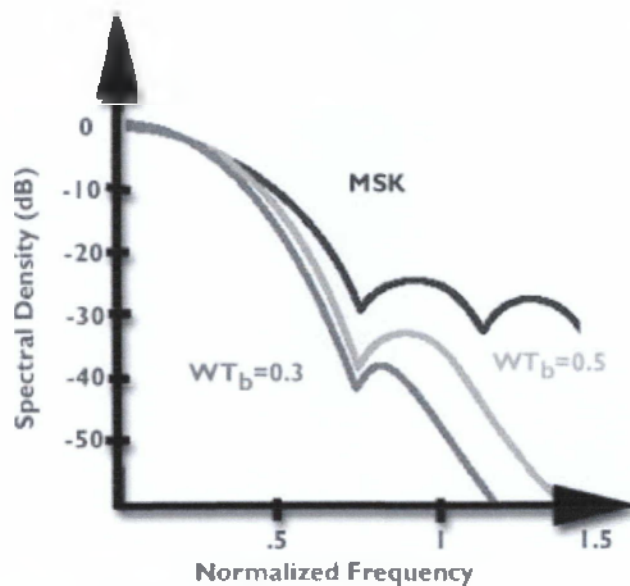


Figure 4

Σχήμα 17: Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_b για τις διαμορφώσεις GMSK και MSK

Η GMSK με $W_{3dB} \cdot T_b = 0.3$ χρησιμοποιείται στο σύστημα GSM στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Το εύρος ζώνης ενός σήματος διαμορφωμένου κατά GMSK δίνεται από τον κανόνα του Carson σύμφωνα με τη σχέση:

$$W = 2(\beta + 1)f_M \quad (1.19)$$

Αν, $W_{3dB} \cdot T_b = 0.3$ τότε $f_M = 0.3/T_b = 0.3f_b = 0.3R$ και συνεπώς προκύπτει:

$$W_{GMSK} = 2(\beta + 1)f_M = 2 \cdot (0.5 + 1) \cdot 0.3R = 0.9R \quad (1.20)$$

Επομένως, η φασματική απόδοση της GMSK ισούται με:

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R}{0.9R} = 1.11 \quad (1.21)$$

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης GMSK

Η πιθανότητα εσφαλμένων bit για τη διαμόρφωση GMSK δίνεται από τη σχέση[7]:

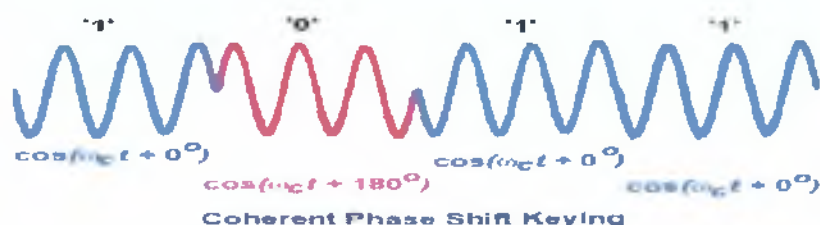
$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{a \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (1.22)$$

όπου a είναι μία σταθερά που εξαρτάται από την παράμετρο $W_{3dB} \cdot T_b$. Αν $W_{3dB} \cdot T_b = 0.25$ τότε $a \approx 0.68$. Συνεπώς, ένα άνω όριο της πιθανότητας εσφαλμένου bit για την GMSK δίνεται από τη σχέση[7]:

$$P_b \leq \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{0.68 \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (1.23)$$

1.4.5 Ψηφιακή Διαμόρφωση φάσης (Phase-shift keying, PSK)

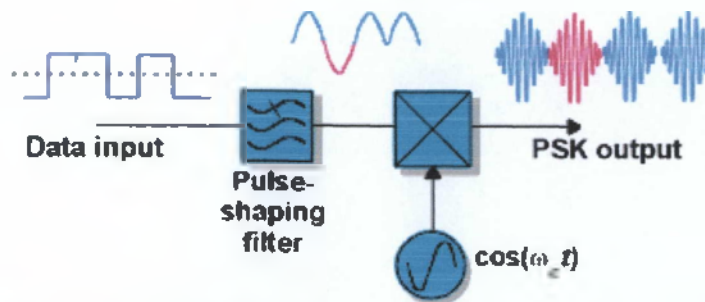
Στη μέθοδο αυτή μεταβάλλεται η αρχική φάση του φέροντος σήματος. Αυτή η φάση συνήθως ενσωματώνεται στο φέρον και εκτιμάται ως προς ένα σταθερό φέρον αναφοράς γνωστής φάσης, και γι' αυτό ονομάζεται σύμφωνη PSK (coherent PSK). Στη δυαδική διαμόρφωση PSK (Binary PSK, BPSK) χρησιμοποιούνται οι καταστάσεις φάσης 0° και 180° (Σχ.18). 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)[2].



Σχήμα 18: Σύμφωνη ψηφιακή διαμόρφωση φάσης

Η γενική μέθοδος παραγωγής PSK παρουσιάζεται στο Σχ.19. Παρατηρείται, ότι τα δεδομένα μορφοποιούνται κατάλληλα στην βασική ζώνη, πριν ακολουθήσει η διαδικασία της διαμόρφωσης του υψίσυχνου φορέα. Η γραμμικότητα της διαδικασίας διαμόρφωσης διασφαλίζει την επικάλυψη της μορφής του φίλτρου βασικής ζώνης ακριβώς επάνω στο διαμορφωμένο σήμα διέλευσης ζώνης [1].

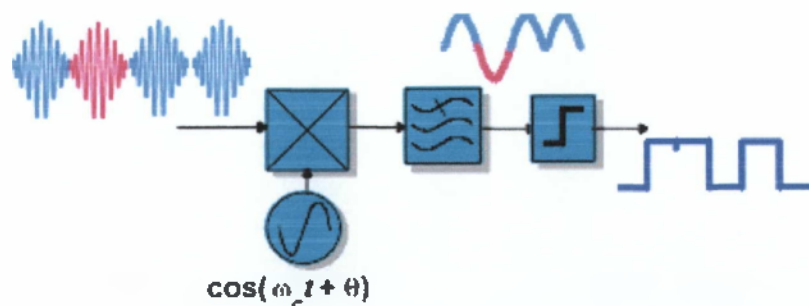
Πομπός



Σχήμα 19: Τυπική διαδικασία παραγωγής κυματομορφής PSK

Ανίχνευση

Δεν υπάρχει ασύμφωνος τρόπος ανίχνευσης της διαμόρφωσης PSK και έτσι πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποια μορφή σύμφωνης ανίχνευσης. Ο ιδανικός ανιχνευτής, επομένως απαιτεί την ακριβή γνώση της φάσης του φορέα στο δέκτη. Όπως και στη διαμόρφωση ASK, όταν υπάρχει σφάλμα φάσης θ στο τοπικά δημιουργούμενο φέρον, τότε μειώνεται η τάση του σήματος στην έξοδο του δέκτη κατά έναν παράγοντα $\cos(\theta)$. Αυτό με τη σειρά του μειώνει το λόγο E_b / N_0 του ανιχνευτή κατά έναν παράγοντα $\cos^2(\theta)$. Επομένως πρέπει να υπάρχει μηδενικό σφάλμα φάσης για να έχουμε τη βέλτιστη ανίχνευση. Εάν η διαφορά φάσης φθάσει τις 90° , η έξοδος γίνεται μηδέν (Σχ.20) [1].



Σχήμα 20: Ανίχνευση της διαμόρφωσης PSK

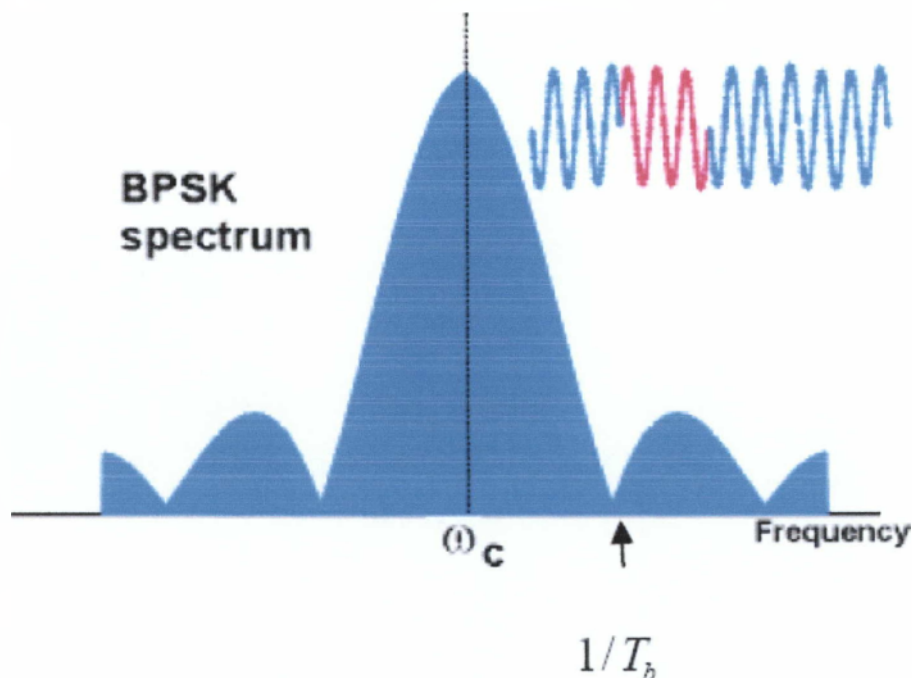
Φάσμα και φασματική απόδοση PSK

Ο διαμορφωτής γινομένου πολλαπλασιάζει το Non Return to Zero (NRZ) σήμα βασικής ζώνης (baseband signal) με $\cos(\omega_c t)$.

Η ενέργεια του πολλαπλασιασμού σημάτων στο πεδίο Χρόνου αντιστοιχεί στη διαδικασία της συνέλιξης του Φασματικού περιεχομένου των δύο σημάτων στο πεδίο συχνοτήτων.

Λαβαίνοντας υπόψη το φάσμα του $\cos(\omega_c t)$, το τελικό αποτέλεσμα είναι η μεταφορά του φάσματος του σήματος βασικής ζώνης γύρω από τη συχνότητα του φέροντος ω_c . Επιπλέον λόγω του ότι το baseband signal αποτελείται από σειρά τετραγωνικών παλμών, το τελικό φάσμα του σήματος BPSK (για θετικές μόνο συχνότητες) δίνεται στο παρακάτω Σχ.21. Η πρώτη συχνότητα με μηδενικό πλάτος είναι η $R_b = 1/T_b$ Hz.

Το συνολικό φάσμα είναι $BW = 2 \cdot R_b = 2/T_b$ Hz. Το 90% της PSK signal energy περιέχεται περίπου στο $1.6 \cdot R_b$ για τετραγωνικούς παλμούς, ενώ για παλμούς raised cosine με $\alpha = 0.5$ όλη η ενέργεια βρίσκεται μέσα στο $1.5 \cdot R_b$ [6].



Σχήμα 21: Φασματική απεικόνιση BPSK σήματος για θετικές συχνότητες

Για διαμόρφωση BPSK έχουμε ότι η φασματική απόδοση είναι $R_b/W = 0.5 \text{ bit/sec/Hz}$.

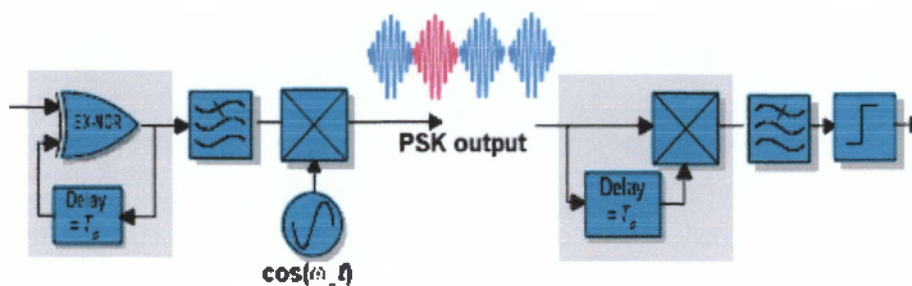
Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης PSK

Η πιθανότητα σφάλματος για την περίπτωση της PSK είναι ακριβώς ίση με την πιθανότητα σφάλματος που προσδιορίστηκε για την περίπτωση διπολικής σηματοδοσίας βασικής ζώνης, δηλαδή [1]:

$$P_e^{PSK} = Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right) \quad (1.24)$$

1.4.6 Διαφορική Μεταλλαγή Μετατόπισης Φάσης (Differential Phase Shift Keying, DPSK)

Η τεχνική διαμόρφωσης DPSK (Differential PSK, DPSK) ή αλλιώς διαφορικά σύμφωνη τεχνική PSK (Differentially Coherent PSK) χρησιμοποιεί μια έξυπνη μέθοδο προκειμένου να παρακάμψει την ανάγκη για ύπαρξη σύμφωνου σήματος αναφοράς στο δέκτη. Δηλαδή ο δέκτης της διαμόρφωσης DPSK είναι ετερόδυνος και επομένως είναι εύκολος στην κατασκευή και φθηνός σε κόστος, με αποτέλεσμα η τεχνική αυτή να χρησιμοποιείται αρκετά στις ασύρματες επικοινωνίες [1].



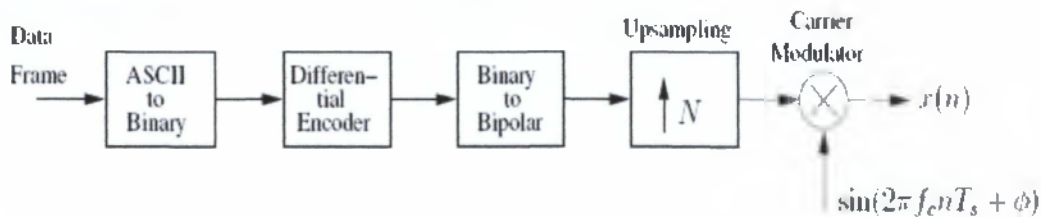
Σχημα 22: Διάγραμμα DPSK

Πομπός και δέκτης

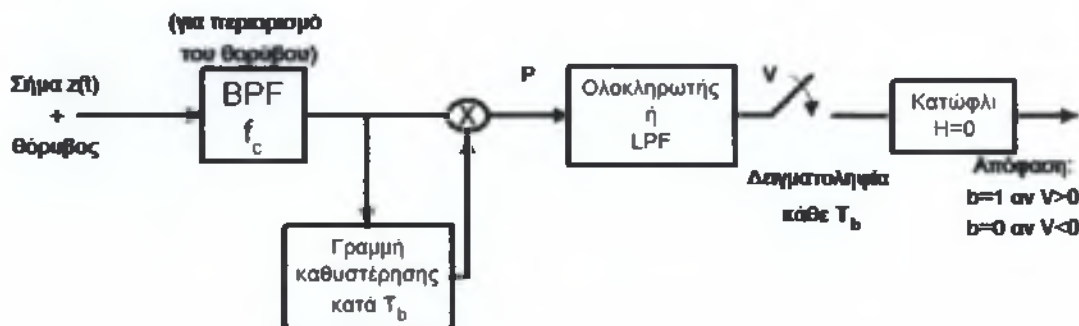
Στα συστήματα DPSK, η δυαδική ακολουθία εισόδου υφίσταται μία διαφορική κωδικοποίηση στον πομπό, πριν εισέρθει σε έναν απλό διαμορφωτή BPSK. Η διαφορικά κωδικοποιημένη ακολουθία $\{d_k\}$ προκύπτει από την δυαδική ακολουθία εισόδου $\{m_k\}$ ως το συμπλήρωμα της πρόσθεσης modulo-2 των συμβόλων m_k και d_{k-1} , δηλαδή $d_k = \overline{m_k \oplus d_{k-1}}$. Η κωδικοποίηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να αφήνει αμετάβλητο το σύμβολο d_k (σε σχέση με το d_{k-1}), όταν το σύμβολο εισόδου m_k είναι ίσο με 1, ενώ το αλλάζει όταν το σύμβολο εισόδου m_k είναι ίσο με 0[4]. Ο πομπός αποτελείται από ένα λογικό κύκλωμα κι ένα στοιχείο καθυστέρησης τα οποία παράγουν τη διαφορικά κωδικοποιημένη ακολουθία από τη δυαδική ακολουθία εισόδου. Η ακολουθία αυτή εισέρχεται σε έναν διαμορφωτή BPSK ώστε να προκύψει το σήμα DPSK. Στον δέκτη, η αρχική ακολουθία ανακτάται από το λαμβανόμενο σήμα μέσω μιας αντίστροφης διαδικασίας, όπως φαίνεται στο Σχ.22, που παριστάνει το διάγραμμα του δέκτη [6].

Συγκεκριμένα ο δέκτης εκτελεί συσχέτιση (πολλαπλασιασμό και ολοκλήρωση) του λαμβανόμενου σήματος, το οποίο προκύπτει από τη διέλευση του μεταδιδόμενου σήματος από το κανάλι και την προσθήκη του θορύβου, με την εκδοχή του λαμβανόμενου σήματος καθυστερημένη κατά τη διάρκεια ενός δυαδικού ψηφίου, και παίρνει απόφαση ανάλογα με το πρόσημο του αποτελέσματος. Δηλαδή σε κάθε στιγμή, το σήμα αναφοράς για την εξαγωγή της πληροφορίας της φάσης είναι το προηγούμενο δυαδικό ψηφίο και δεν υπάρχει ανάγκη για ξεχωριστό σήμα αναφοράς, όπως υπάρχει στο σύστημα σύμφωνης διαμόρφωσης PSK [5].

DPSK Transmitter



Σχήμα 23: Διάγραμμα Πομπού του DPSK



Σχήμα 24: Διάγραμμα Δέκτη του DPSK

Η μέση πιθανότητα σφάλματος στην τεχνική διαμόρφωσης DPSK σε ένα κανάλι AWGN δίνεται από την σχέση:

$$P_{eDPSK} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right) \quad (1.25)$$

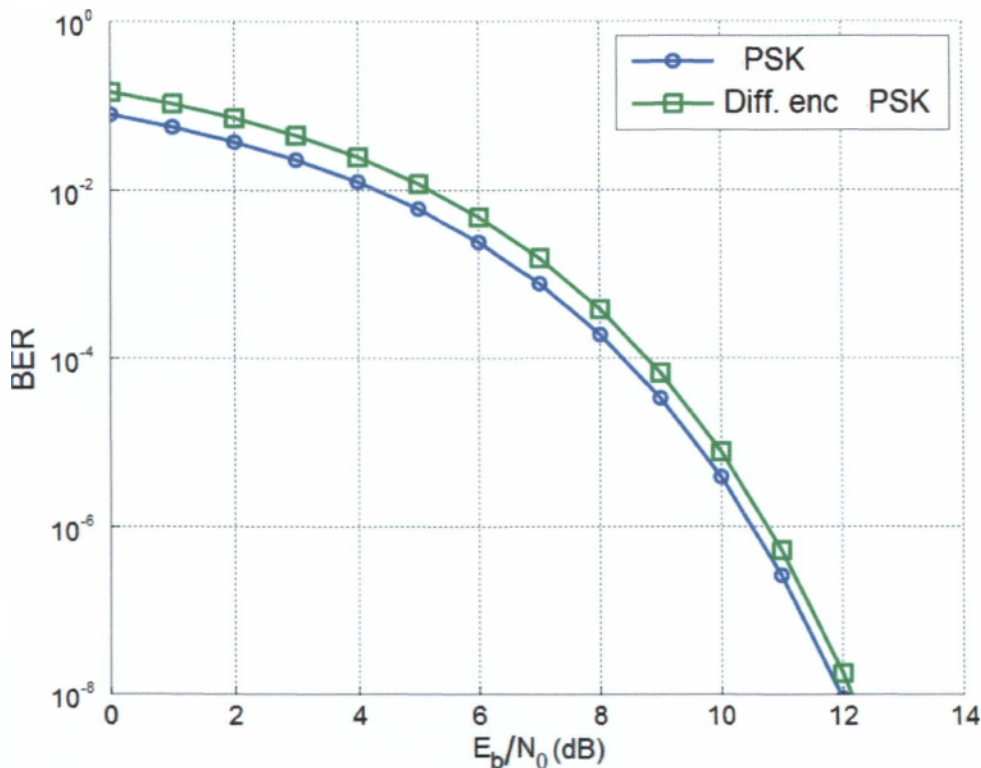
Ενώ δηλαδή η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα της μειωμένης πολυπλοκότητας του κυκλώματος του δέκτη, έχει μια μειωμένη απόδοση της τάξης των 3dB περίπου σε σχέση με τη σύμφωνη διαμόρφωση PSK.

Αυτό σημαίνει ότι για να πετύχει την ίδια πιθανότητα σφάλματος με τη μέθοδο PSK, η μέθοδος DPSK χρειάζεται ισχύ μεγαλύτερη κατά 3dB. Η υποβάθμιση της απόδοσης οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα αναφοράς για τη φάση στο σύστημα DPSK είναι αλλοιωμένο από το θόρυβο. Ωστόσο, η υστέρηση της μεθόδου ως προς την αποδοτικότητα ισχύος, αντισταθμίζεται από το πλεονέκτημα της ασύμφωνης αποδιαμόρφωσης [4].

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης DPSK

ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit δίδεται από τη σχέση[1]:

$$P_{eDPSK} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{N_0}\right) \quad (1.26)$$



Σχήμα 25: Διάγραμμα BER για PSK και DPSK

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΑΠΟ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ
II Καθηγητής Αναστάσιος Παλατσώρης.
- [2]. ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ,
WILLIAM STALLINGS ΕΚΤΗ ΕΚΔΟΣΗ (ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΤΖΙΟΛΑ).
- [3]. ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ, WILLIAM
STALLINGS(ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ).
- [4]. ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ(ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ
ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ),ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΘΕΜΑΤΑ(ΜΕΡΟΣ Α΄)
ΚΩΣΤΑΣ ΜΠΕΡΜΠΕΡΙΔΗΣ-ΒΑΣΙΛΗΣ ΚΕΚΑΤΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ
ΚΕΚΑΤΟΣ.
- [5]. ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ (ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΒΟΗΘΗΜΑ),
Χ.ΚΑΡΑΪΣΚΟΣ.
- [6]. ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ(ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ), Επικ. Καθ.
Γ.ΕΥΘΥΜΟΓΛΟΥ
- [7]. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΣΤΡΙΒΑ, «ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΑΞΗ
ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ», ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΟΥΦΟΡΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ,
ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΣΧΟΛΗ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

2.1 M-ΑΔΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Σε μια ψηφιακή διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων μπορούμε να στείλουμε κάθε ένα από M επιτρεπτά σήματα κατά τη διάρκεια σηματοδοσίας T . Ο αριθμός των δυνατών σημάτων είναι $M=2^n$, όπου n είναι ακέραιος αριθμός και η διάρκεια συμβόλου είναι $T=n \cdot T_b$, όπου T_b η διάρκεια ενός bit. Τα σήματα αυτά δημιουργούνται αλλάζοντας το πλάτος, την αρχική φάση ή τη συχνότητα του φέροντος σε M διακριτά βήματα.

Έστω $m(t)$ το μήνυμα πληροφορίας

Δυαδική σηματοδοσία: $m(t) \in \{0,1\}$

M -ary σηματοδοσία : $m(t) \in \{0, 1, \dots, M-1\}$

Το σήμα πληροφορίας παίρνει μια από M τιμές:

$M=2^k$ και k αριθμός bits/symbol.

Η πληροφορία μεταδίδεται με τον ρυθμό μετάδοσης των συμβόλων. Το εύρος φάσματος είναι ανάλογο του ρυθμού μετάδοσης συμβόλων ενώ ένας μόνο παλμός μεταδίδεται για κάθε σύμβολο [1].

2.2. Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης Πολλαπλών επιπέδων

Οι τεχνικές Μ-αδικής (M-ary) διαμόρφωσης διέλευσης ζώνης, και ειδικά η Μ-αδική διαμόρφωση πλάτους, με ορθογωνισμό φάσης (QAM), χρησιμοποιούνται ευρέως σε ενσύρματες, αλλά και ασύρματες ψηφιακές επικοινωνιακές ζεύξεις. Οι Τεχνικές Ψηφιακής Διαμόρφωσης Πολλαπλών επιπέδων τις οποίες θα μελετήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι:

- Διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών επιπέδων ASK (M-ary Amplitude Shift Keying, M-ASK).
- Διαμόρφωση συχνότητας πολλαπλών επιπέδων FSK (M-ary Frequency Shift Keying, M-FSK).
- Διαμόρφωση Φάσης πολλαπλών επιπέδων PSK (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK).
- Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM).

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

Η επέκταση της έννοιας της δυαδικής διαμόρφωσης ASK στην ASK πολλαπλών επιπέδων γίνεται απλά, καθώς οι διαδικασίες δημιουργίας και ανίχνευσης απλώς επεκτείνονται, απαιτώντας σύγκριση ανάμεσα σε πολλαπλά επίπεδα τάσης της ανακτημένης περιβάλλουσας του σήματος, με ανίχνευση είτε σύμφωνη είτε ασύμφωνη [2]. Η ανάκτηση του φορέα στην Μ-αδική ASK γίνεται με τις ίδιες μεθόδους που περιγράφηκαν στην περίπτωση της απλής, δυαδικής ASK. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την επικοινωνία μέσω κώδικα Μορς σε ραδιοφωνικές συχνότητες. Επίσης χρησιμοποιείται σε ψηφιακά δεδομένα με χαμηλής συχνότητας RF εφαρμογές αλλά και σε οπτικές ίνες.

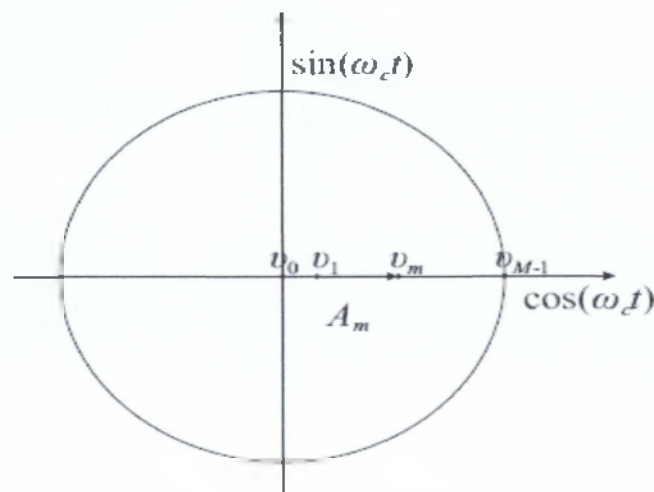
Στην διαμόρφωση πλάτους πολλαπλών επιπέδων κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μια ακολουθία από m bit δεδομένων. Η μαθηματική παράσταση του μεταδιδόμενου συμβόλου είναι:

$$u(t) = A_m \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (2.1)$$

$$A_m = A \frac{m}{M} \quad (2.2)$$

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

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 Σχ.26. 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 [3].



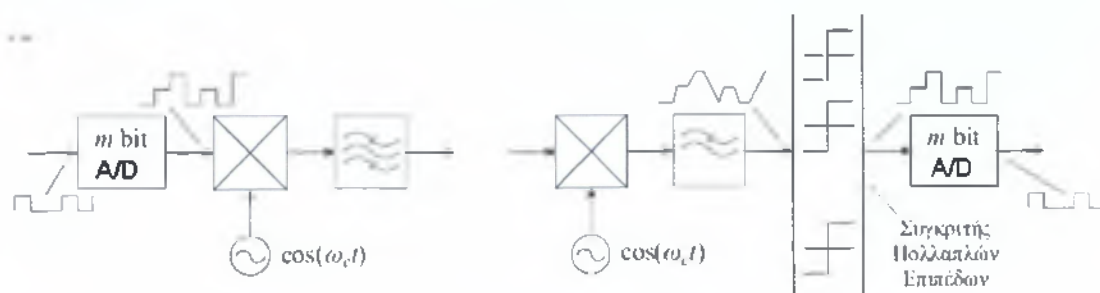
Σχήμα 26: Διάγραμμα των διαμορφώσεων M -ASK.

Πομπός και δεκτής

Το σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή σημάτων M -ASK φαίνεται στο Σχ.27. Το σύστημα διαμόρφωσης αποτελείται από έναν μετατροπέα D/A m bit, έναν μίκτη και ένα φίλτρο. Τα ψηφιακά δεδομένα αρχικά εισέρχονται στο μετατροπέα D/A, η έξοδος του οποίου απαρτίζεται από παλμούς διάρκειας $m \cdot T_b$ 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. 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[3].



Σχήμα 27: Διάγραμμα ενός συστήματος μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων με τη χρήση των διαμορφώσεων M-ASK.

Η ανάκτηση του φέροντος μπορεί αν 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 συντονισμένου στη συχνότητα f_c [3].

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος M-ASK

Το φάσμα των διαμορφώσεων M-ASK ακολουθεί τη μορφή *sinc*, όπως και στην περίπτωση της δυαδικής ASK. Η φασματική πυκνότητα ισχύος των διαμορφώσεων αυτών δίνεται από τη σχέση [3]:

$$P(f) = K \frac{T_b}{M} \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)mT_b}{\pi(f - f_c)mT_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)mT_b}{\pi(f + f_c)mT_b} \right]^2 \right\} \quad (2.3)$$

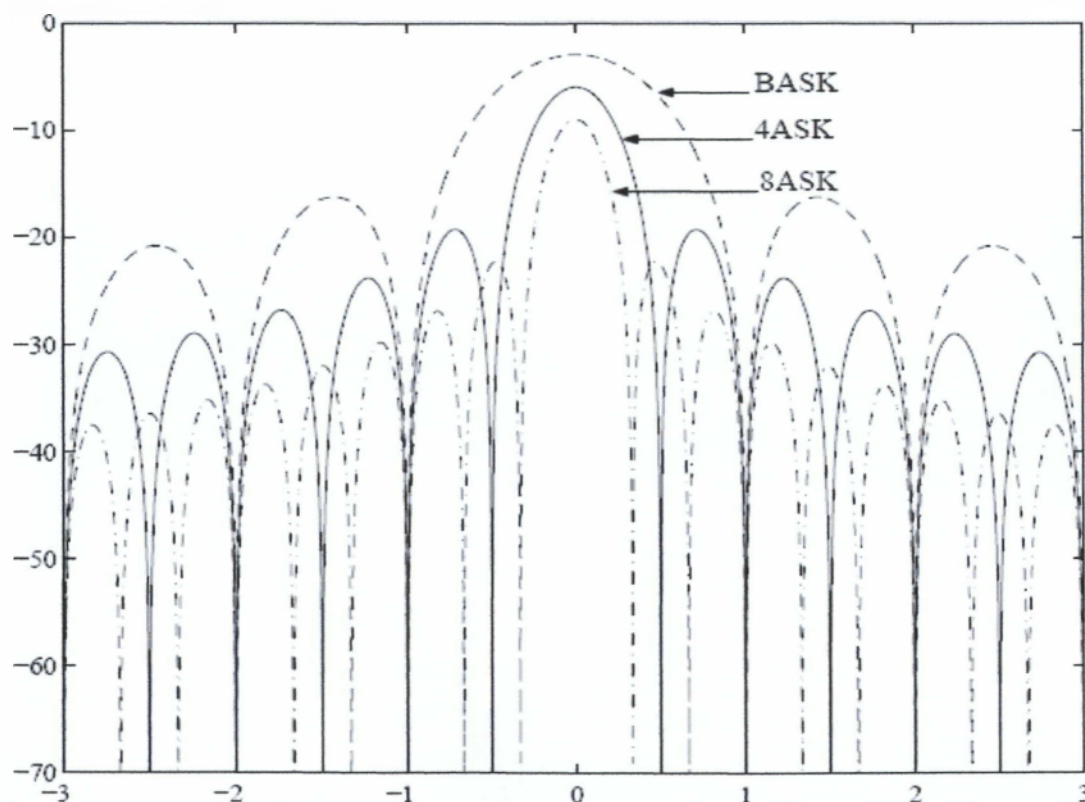
όπου T_b είναι η διάρκεια του bit και m είναι το πλήθος των μεταδιδόμενων bit ανά σύμβολο. Η σχέση (2.3) δίνει την αμφίπλευρη φασματική

πυκνότητα ισχύος των διαμορφώσεων M-ASK (Σχ.28). Η φασματική απόδοση Q των διαμορφώσεων M-ASK δίνεται από τη σχέση[3]:

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{W} \quad (2.4)$$

όπου R είναι ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων και W το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Θεωρώντας το απαιτούμενο εύρος ζώνης ως το ελάχιστο εύρος ζώνης κατά Nyquist, το οποίο ισούται αριθμητικά με το ρυθμό μετάδοσης συμβόλων ($W = R_s$) η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως εξής[3]:

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{R_s} = \log_2 M \text{ (Mbits / sec / Hz)} \quad (2.5)$$



Σχήμα 28:Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_s , για τις διαμορφώσεις M-ASK.

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης M-ASK

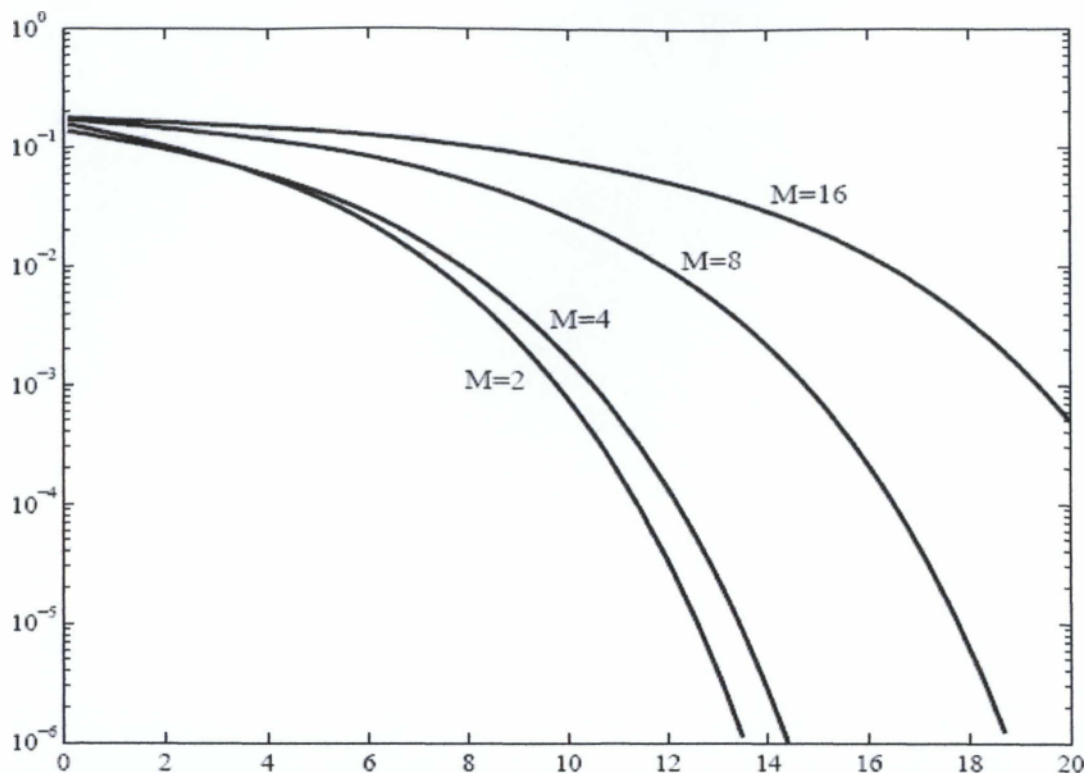
Ο ρυθμός λήψης εσφαλμένων συμβόλων P_s συναρτήσει του λόγου E_b / N_0 για τις διαμορφώσεις M -ASK δίνεται από τη σχέση[3]:

$$P_s = \frac{M-1}{M} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{3 \cdot \log_2 M}}{M^2 - 1} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.6)$$

Η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit (P_B) ταυτίζεται με την πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων P_s μόνο στην περίπτωση της δυαδικής διαμόρφωσης BASK. Η σχέση που συνδέει την πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit (P_B) με την πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων P_s θεωρώντας κωδικοποίηση Gray είναι η ακόλουθη[3] (Σχ.29):

$$P_B = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (2.7)$$

Η απόδοση ισχύος των διαμορφώσεων πλάτους είναι σχετικά χαμηλή διότι δεν εκμεταλλεύονται την ορθογωνικότητα $\cos \omega_c t$ και $\sin \omega_c t$ στο σύνολο των μεταδιδόμενων συμβόλων. Παράλληλα, η ευαισθησία που παρουσιάζουν στις ατέλειες του χρησιμοποιούμενου καναλιού και ιδιαίτερα στις μεταβολές απολαβής καθώς και η ανάγκη γραμμικότητας στη συνολική διαδικασία μετάδοσης αφήνουν λίγα περιθώρια για πρακτική εφαρμογή της ASK πέρα από τη δυαδική μορφή της[3].



Σχήμα 29: Γραφική παράσταση της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bit ως συνάρτηση του λόγου E_b/N_0 και του αριθμού M των χρησιμοποιούμενων συμβόλων για τις διαμορφώσεις M-ASK.

2.2.2 Διαμόρφωση συχνότητας πολλαπλών επιπέδων FSK (M-ary Frequency Shift Keying, M-FSK)

Σε αντίθεση με τη M-αδική σηματοδοσία ASK και την M-αδική σηματοδοσία PSK, η M-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 M-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 -1.6 dB [2].

Η διαμόρφωση M-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 M-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 M -αδικού ορθογώνιου FSK μπορούμε να φανταστούμε ένα σύστημα συντεταγμένων με M αμοιβαία ορθογώνιους άξονες συντεταγμένων. Τότε, τα ανύσματα των σημάτων είναι παράλληλα προς αυτούς τους άξονες[3].

Αυτή την διαμόρφωση χρησιμοποιούσαν τα περισσότερα από τα πρώτα μοντέλα modem για να στείλουν και να λάβουν δεδομένα με ρυθμούς μέχρι 300, 600 ή 1200 bits το δευτερόλεπτο. Μερικοί μικρο-υπολογιστές χρησιμοποιούσαν επίσης αυτή τη διαμόρφωση για αποθήκευση δεδομένων σε κασέτες ήχου. Η Διαμόρφωση συχνότητας πολλαπλών επιπέδων FSK χρησιμοποιείται ακόμη στο ερασιτεχνικό ραδιόφωνο γιατί επιτρέπει μεταφορά δεδομένων από μη τροποποιημένο εξοπλισμό για μετάδοση φωνής.

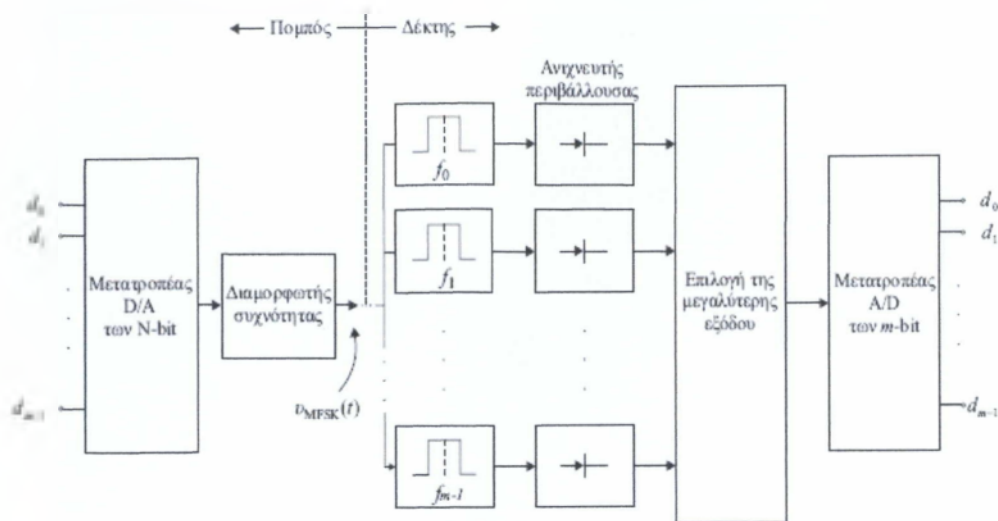
Πομπός και Δέκτης

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 διαμορφώουσα κυματομορφή. Το σήμα που μεταδόθηκε, για τη διάρκεια του διαστήματος συμβόλου, είναι συχνότητας f_0 ή f_1 ή ... ή f_{M-1} με $M = 2^m$.

Ασύμφωνη ανίχνευση

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 A/D των m bit.

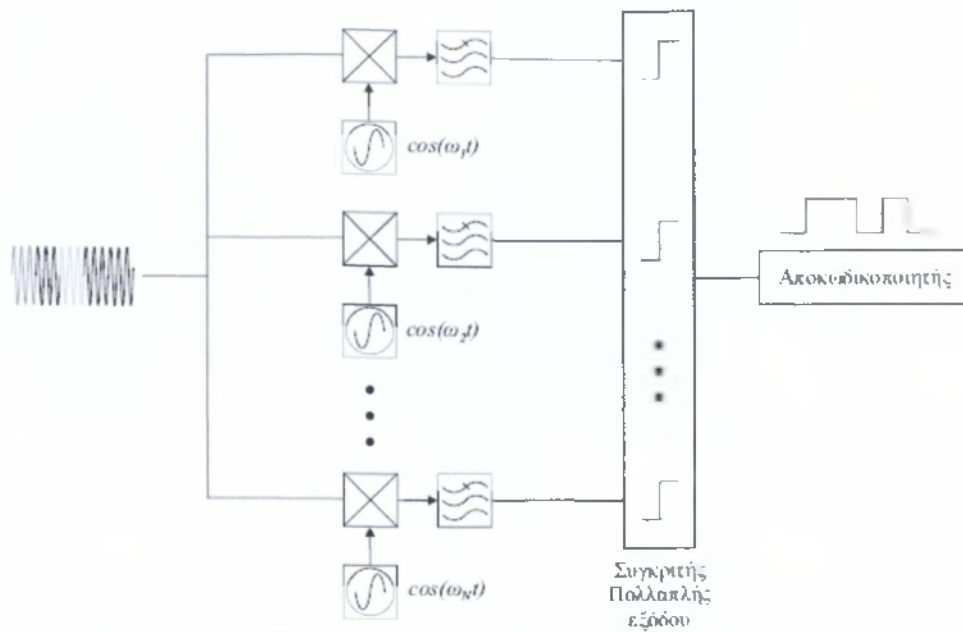
Στο Σχ.30 φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα παραγωγής και λήψης ενός σήματος M-FSK, θεωρώντας ασύμφωνη ανίχνευση.



Σχήμα 30: Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων με τη χρήση των διαμορφώσεων M-FSK.

Σύμφωνη Ανίχνευση

Ένας τυπικός ανιχνευτής της M-αδικής FSK φαίνεται στο Σχ.31. 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_o 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.



Σχημα 31: Σχηματικό διάγραμμα ενός σύμφωνου ανιχνευτή M-FSK.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος M-FSK

Η φασματική ανάλυση των σημάτων M-FSK είναι αρκετά πολύπλοκη. Δίνεται το φάσμα των διαμορφώσεων M-FSK για απόκλιση συχνότητας $k=0,5$ (Σχ.32). Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων που παριστούν τα μεταδιδόμενα σύμβολα είναι ίση με $\frac{1}{2T_s}$, όπου T_s είναι η διάρκεια του συμβόλου.

Η φασματική πυκνότητα ισχύος του ισοδύναμου M-FSK σήματος στη βασική ζώνη για $k=0,5$ δίνεται από τη σχέση:

$$P(f) = 4E_b \left[\frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\sin \gamma_i}{\gamma_i} \right)^2 + \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \cos(\gamma_i + \gamma_j) \left(\frac{\sin \gamma_i}{\gamma_i} \right)^2 \left(\frac{\sin \gamma_j}{\gamma_j} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

Όπου

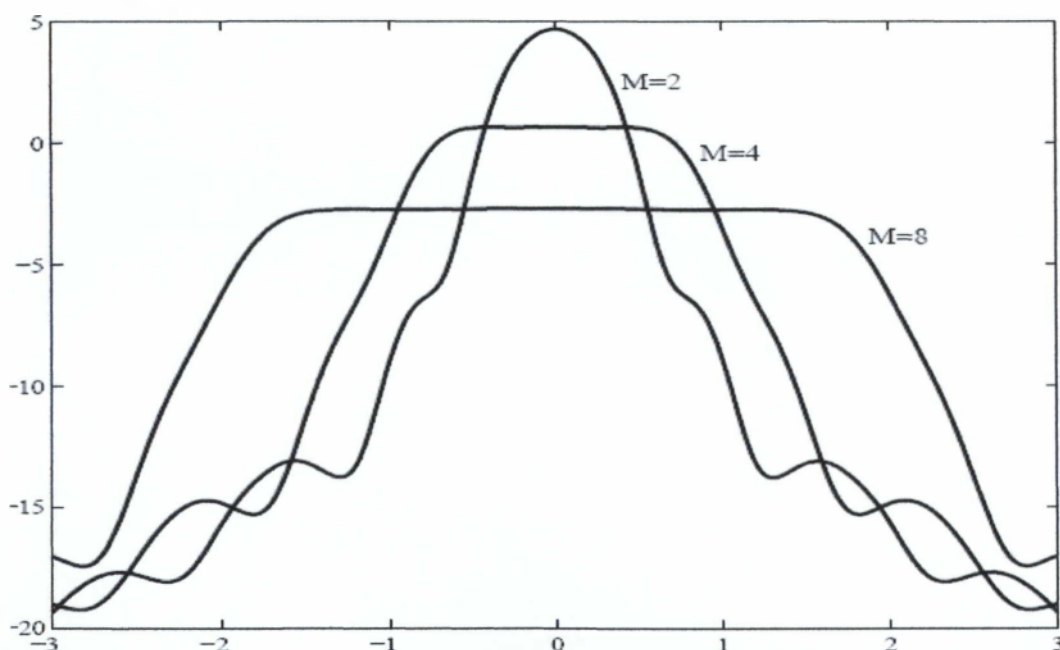
$$\gamma_i = \left(fT_s - \frac{a_i}{4} \right) \pi$$

Και

$$a_i = 2i - (M + 1) \quad i = 1, 2, \dots, M$$

Η σχέση που συνδέει τον αριθμό των μεταδιδόμενων bit ανά σύμβολο m με τον αριθμό των συμβόλων M είναι $m = 2^m$, όπως και στις διαμορφώσεις M-PSK. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την παράσταση των M συμβόλων για την ορθογωνική M-FSK με ασύμφωνη ανίχνευση είναι ίση με $\frac{1}{T_s}$, όπου T_s είναι η διάρκεια του συμβόλου και συνδέεται με τον ρυθμό συμβόλων μέσω της σχέσης $T = \frac{1}{R}$. Συνεπώς, το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης που απαιτείται για ορθογωνική ασύμφωνη M-FSK διαμόρφωση δίνεται από τη σχέση:

$$W = M \cdot \frac{1}{T_s} = M \cdot R_s \quad (2.9)$$



Σχήμα 32: Γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_s , για τις ορθογωνικές διαμορφώσεις M-FSK με απόκλιση συχνότητας $k=0,5$.

Η φασματική απόδοση των διαμορφώσεων δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{R}{W} = \frac{R_s \cdot \log_2 M}{M \cdot R_s} = \frac{\log_2 M}{M} = \frac{m}{M} \text{ bits / sec / Hz} \quad (2.10)$$

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την παράσταση των M συμβόλων για την ορθογωνική M-FSK με σύμφωνη ανίχνευση είναι ίση με $\frac{1}{2T}$, δηλαδή η μισή σε σχέση με την ασύμφωνη ανίχνευση. Συνεπώς, το ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης που απαιτείται για ορθογωνική σύμφωνη M-FSK διαμόρφωση προκύπτει είναι ίσο με:

$$W = M \cdot \frac{1}{2T_s} = \frac{M \cdot R_s}{2} \quad (2.11)$$

Τελος η σύμφωνη M-FSK απαιτεί λιγότερο εύρος ζώνης από την ασύμφωνη, διατηρώντας την ιδιότητα της ορθογωνικότητας. Η σύμφωνη M-FSK είναι κατά συνέπεια πιο αποδοτική φασματικά από την ασύμφωνη M-FSK. Εντούτοις, η υλοποίηση της σύμφωνης ανίχνευσης είναι πιο πολύπλοκη καθώς απαιτεί την ανάκτηση των φερόντων και στην πράξη χρησιμοποιείται σπανιότερα από την ασύμφωνη ανίχνευση[3].

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης M-FSK

Η πιθανότητα λήψης εσφαλμένων συμβόλων P_s συναρτήσει του λόγου E_b / N_0 για την ορθογωνική M-FSK διαμόρφωση χρησιμοποιώντας σύμφωνη ανίχνευση είναι[3] :

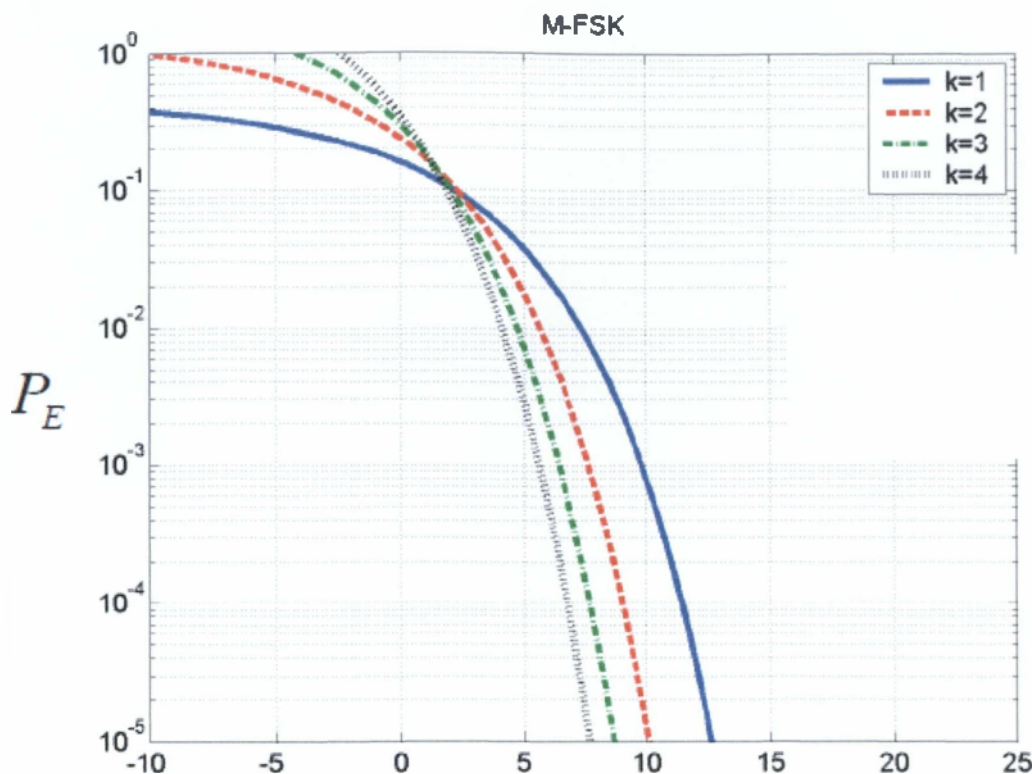
$$P_s \leq \frac{M-1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\log_2 M}{2} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.12)$$

Η πιθανότητα λήψης εσφαλμένων συμβόλων P_s συναρτήσει του λόγου E_b / N_0 για την ορθογωνική M-αδική διαμόρφωση M-FSK χρησιμοποιώντας ασύμφωνη ανίχνευση δίνεται από τη σχέση[4]:

$$P = \frac{1}{M} \exp \left(-\log_2 M \cdot \frac{E_b}{N_0} \right) \sum_{j=2}^M (-1)^j \binom{M}{j} \exp \left(\frac{\log_2 M}{j} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right) \quad (2.13)$$

Όπου

$$\binom{M}{j} = \frac{M!}{j!(M-j)!}$$



Σχήμα 33:Γραφική παράσταση της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bit ως συνάρτηση του λόγου E_b/N_0 για τις διαμορφώσεις M-FSK με σύμφωνη ανίχνευση.

2.2.3 Διαμόρφωση Φασής 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 την αρχική φάση ενός ημιτονοειδούς φέροντος $\cos\omega_c t$. Η Διαμόρφωση Φασής πολλαπλών επιπέδων PSK είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες όπως επίσης και στα ασύρματα δίκτυα. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο διακρίνουμε και στη διαμόρφωση QAM είναι ότι χρησιμοποιείται στο πρότυπο DVB-T. Αυτό σημαίνει ότι η διαμόρφωση M-PSK χρησιμοποιείται στην επίγεια ψηφιακή καλωδιακή τηλεόραση.

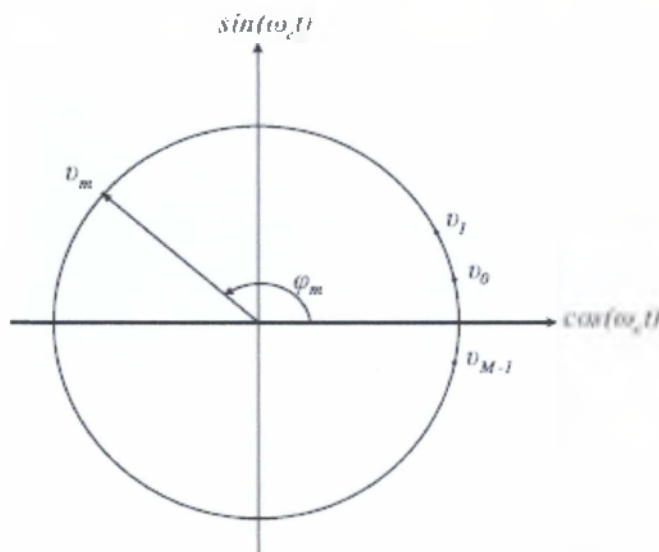
Η μαθηματική παράσταση του μεταδιδόμενου συμβόλου είναι:

$$u(t) = A \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_m) \quad m=0,1,2,\dots,M-1 \quad (2.14)$$

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

$$\varphi_m = (2m + 1) \frac{\pi}{M} (\text{rad}) \quad (2.15)$$

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 Σχ 34. Αποτελείται από ένα πλήθος συμβόλων που βρίσκονται πάνω σε ένα κύκλο ακτίνας A και ισαπέχουν μεταξύ τους κατά γωνία $2\pi / M$.



Σχρημα 34: Διάγραμμα διαμορφώσης M-PSK.

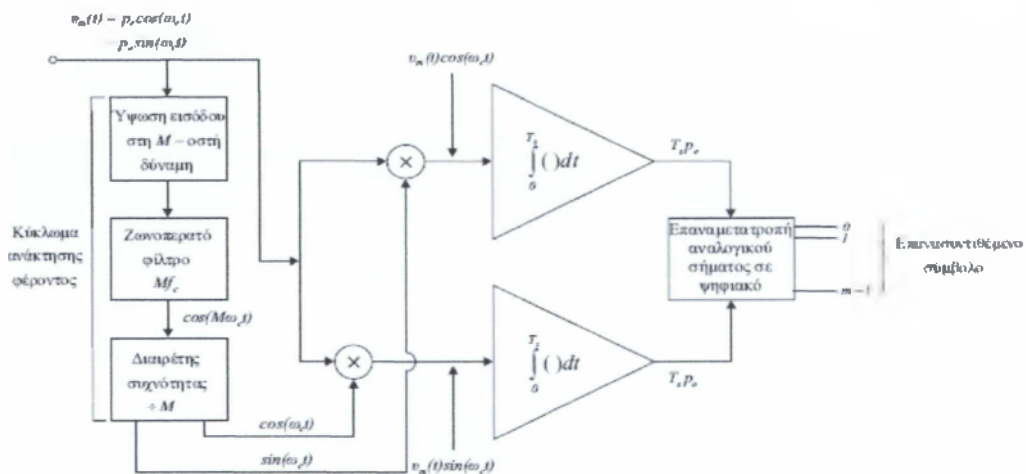
Πομπός και δέκτης

Τα σχηματικά διαγράμματα του διαμορφωτή και του αποδιαμορφωτή ενός σήματος M-PSK φαίνονται στα Σχ 35 και Σχ 36 αντίστοιχα. 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. 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 .



Σχημα 35: Διάγραμμα του πομπού της διαμόρφωσης M-PSK.



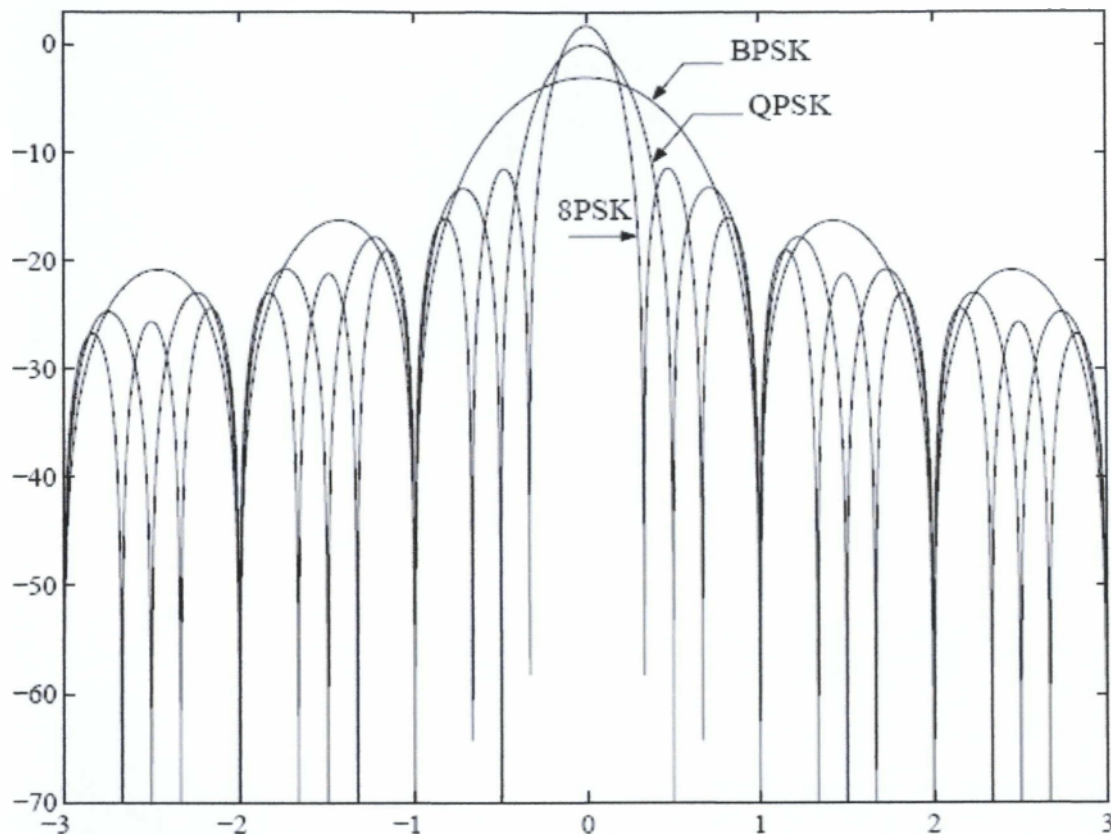
Σχημα 36: Διάγραμμα του δέκτη της διαμόρφωσης M-PSK.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος M-PSK

Το φάσμα των διαμορφώσεων M-PSK παρουσιάζει παρόμοια μορφή με αυτή των διαμορφώσεων M-ASK, ενώ η φασματική πυκνότητα ισχύος τους δίνεται από τη σχέση :

$$P(f) = \frac{E_s}{2} \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)T_s}{\pi(f - f_c)T_s} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)T_s}{\pi(f + f_c)T_s} \right]^2 \right\} \quad (2.16)$$

Η γραφική παράσταση της φασματικής πυκνότητας ισχύος των διαμορφώσεων M-PSK σε συνάρτηση με την συχνότητα fT_b , δίνεται στο Σχ 37.



Σχημα 37:Γραφική παράσταση της φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την συχνότητα fT_b , για τις διαμορφώσεις M-PSK.

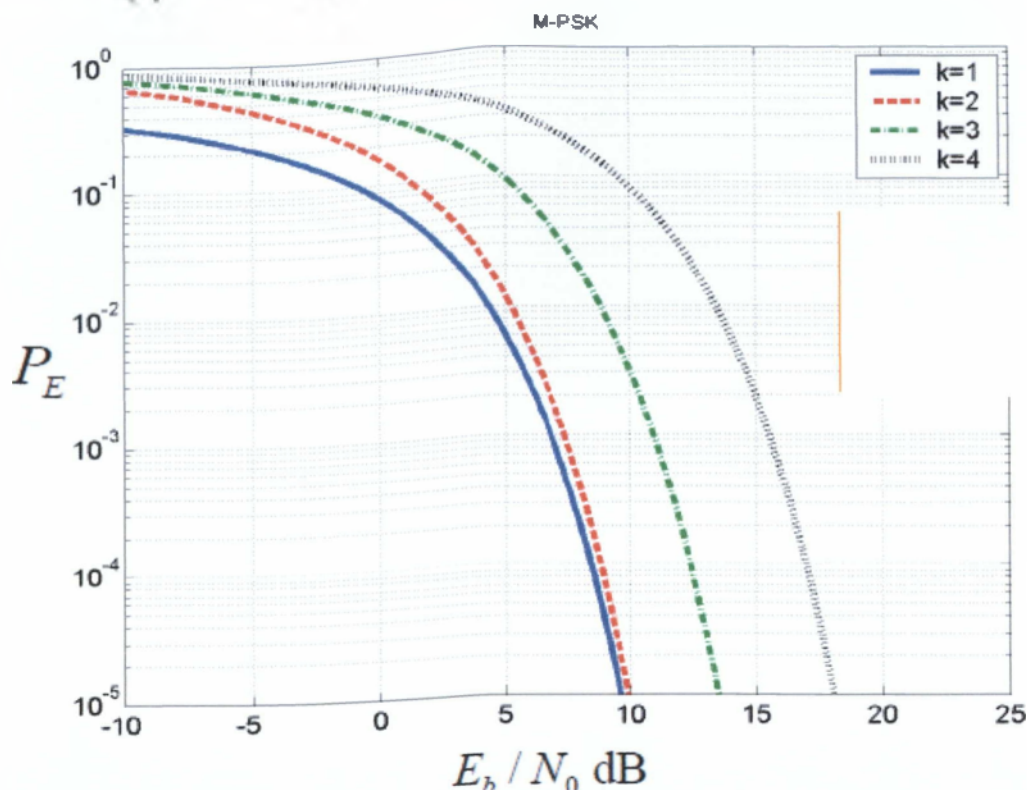
Η φασματική απόδοση των διαμορφώσεων M-PSK αυξάνεται με την αύξηση των ομαδοποιημένων bit ανά σύμβολο m (συνεπώς και με τον αριθμό των συμβόλων M) και δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{R}{W} = \log_2 M \text{ (Mbits / sec / Hz)} \quad (2.17)$$

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων και εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης M-PSK.

Η σχέση η οποία δίνει το ρυθμό λήψης εσφαλμένων συμβόλων P_s συναρτήσει του λόγου E_b/N_0 για τις διαμορφώσεις M-PSK είναι η ακόλουθη[9] (Σχ.38):

$$P_s = \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\log_2 M \cdot \frac{E_b}{N_0} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right)} \right) \quad (2.18)$$



Σχήμα 38: Γραφική παράσταση της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bit ως συνάρτηση του λόγου E_b/N_0 και του αριθμού M των χρησιμοποιούμενων συμβόλων για τις διαμορφώσεις M-PSK.

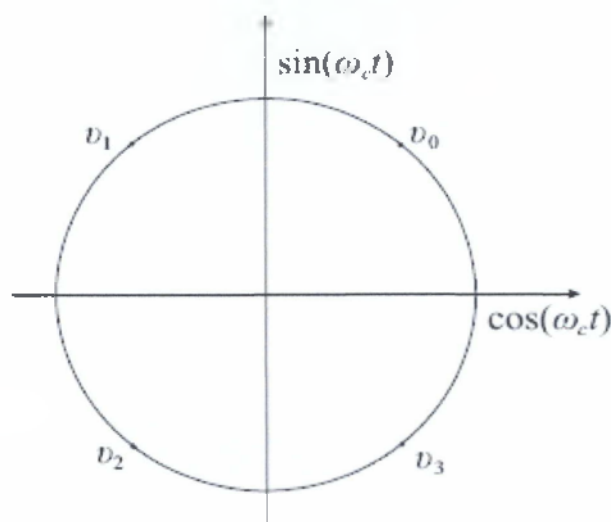
Η πιθανότητα εμφάνισης εσφαλμένων bit (P_B) θεωρώντας και πάλι κωδικοποίηση Gray, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_B = \frac{P_s}{\log_2 M} \quad (2.19)$$

2.2.3.1 Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, 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 Σχ.39, οι καταστάσεις φάσεων είναι στραμμένες κατά 45° ως προς τους δύο άξονες $\cos \omega_c t$ και $\sin \omega_c t$.

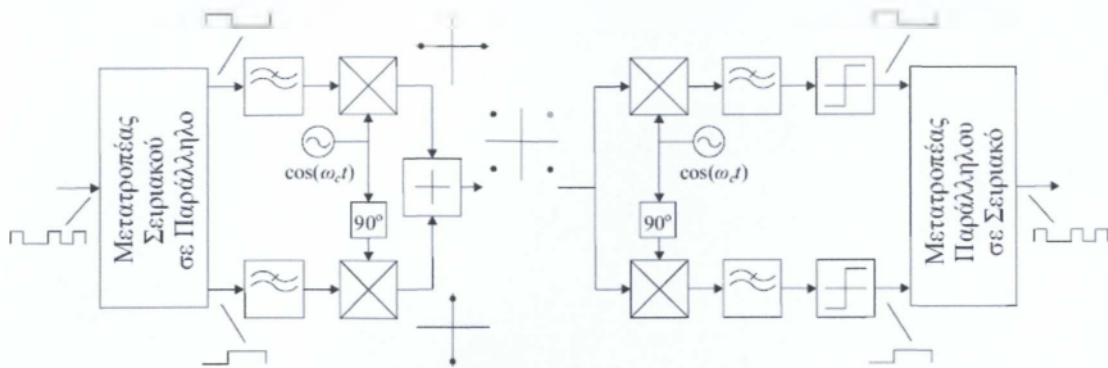


Σχ.39:Διάγραμμα διαμόρφωσης QPSK.

Η Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό χρησιμοποιείται σε 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX), 3G (WCDMA/HSDPA), (WiMAX) και σε 3G (WCDMA/HSDPA) ασύρματες τεχνολογίες. Επίσης η QPSK είναι μία από τις πιο δημοφιλείς ψηφιακές τεχνικές διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και την αποστολή δεδομένων μέσω καλωδιακών δικτύων.

Πομπός και Δέκτης

Το σύστημα του διαμορφωτή-αποδιαμορφωτή της QPSK αποτελείται στην πραγματικότητα από δύο συστήματα διαμόρφωσης BPSK που χρησιμοποιούν ορθογωνικά φέροντα. Το σχηματικό του διάγραμμα φαίνεται στο Σχ.40.



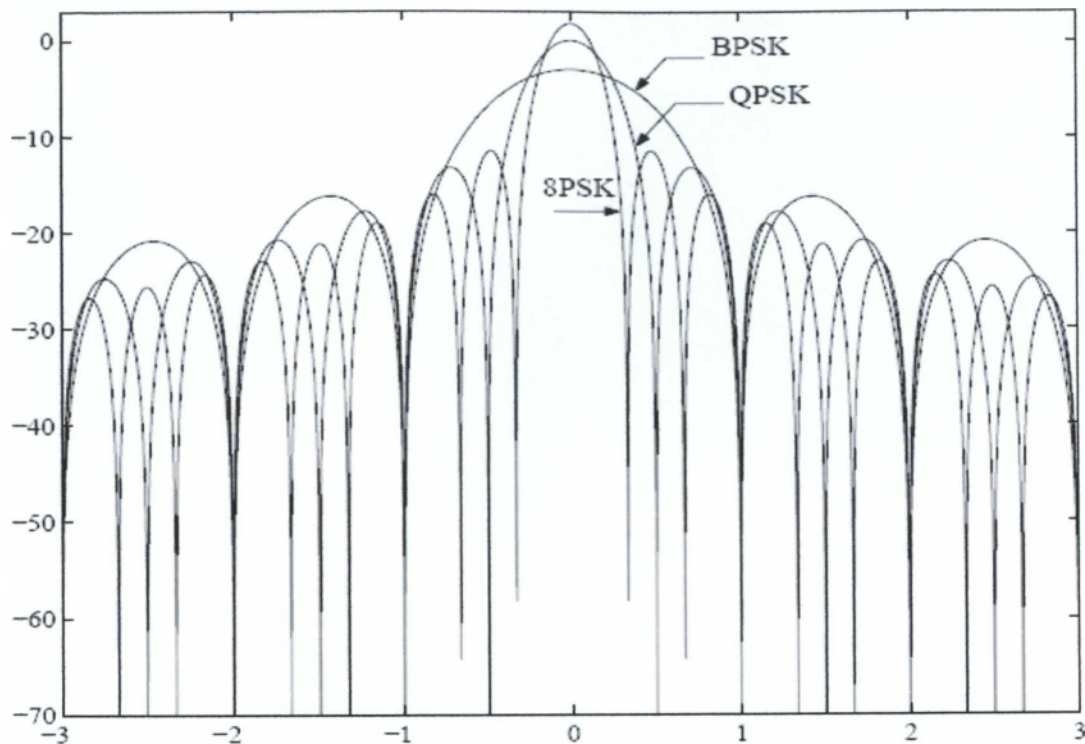
Σχήμα 40: Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή - αποδιαμορφωτή QPSK.

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 ($\sin \omega_c t$ και $\cos \omega_c t$), 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.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος QPSK

Η φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος QPSK δίνεται από την παρακάτω σχέση (Σχ.41):

$$P(f) = E_b \cdot \left\{ \left[\frac{\sin 2\pi(f - f_c)T_b}{2\pi(f - f_c)T_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin 2\pi(f + f_c)T_b}{2\pi(f + f_c)T_b} \right]^2 \right\} \quad (2.20)$$



Σχήμα 41: Η γραφική παράσταση της κανονικοποιημένης φασματικής πυκνότητας ισχύος ως προς την κανονικοποιημένη συχνότητα fT_b .

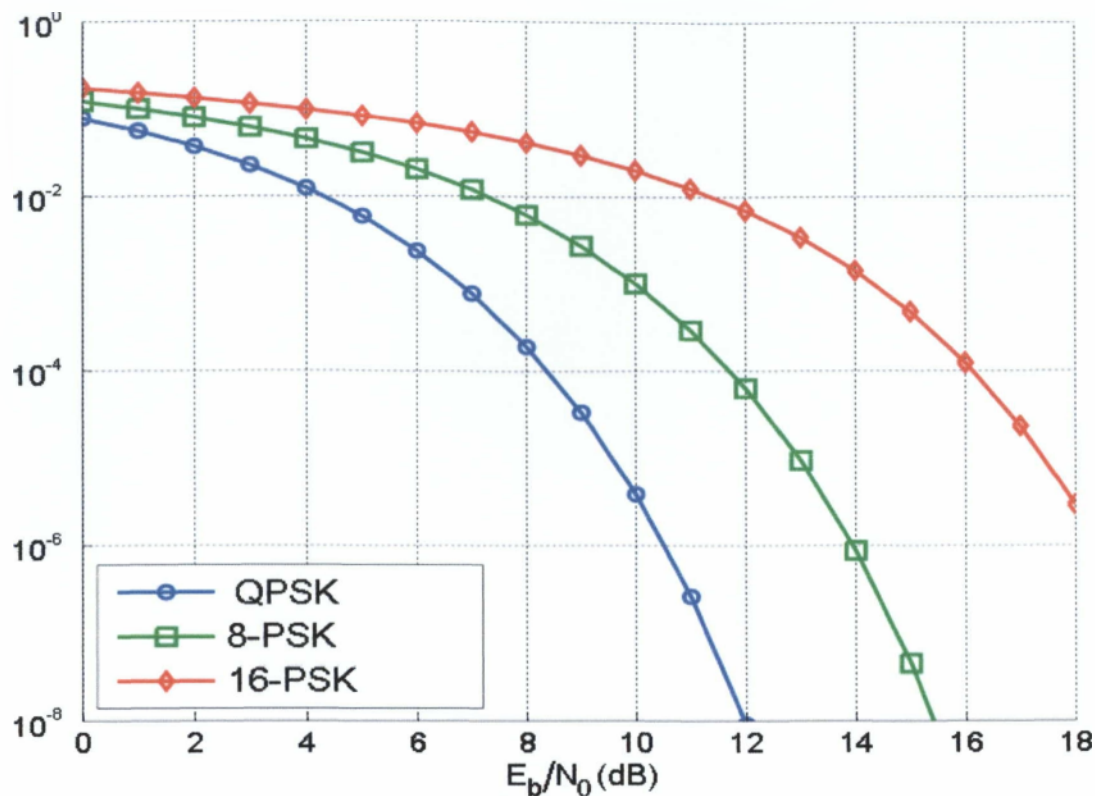
Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωσης QPSK

Ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων της QPSK δίνεται από τη σχέση:

$$P_s = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \quad (2.21)$$

Επιπλέον, ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit δίνεται από τη σχέση:

$$P_s = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.22)$$



Σχήμα 42: Γραφική παράσταση της πιθανότητας εμφάνισης εσφαλμένων bit ως συνάρτηση του λόγου E_b/N_0 για τη διαμόρφωση QPSK.

2.2.4 Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM)

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, αποκαλείται M-αδική σηματοδότηση QAM (Quadrature Amplitude Modulation). Η διαμόρφωση QAM χρησιμοποιείται στα καλωδιακά modems, στα V.34 modems καθώς και στις τεχνολογίες ADSL και VDSL. Επίσης η QAM χρησιμοποιείται από high-speed ενσύρματα modems. Ακόμα η διαμόρφωση QAM χρησιμοποιείται στο DVB-T δηλαδή στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση.

Στην ουσία το DVB-T είναι μια εφαρμογή της ψηφιακής τεχνολογίας που παρέχει μεγαλύτερο αριθμό καναλιών και/ή καλύτερη ποιότητα εικόνας και ήχου (AC3, Dolby ψηφιακό) μέσω μιας συμβατικής κεραίας αντί μιας δορυφορικής σύνδεσης και αποτελεί τη νέα τεχνολογία μετάδοσης σήματος που πρόκειται να αντικαταστήσει την παραδοσιακή αναλογική που ξέραμε μέχρι σήμερα. Πρέπει να παρατηρήσουμε όμως ότι οι περισσότεροι δέκτες τηλεόρασης που είναι συμβατοί με QAM λειτουργούν μόνο με μη κρυπτογραφημένα κανάλια. Η διαμόρφωση αυτή πρέπει να πούμε ότι χρησιμοποιείται από το πρωτόκολλο IEEE 802.11. Το πρωτόκολλο IEEE 802.11 είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN).

Η μαθηματική παράσταση του μεταδιδόμενου συμβόλου στη διαμόρφωση QAM είναι η εξής:

$$u(t) = A_i \cos(\omega_c t) + B_i \sin(\omega_c t) = R_i \cos(\omega_c t + \varphi) \quad \text{με } i=1,2,3,\dots,M \quad (2.23)$$

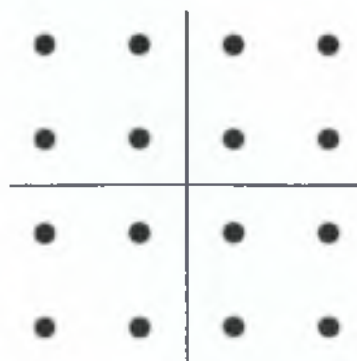
οπου

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{B_i}{A_i} \right) \quad \text{με } i=1,2,3,\dots,M \quad (2.24)$$

Και

$$R_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad \text{με } i=1,2,3,\dots,M \quad (2.25)$$

Οι συντελεστές A_i και B_i σχετίζονται με τα μεταδιδόμενα ψηφιακά δεδομένα και όπως είναι φανερό καθορίζουν το πλάτος και τη φάση του διαμορφωμένου σήματος. Το διάγραμμα αστερισμού της διαμόρφωσης 16-QAM παρουσιάζεται στο Σχ.43.



Σχήμα 43: Διάγραμμα της διαμόρφωσης 16-QAM.

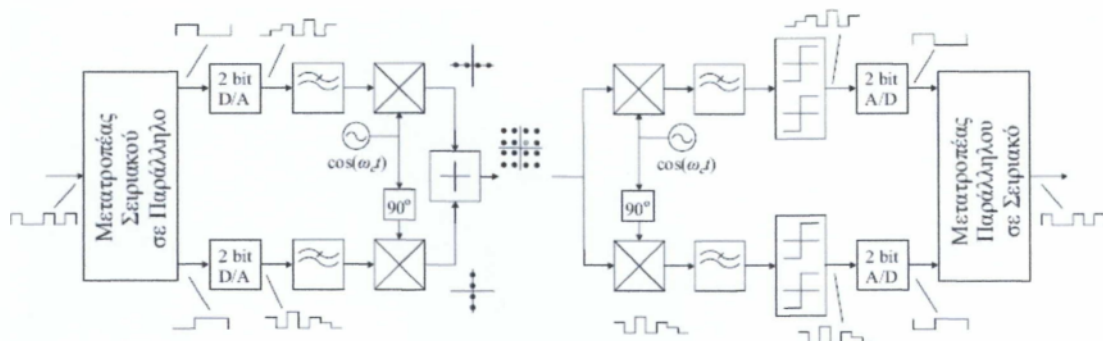
Πομπός και Δέκτης

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 90°) 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.

Ανίχνευση

Η μέθοδος διαμόρφωσης QAM μπορεί να αποκωδικοποιηθεί χρησιμοποιώντας σύμφωνη ή διαφορεικά 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-ιστής 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 44: Σχηματικό διάγραμμα ενός διαμορφωτή – αποδιαμορφωτή 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.

Φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος M-QAM

Η φασματική πυκνότητα ισχύος των διαμορφώσεων QAM δίνεται από τη σχέση :

$$P(f) = \frac{E_s}{2} \cdot \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)T_s}{\pi(f - f_c)T_s} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)T_s}{\pi(f + f_c)T_s} \right]^2 \right\} \quad (2.26)$$

Όπου $E_s = m \cdot E_b$ και $T_s = m \cdot T_b$

Άρα η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P(f) = \frac{mE_b}{2} \cdot \left\{ \left[\frac{\sin \pi(f - f_c)mT_b}{\pi(f - f_c)mT_b} \right]^2 + \left[\frac{\sin \pi(f + f_c)mT_b}{\pi(f + f_c)mT_b} \right]^2 \right\} \quad (2.27)$$

Η φασματική απόδοση των διαμορφώσεων M-QAM αυξάνεται με την αύξηση των ομαδοποιημένων bit ανά σύμβολο m και δίνεται από την ίδια σχέση :

$$Q = \frac{R}{W} = \log_2 M \text{ (Mbits / sec / Hz)} \quad (2.28)$$

Ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit της διαμόρφωση M-QAM

Η σχέση που ορίζει το ρυθμό λήψης εσφαλμένων συμβόλων P_s συναρτήσει του λόγου E_b / N_0 για τις διαμορφώσεις M-QAM είναι[4]:

$$P_s = 1 - (1 - P_m)^2 \quad (2.29)$$

Όπου

$$P_m = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot \log_2 M}{2 \cdot (M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (2.30)$$

Στην περίπτωση που ο αριθμός m των bit ανά σύμβολο (όπου $2^m = M$) είναι άρτιος. Ένα άνω όριο της πιθανότητας συμβόλου για κάθε m , άρτιο ή περιττό, δίνεται από τη σχέση[4]:

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

2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

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

Η M-ASK εμφανίζει τη χειρότερη επίδοση εξαιτίας της μη σταθερής περιβάλλουσας (πλάτους) και επομένως δεν είναι τόσο ανεκτική στις μεταβολές πλάτους που συμβαίνουν στο κανάλι λόγω θορύβου, όσο τα σχήματα που δε μεταφέρουν πληροφορία στο πλάτος, όπως είναι η M-FSK και η M-PSK. Η MASK δεν είναι τόσο πρακτική, διότι έχει σχετικά χαμηλή BER επίδοση και επιπλέον έχει μια απαίτηση για γραμμικότητα στην επεξεργασία του πομποδέκτη.

B) Διαμόρφωση συχνότητας πολλαπλών επιπέδων FSK (M-ary Frequency Shift Keying, M-FSK).

Χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης αυτής είναι ότι για καθορισμένο ρυθμό bit R_b , όταν αυξάνεται το M αυξάνεται και το απαιτούμενο εύρος ζώνης κατά $M / (2 \log_2 M)$ αλλά μειώνεται η πιθανότητα SER. Με λίγα λόγια η αύξηση του M μειώνει την απόδοση εύρους ζώνης, αλλά αυξάνει την απόδοση ισχύος δηλαδή τα ακριβώς αντίθετα από τη QAM και την M-PSK.

Η αποδιαμόρφωση και ανάκτηση της πληροφορίας από ένα σήμα M-FSK στηρίζεται στην ανίχνευση των μεταβολών συχνότητας μεταξύ των διαφόρων συμβόλων και έτσι δεν απαιτείται η ακριβής γνώση της συχνότητας. Επομένως, η M-FSK δεν επηρεάζεται τόσο από τα σφάλματα συχνότητας λόγω του τοπικού ταλαντωτή. Η M-FSK είναι καλή για αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε παρουσία υψηλού επιπέδου θορύβου.

Γ) Διαμόρφωση Φάσης πολλαπλών επιπέδων PSK (M-ary Phase Shift Keying, M-PSK)

Η διαμόρφωση M-PSK εμφανίζει την καλύτερη απόδοση. Αυτή είναι η πιο ανεκτική από όλες στο ρυθμό εμφάνισης εσφαλμένων συμβόλων, γιατί θα πρέπει να εμφανιστεί εξαιρετικά μεγάλη παραμόρφωση για να παρουσιαστεί λάθος αποκωδικοποίηση bit. Χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης αυτής είναι ότι για καθορισμένο ρυθμό bit R_b , όταν αυξάνεται το M μειώνεται το απαιτούμενο εύρος ζώνης, αλλά αυξάνεται η πιθανότητα SER. Με λίγα λόγια η αύξηση του M αυξάνει την απόδοση εύρους ζώνης και μειώνει την απόδοση ισχύος.

Δ) Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάση με Ορθογωνισμό (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)

Η QPSK είναι η σύνθεση δύο σημάτων BPSK με ορθογωνικά φέροντα, τα οποία δεν επηρεάζουν το ένα το άλλο. Επομένως μπορούμε με την QPSK να στείλουμε πληροφορία με διπλάσιο ρυθμό από αυτόν της M-PSK, χωρίς να αυξηθεί η πιθανότητα να εμφανιστούν λάθος αποκωδικοποιημένα bit στην έξοδο του δέκτη. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην QPSK, σε σχέση με την M-PSK, είναι ότι δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη ανοχή στη μεταβολή φάσης του φέροντος. Απαιτείται δηλαδή, το φέρον αναφοράς στο δέκτη να είναι σχεδόν απόλυτα σύμφωνο με το διαμορφωμένο QPSK εισερχόμενο RF σήμα και επίσης η φάση μπορεί να αλλάξει κατά 180° δημιουργώντας αυξομειώσεις στη περιβάλλουσα. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η QPSK έχει μεγαλύτερη φασματική απόδοση από την M-PSK και από την M-FSK.

Ε) Συνδυασμένη Ψηφιακή Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης (QAM)

Ένα κοινό χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης αυτής το οποίο έχει και η M-PSK είναι ότι για καθορισμένο ρυθμό bit R_b , όταν αυξάνεται το M μειώνεται το απαιτούμενο εύρος ζώνης αλλά αυξάνεται η πιθανότητα SER. Με λίγα λόγια η αύξηση του M αυξάνει την απόδοση εύρους ζώνης και μειώνει την απόδοση ισχύος. Πρέπει να προσέξουμε όμως ότι το QAM είναι προτιμότερο του M-PSK για αστερισμούς πολλών σημείων.

Πίνακας 1. Σύγκριση των διαφόρων διαμορφώσεων ως προς την αποτελεσματικότητα

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	
Διαμόρφωση	Αποτελεσματικότητα
M-ASK	0.5
M-PSK	0.5
M-FSK	<0.4
QPSK	2
M-QAM	4

Πίνακας 2. Σύγκριση των διαφόρων διαμορφώσεων ως προς το E_b/N_0

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ					
Ο απαραίτητος λόγος E_b / N_0 για το ίδιο BER (σε dB)					
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ	2	4	8	16	32
M-ASK	10	14	18		
M-PSK	10	10	14	18	
M-FSK	12	10	8	7	5.8
M-QAM		10		13	18

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. ΤΡΑΓΑΝΙΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ, «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΩΠΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ», ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (2008).
- [2]. WILLIAM STALLINGS, «ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ», ΕΚΤΗ ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ 2008.
- [3]. ΚΑΡΑΙΣΚΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, «ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ», ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΩΣ, ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ (2008).
- [4]. CATHARINA LOGOTHETIS, “DIGITAL COMMUNICATIONS I: MODULATION AND CODING COURSE”, UPSALLA UNIVERSITY, SIGNAL AND SYSTEM (2008).
- [5]. ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΣΤΡΙΒΑ, «ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ», ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (2007).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μία εκτενής παρουσίαση των συνηθέστερων ψηφιακών διαμορφώσεων που χρησιμοποιούνται στην πράξη, με έμφαση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, που τις καθιστούν περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλες για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Κατά το σχεδιασμό ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η φασματική αποτελεσματικότητα, η ανοχή στο θόρυβο, και ο ρυθμός εμφάνισης εσφαλμένων bit.

Η επιλογή της βέλτιστης λύσης που εξασφαλίζει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κάτω από ένα μέγιστο επιτρεπόμενο ρυθμό σφαλμάτων, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον παράγοντες, όπως η αντοχή στις παρεμβολές δηλαδή στη διάχυση του φάσματος, αλλά και στην αποτελεσματικότητα ισχύος.

Συνοψίζοντας θα μπορούσαμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα ώστε να επιλέξουμε τη καλύτερη δυνατή ψηφιακή διαμόρφωση για το τηλεπικοινωνιακό σύστημά μας. Σε περίπτωση που το εύρος ζώνης παίζει τον πρωταρχικό ρόλο σε ένα σύστημα τότε η καλύτερη επιλογή είναι η QPSK, ενώ η M-FSK είναι η χειρότερη. Αν όμως η μικρή κατανάλωση ισχύος είναι πρωτεύουσας σημασίας τότε το ασύμφωνο M-FSK έχει την καλύτερη απόδοση και τελευταία είναι η διαμόρφωση M-ASK. Και τέλος αν το βασικό κριτήριο είναι η πολυπλοκότητα τότε τα ασύμφωνα συστήματα είναι προτιμότερα από τα σύμφωνα.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών όσον αφορά στη κατανόηση των διάφορων ψηφιακών διαμορφώσεων και την επιλογή της κατάλληλης ψηφιακής διαμόρφωσης ώστε το τηλεπικοινωνιακό σύστημα μας να δουλέψει σωστά και χωρίς προβλήματα.