

ΤΕΙ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΚΩΔΙΚΩΝ ΤΟΥΡΜΠΟ (TURBO CODES)
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΝΙΚΗΤΟΠΟΥΛΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ, ΑΜ: 2005036

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΠΟΖΑΝΤΖΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Σπάρτη, 2015

Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας την υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στη Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του τίτλου σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι εργασία αυτή η τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

ΝΙΚΟΛΕΤΑ ΝΙΚΗΤΟΠΟΥΛΟΥ

05/10/2015

Ευχαριστίες

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. **Βασίλειο Μποζαντζή** για την ουσιαστική υποστήριξη και την πολύτιμη καθοδήγησή του. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Τμήματος για τις ακαδημαϊκές γνώσεις και κατευθύνσεις που μου έδωσαν.

Τέλος, οφείλω να αφιερώσω την πτυχιακή μου εργασία στην οικογένεια μου, για την αμέριστη συμπαράστασή που μου παρείχε σε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου στο Τ.Ε.Ι. Πελοποννήσου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανάγκες για την βελτιστοποίηση της επικοινωνίας ανεξαρτήτου αποστάσεως πάνω σε ολόκληρο τον πλανήτη και όχι μόνο, γνωρίζουμε ότι είναι ολοένα και μεγαλύτερες. Γι' αυτό και οι τηλεπικοινωνίες μέσω δορυφόρων τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιάσει τεράστια και αλματώδη εξέλιξη.

Με αφορμή τα παραπάνω λοιπόν, πραγματοποιείται η παρούσα πτυχιακή εργασία η οποία έχει σκοπό τη μελέτη των κωδικών τούρμπο (turbo codes) σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών.

Αρχικά, παρουσιάζουμε μία ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των δορυφορικών επικοινωνιών. Αναλύουμε τα όσα πρέπει να γνωρίζουμε για τα δορυφορικά συστήματα και την κωδικοποίηση καναλιού.

Έπειτα, πραγματοποιείται προσομοίωση ενός δορυφορικού συστήματος που χρησιμοποιεί τούρμπο κώδικες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ένα πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN, ένα πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician και τέλος από ένα πείραμα μετάδοσης κωδικοποιημένης πληροφορίας με την χρήση Turbo codes πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ	10
1.1.1 Πλεονεκτήματα γεωστατικής τροχιάς	14
1.1.2 Μειονεκτήματα γεωστατικών δορυφόρων	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ	18
2.1 Δομή δορυφορικών συστημάτων	18
2.2 Κωδικοποίηση καναλιού	28
2.2.1 Αλγόριθμος Huffman.....	31
2.2.2 Κώδικας Lempel-Ziv	33
2.2.3 Γραμμικοί κώδικες.....	34
2.2.4 Κυκλικοί κώδικες.....	35
2.2.5 Συγκεραστικοί (ή Συνελκτικοί) κώδικες	35
2.2.6 Τούρμπο κώδικες	36
2.3 Ψηφιακή διαμόρφωση.....	36
2.4 Κανάλι RCIAN	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	44
3.1 Γενικά.....	44

3.2	Block κώδικες	48
3.3	Γραμμικοί κώδικες	50
3.4	Κυκλικοί κώδικες	55
3.5	Συνελικτικοί κώδικες	57
3.5.1	Διάγραμμα μετάπτωσης καταστάσεων	58
3.5.2	Δεντρικό διάγραμμα	60
3.5.3	Διάγραμμα δικτύωματος	61
3.5.4	Αλγόριθμος Viterbi	66
3.5.5	Αλγόριθμος stack η ZJ	67
3.5.6	Αλγόριθμος Fano	67
3.5.7	Αλγόριθμος M	68
3.6	Τούρμπο κώδικες	68
3.6.1	Κωδικοποιητής turbo	69
3.6.2	Αποκωδικοποιητής turbo	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΤΟΥΡΜΠΟ ΚΩΔΙΚΕΣ		76
4.1	Γενικές Πληροφορίες	77
4.2	Υποσυστήματα Ψηφιακού Συστήματος	79
4.2.1	Turbo Κώδικες	79
4.2.1.1	Κωδικοποιητής Turbo Κωδίκων	79
4.2.1.2	Αναδρομικοί Συστηματικοί Συνελικτικοί Κώδικες	80
4.2.1.3	Interleaver	81
4.2.1.4	Αποκωδικοποιητής Turbo Codes	81
4.2.2	Ψηφική Διαμόρφωση / Αποδιαμόρφωση	82
4.2.2.1	Ψηφιακός Διαμορφωτής	82
4.2.2.2	Ψηφιακός Αποδιαμορφωτής	83

4.2.3	Διάυλος	83
4.2.3.1	Λευκός Θόρυβος (AWGN)	83
4.2.3.2	Διάλειψη Rician.....	84
4.3	ΣΥΣΤΗΜΑ & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	84
4.3.1	Ψηφιακή πηγή (digital source).....	85
4.3.2	Turbo Code Κωδικοποιητής και Αποκωδικοποιητής	85
4.3.3	Ψηφιακή Διαμόρφωση και Αποδιαμόρφωση	87
4.3.4	Διάυλος	87
4.3.4.1	Λευκός Θόρυβος.....	87
4.3.4.2	Διάλειψη Rician.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ		90
5.1	Πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN	90
5.2	Πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician	91
5.2.1	Συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος.....	92
5.2.2	Μέγιστη μεταβολή συχνότητας Doppler	92
5.2.3	Παράγοντας K για το κανάλι με φαινόμενο Rician.....	93
5.2.4	Αριθμός διαφορετικών μονοπατιών για την μετάδοση της πληροφορίας	94
5.3	Πείραμα μετάδοσης κωδικοποιημένης πληροφορίας με την χρήση Turbo codes πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician.....	95
5.3.1	Δομή Turbo κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών	96
5.3.2	Αριθμός επαναλήψεων κωδικοποίησης.....	96
5.4	Συμπεράσματα	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		99

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Ζεύγη συχνοτήτων.....	23
Εικόνα 2.2: Κωδικοποίηση πηγής Huffman σε δυαδικό σύστημα αρίθμησης.....	32
Εικόνα 4.1: Γενική μορφή ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος.....	77
Εικόνα 4.2: Γενική μορφή Turbo Code κωδικοποιητή με δύο ίδιους κωδικοποιητές και χρήση αναδιάταξης της πληροφορίας.....	80
Εικόνα 4.3: Παράδειγμα αναδρομικού συνελκτικού κωδικοποιητή	81
Εικόνα 4.4: Παράδειγμα Turbo Codes κωδικοποιητή (MATLAB)	86
Εικόνα 5.1: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN και BPSK διαμόρφωση.....	91
Εικόνα 5.2: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με σήματα διαφορετικών συχνοτήτων πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician.....	92
Εικόνα 5.3: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική τιμή αλλαγής της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician.....	93
Εικόνα 5.4: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετικές τιμές για τον παράγοντα K του φαινομένου Rician πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician	94
Εικόνα 5.5: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετικό αριθμό μονοπατιών για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician	95
Εικόνα 5.6: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική δομή των Turbo κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician	96
Εικόνα 5.7: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική αριθμό επαναλήψεων κατά την αποκωδικοποίηση με χρήση Turbo codes για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician.....	97

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Δορυφορικό σύστημα.....	18
Σχήμα 2.2: Δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα.....	20
Σχήμα 2.3: Βασικές βαθμίδες του συστήματος των δορυφορικών επικοινωνιών.....	20
Σχήμα 2.4: Επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.....	23
Σχήμα 2.5: Διαμόρφωση σήματος.....	37
Σχήμα 2.6: Μετάδοση πολλών σημάτων στον ίδιο χώρο.....	37
Σχήμα 2.7: Μεταλλαγή Μετατόπισης Πλάτους- Amplitude Shift Keying (ASK).....	39
Σχήμα 2.8: Μεταλλαγή Μετατόπισης Συχνότητας- Frequency Shift Keying (FSK) ..	39
Σχήμα 2.9: Μεταλλαγή Μετατόπισης Φάσης - Phase Shift Keying (PSK).....	40
Σχήμα 2.10: Αλλαγή φάσης σε σχέση με την πληροφορία.....	41
Σχήμα 2.11: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Rician.....	43
Σχήμα 3.1: Διαδικασίες κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης.....	45
Σχήμα 3.2: Γενικό ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα.....	45
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα μετάπτωσης καταστάσεων.....	59
Σχήμα 3.4: Δεντρικό διάγραμμα.....	61
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα δικτύματος.....	62
Σχήμα 3.6: Κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση στους συνελκτικούς κώδικες ...	63
Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση του συνελκτικού κώδικα.....	64
Σχήμα 3.8: Κωδικοποιητής RSC.....	70
Σχήμα 3.9: Απλοποιημένο σχήμα Κωδικοποιητή turbo.....	71
Σχήμα 3.10: Κωδικοποιητής τούρμπο με την παράλληλη αλληλουχία δύο RSC κωδικοποιητών.....	74
Σχήμα 3.11: Αποκωδικοποίηση turbo.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ

Ζούμε στην εποχή της συνδεσιμότητας. Όλοι θέλουμε να μπορούμε να επικοινωνούμε με τους συνανθρώπους μας με όλους τους δυνατούς τρόπους ανεξάρτητα από το σημείο στο οποίο βρισκόμαστε.

Η σύνδεση με τους συνανθρώπους μας θέλουμε να είναι είτε για να επικοινωνήσουμε μαζί τους παραδείγματος χάριν αν συγγενικά ή φιλικά μας πρόσωπα βρίσκονται μακριά μας ή για επαγγελματικούς λόγους που με την υπάρχουσα τεχνολογία μας επιτρέπουν να δουλεύουμε ακόμα και εξ αποστάσεως είτε για λόγους ανάγκης και ασφάλειας όπως για παρακολούθηση κινήσεων σε έναν χώρο, αναζήτηση του ίχνους κάποιου ατόμου που βρίσκεται σε κατάσταση ανάγκης σε μία περιοχή ή εντοπισμένος της ακριβούς μας θέσης.

Ολοένα και μεγαλύτερες είναι οι ανάγκες για την βελτιστοποίηση της επικοινωνίας ανεξαρτήτου αποστάσεως πάνω σε ολόκληρο τον πλανήτη και όχι μόνο.

Για αυτό τον λόγο οι τηλεπικοινωνίες μέσω δορυφόρων τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιάσει τεράστια και αλματώδη εξέλιξη. Οι επικοινωνίες μέσω δορυφόρων χρησιμοποιούνται κυρίως για τη σύνδεση σημείων που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις και σημείων που η απόσταση τους δεν είναι πολύ μεγάλη, αλλά υπάρχουν διάφορα εμπόδια μεταξύ τους όπως ζούγκλες, έρημοι κλπ, που κάνουν εξαιρετικά δύσκολη τη σύνδεσή τους με επίγεια μέσα.

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζουμε μία ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των δορυφορικών επικοινωνιών.

Το 1960 έκαναν την εμφάνισή τους οι πρώτοι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι. Οι πρώτοι αυτοί δορυφόροι ήταν παθητικοί, αποτελούνταν δηλαδή από μεγάλα μπαλόνια χωρίς ηλεκτρονικές διατάξεις που ανακλούσαν στην επιφάνειά τους τα σήματα που προέρχονταν από ισχυρούς επίγειους σταθμούς. Παραδείγματα τέτοιων δορυφόρων είναι οι ΗΧΩ (ECHO 1 και 2). Οι ΗΧΩ ήταν πειραματικοί.

Ο Telstar εκτοξεύθηκε το 1962. Ήταν ένας ενεργός δορυφόρος, χρησιμοποιήθηκε για τη μετάδοση προγράμματος τηλεόρασης και δηλαδή έφερε ηλεκτρονικές διατάξεις που ενίσχυαν το σήμα που λάμβανε από το έδαφος.

Στις 6 Απριλίου 1965 εκτοξεύθηκε πάνω από τον Ατλαντικό ωκεανό ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος του διεθνούς οργανισμού δορυφορικών τηλεπικοινωνιών INTELSAT που ιδρύθηκε το 1964. Ο δορυφόρος αυτός ήταν ενεργός και είχε τη δυνατότητα να μεταβιβάζει 240 τηλεφωνικά κυκλώματα και πρόγραμμα τηλεόρασης. Η εκμετάλλευσή του άρχισε στις 28 Ιουνίου 1965 και ονομάστηκε INTELSAT 1. Από τότε ο οργανισμός INTELSAT χρησιμοποίησε πολλές σειρές δορυφόρων που η χωρητικότητά τους αυξάνονταν συνεχώς. Οι δορυφόροι της σειράς 5 έχουν χωρητικότητα 12000 τηλεφωνικών κυκλωμάτων και δύο κανάλια τηλεόρασης. Αυτό το νέο είδος επικοινωνίας αναπτύχθηκε πολύ γρήγορα χάρη στα τεχνικά και οικονομικά του πλεονεκτήματα. Σήμερα μετέχουν στο διεθνές σύστημα INTELSAT οι περισσότερες χώρες του κόσμου.

Εκτός από την επικοινωνία μεταξύ σταθερών σημείων ξηράς άρχισε η χρησιμοποίηση των δορυφορικών ζεύξεων και για την επικοινωνία με τα πλοία με την εγκατάσταση στα πλοία σταθμών με κεραιές μικρής διαμέτρου (Πετσέλης, 2013).

Εκτός από τις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών παγκοσμίως για επικοινωνίες, στην άνθηση και στην εξέλιξη των δορυφορικών επικοινωνιών σημαντικό ρόλο έπαιξε και ο αυξημένος ανταγωνισμός.

Η επιστήμη των τηλεπικοινωνιών έχει να αντιμετωπίσει την πρόκληση της αύξησης της ταχύτητας των παρεχόμενων υπηρεσιών με την ανάπτυξη δικτύων που θα εκμεταλλεύονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, τις καινοτομίες που αναπτύσσονται συνεχώς. Η κάλυψη μεγάλων περιοχών από τους δορυφόρους τους καθιστά βασικό στοιχείο των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Ακόμη παρακάμπτουν περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η οπτική επαφή μεταξύ δύο σημείων, δημιουργώντας κανάλια μεγάλης χωρητικότητας με δυνατότητα πολλαπλής εκπομπής και προσπέλασης ενώ παρουσιάζονται ως οικονομικότερες λύσεις σε ορισμένες περιπτώσεις. Η προκύπτουσα, λοιπόν, διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών δικτύων προσφέρει τη δυνατότητα παροχής μιας σειράς από εφαρμογές, όπως οι κινητές

τηλεπικοινωνίες, η εκπομπή τηλεόρασης και ραδιοφώνου, η δημιουργία συνδέσεων από άκρο σε άκρο για τους τελικούς χρήστες κ.α. Ως τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιών, οι δορυφορικές επικοινωνίες έρχονται και αυτές αντιμέτωπες με την πρόκληση της νέας τάσης στο χώρο αυτό, την ενοποίηση δηλαδή όλων των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών σε ένα κοινό δίκτυο και τις αυξημένες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που αυτή συνεπάγεται.

Το Διαδίκτυο (Internet) και η αλματώδης εξάπλωσή του, η διαρκής ανάγκη για συνεχούς πρόσβαση σε αυτό από οποιοδήποτε σημείο είτε ο χρήστης είναι σταθερός είτε κινείται, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ακόμα πολυπλοκότερων και πιο απαιτητικών εφαρμογών, γνωστών και ως εφαρμογών πολυμέσων (multimedia), δηλαδή υπηρεσιών που χειρίζονται πολλούς και διαφορετικούς τύπους μέσων και τους παρουσιάζουν στο χρήστη συγχρονισμένους.

Ένας δορυφόρος διαδραματίζει επιπλέον ρόλους πέραν του επαναλήπτη και μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός δικτύου υψηλής χωρητικότητας το οποίο θα έχει δυνατότητα πολλαπλής εκπομπής και προσπέλασης. Η απόδοση των δορυφορικών και των επίγειων κεραιών έχει βελτιωθεί λόγω της χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων, ενώ η διάρκεια ζωής των διαστημικών σταθμών έφτασε τα 12-15 έτη λόγω βελτίωσης των χρησιμοποιούμενων υλικών και των συναφών τεχνολογιών. Ακόμη, οι επίγειοι τερματικοί σταθμοί έχουν καταστεί 7 οικονομικότεροι και μικρότεροι σε μέγεθος επιτρέποντας στους χρήστες την απευθείας παροχή υπηρεσιών στο χώρο τους (Direct to Home).

Μια τεχνολογία ανταγωνιστική προς τη δορυφορική, είναι αυτή των οπτικών ινών. Αυτές έχουν το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου εύρους ζώνης και προτιμώνται ως λύση για ενσύρματα συστήματα που προσφέρουν τις υπηρεσίες κορμού, οδηγώντας έτσι σε ένα πυκνό επίγειο δίκτυο επικοινωνιών. Προς το παρόν, τα ομοαξονικά καλώδια και οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται τόσο στον συνδρομητικό βρόχο (access network) όσο και μεταξύ κέντρων σε αποστάσεις της τάξης των δεκάδων χιλιομέτρων. Ωστόσο, σε ζεύξεις μεταξύ κέντρων μεταγωγής και σε μεγαλύτερες αποστάσεις της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων, η χρησιμοποίηση δορυφορικών ζεύξεων γίνεται οικονομικά συμφέρουσα. Έτσι, η χρησιμοποίηση δορυφορικών ζεύξεων μεταξύ διεθνών κέντρων μεταγωγής αποτελεί συνήθη επιλογή. Η λύση που

επιλέχθηκε στα δορυφορικά συστήματα ως απάντηση στο περιορισμένο εύρος ζώνης ήταν η σταδιακή μετάβαση σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10GHz. Το αυξημένο κέρδος και η μεγαλύτερη κατευθυντικότητα των κεραιών σε αυτές τις συχνότητες οδήγησαν σε μείωση των διαστάσεων και κόστους των δορυφορικών δεκτών καθιστώντας τα δορυφορικά συστήματα ανταγωνιστικότερα στην αγορά. Από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τερματικών ευνοήθηκε η εξάπλωση των Τερματικών Πολύ Μικρού Ανοίγματος (Very Small Aperture Terminal, VSAT), δηλαδή μικρών επίγειων σταθμών που παρέχουν εύκολη και μειωμένου κόστους διασύνδεση μεμονωμένων χρηστών μέσω του δορυφορικού διαύλου. Με τη διασύνδεση VSAT είναι δυνατόν να παρακάμπτονται ολόκληρα δημόσια δίκτυα.

Επίσης τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά για να συμπληρώσουν και να ενισχύσουν την κάλυψη που παρέχουν τα υπόλοιπα επίγεια δίκτυα, κυρίως σε απομονωμένες περιοχές. Η ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας συνεχίζεται με βασικό άξονα την παροχή ποικίλων υπηρεσιών. Είναι λοιπόν σχεδόν σίγουρο ότι και στο προσεχές μέλλον οι δορυφόροι θα συνεχίσουν να κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις τηλεπικοινωνίες (Νομικός, 2013).

Σκεπτόμενοι την λειτουργία των δορυφόρων σίγουρα θα πρέπει να σκεφτούμε τις τροχιές πάνω στις οποίες μπορούν τα δορυφορικά συστήματα να κινηθούν.

Ένας δορυφόρος που χρησιμοποιείται ως τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος μπορεί να βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Γη, ως αποτέλεσμα της βαρυτικής έλξης που η Γη ασκεί σε αυτόν.

Ένας δορυφόρος ονομάζεται Γεωσύγχρονος (geosynchronous) όταν η ταχύτητα της τροχιάς του ισούται με την ταχύτητα περιστροφής της γης. Επομένως, η περίοδος περιστροφής του είναι ίση με την περίοδο περιστροφής της γης (δηλαδή ίση με $T \cong 23\text{h}, 56\text{min}, 4.1\text{sec}$). Η τροχιά στην οποία κινείται ένας τέτοιος δορυφόρος ονομάζεται γεωσύγχρονη. Μια κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά έχει ακτίνα περίπου ίση με 37786 km από την επιφάνεια της γης. Η ταχύτητα του δορυφόρου στην τροχιά αυτή προκύπτει 3075m/s.

Ωστόσο υπάρχει η ειδική περίπτωση που ένας γεωσύγχρονος δορυφόρος μπορεί να βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον ισημερινό. Τότε ο δορυφόρος ονομάζεται γεωστατικός (geostationary) δορυφόρος και η αντίστοιχη τροχιά γεωστατική (Geostatic Earth Orbit, GEO). Ένας γεωστατικός δορυφόρος φαίνεται να βρίσκεται σε σταθερή θέση ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή στη γη, δηλαδή διατηρεί την ίδια θέση σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Δηλαδή, ο δορυφόρος φαίνεται από τον επίγειο σταθμό ως ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Όμως οι γεωστατικοί δορυφόροι εμφανίζουν μια μικρή ολίσθηση κίνησης έτσι ώστε η τροχιά τους να παρουσιάζει μια μικρή κλίση $\theta_i \neq 0$. Για τον λόγο αυτό, η τροχιά του δορυφόρου διορθώνεται περιοδικά ώστε να παραμένει στο ισημερινό επίπεδο αλλά και για να παραμένει σταθερή ως προς την τροχιακή θέση (σε μοίρες) πάνω στο ισημερινό επίπεδο.

Μένοντας στην περίπτωση των γεωστατικών δορυφόρων θα αναλύσουμε κάποια από τα πλεονεκτήματα τους και κάποια από τα μειονεκτήματα τους.

1.1.1 Πλεονεκτήματα γεωστατικής τροχιάς

Η σκόπευση από τις επίγειες κεραίες προς το δορυφόρο είναι σταθερή. Επομένως, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την ανάγκη για ακριβό εξοπλισμό παρακολούθησης της κίνησης του δορυφόρου.

Ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος σε γεωστατική τροχιά καλύπτει περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας της γης (μέχρι γεωγραφικό πλάτος $+75^\circ$ ή -75°). Για να καταστεί λοιπόν δυνατή η παγκόσμια επικοινωνία, απαιτείται η τοποθέτηση μόλις τριών δορυφόρων σε αυτή την τροχιά.

Η ελαχιστοποίηση του φαινομένου ολίσθησης συχνότητας (Doppler) και η δυνατότητα πρόβλεψης της παρεμβολής από και προς άλλα συστήματα ραδιοσυχνότητων, λόγω της σταθερής τους γεωμετρίας.

1.1.2 Μειονεκτήματα γεωστατικών δορυφόρων

Η απόσβεση που εισάγεται στο δίαυλο και η καθυστέρηση διάδοσης που υφίσταται το σήμα εξαιτίας της τεράστιας απόστασης (περίπου 37000 km) είναι σημαντική και φτάνει τα 250 ms ανά απλή διαδρομή. Το πρώτο οδηγεί σε μείωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Το δεύτερο δυσχεραίνει τις εφαρμογές που εμφανίζουν ευαισθησία στην καθυστέρηση, ενώ κατά τη διεξαγωγή τηλεφωνικών κλήσεων εισάγει μια καθυστέρηση στον ήχο, η οποία είναι ενοχλητική για το χρήστη.

Ο ήλιος αποτελεί ισχυρή πηγή θορύβου, με ακόλουθη μείωση της ποιότητας επικοινωνίας, όταν βρίσκεται μέσα στο εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού. Τα μικρά αυτά χρονικά διαστήματα ελάττωσης της ποιότητας ζεύξεων είναι, ωστόσο, προβλέψιμα.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι παρουσιάζουν αβεβαιότητα της τάξης μερικών εκατοστών της μοίρας ως προς την ακριβή τους θέση το οποίο σημαίνει ότι η θέση του δορυφόρου προσδιορίζεται με αβεβαιότητα ± 40 km πάνω στην τροχιά του.

Λόγω της μεγάλης απόστασης οι γεωστατικοί δορυφόροι δεν ενδείκνυνται για χρήση σε εφαρμογές δορυφορικών κινητών επικοινωνιών.

Η εκτόξευση δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά συνεπάγεται υψηλό κόστος και κίνδυνο απώλειας του δορυφόρου (Νομικός, 2013).

Κλείνοντας την εισαγωγική ενότητα της εργασίας μας κάνουμε μία συνοπτική αναφορά στις απαιτήσεις των δορυφορικών επικοινωνιών αναφέροντας πολλά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους αλλά και κάποια εγγενή μειονεκτήματά τους.

Όπως προαναφέραμε η απαίτηση για μετάδοση ήχου εικόνας και βίντεο από τις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μέσω δικτύων γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις για εύρος ζώνης καναλιού.

Εκτός από την αύξηση του συνολικού αριθμού χρηστών, υπάρχει και η τεράστια ανάγκη παράλληλης εξυπηρέτησης πολλών χρηστών ταυτόχρονα. Έτσι γίνεται

απαραίτητη η περαιτέρω αύξηση του εύρους ζώνης λειτουργίας ενός συστήματος. Για να μπορέσουν οι δορυφορικές επικοινωνίες να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτών των συνθηκών, ακολούθησαν μια πολιτική σταδιακής αύξησης των συχνοτήτων λειτουργίας.

Οι πρώτοι δορυφόροι έκαναν χρήση της ζώνης C, αλλά στη συνέχεια έγινε στροφή προς τις ζώνες Ku (12/14GHz) και Ka (20/30GHz) κυρίως για τα δορυφορικά συστήματα εμπορικής χρήσης. Ταυτόχρονα η χρήση ζωνών συχνοτήτων υψηλότερων από τα 10GHz, όπως αυτές των 20/30GHz, έδωσε λύση στο οξύ πρόβλημα της συμφόρησης συχνοτήτων που ανέκυψε στις ζώνες L, S και C, που είναι πλέον κορεσμένες από τον μεγάλο αριθμό δορυφόρων που τις χρησιμοποιεί. Επίσης, δόθηκε λύση στο πρόβλημα των περιορισμένων διαθέσιμων θέσεων στη γεωστατική τροχιά, επί της οποίας έχει ήδη τοποθετηθεί μεγάλος αριθμός δορυφόρων.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η διαρκής αύξηση της ζήτησης για εύρος ζώνης είναι πιθανό να οδηγήσει τελικά στη χρήση συχνοτήτων άνω των 40/50GHz και γενικά σε συχνότητες EHF (Extremely High Frequencies).

Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση τόσο υψηλών συχνοτήτων έχουν να κάνουν κυρίως με την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για κάθε είδους εφαρμογή. Επίσης, η χρήση υψηλών συχνοτήτων καθιστά δυνατή τη χρήση κεραιών μεγαλύτερης κατευθυντικότητας και μικρότερου μεγέθους (μικρότερης διαμέτρου). Το γεγονός αυτό αυξάνει την εμπορική ανταγωνιστικότητα των δορυφορικών επικοινωνιών, καθώς οι μικρές και φθηνές κεραιές λήψης είναι ιδιαίτερα ελκυστικές για τους χρήστες.

Η μετάβαση, όμως, των δορυφορικών συστημάτων σε υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας συνοδεύεται από την εμφάνιση νέων περιορισμών. Η λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα απαιτεί την κατασκευή υψηλής ποιότητας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Έτσι, απαιτείται εξελιγμένος εξοπλισμός (π.χ. για RF ενισχυτές και ζωνοπερατά φίλτρα) για τη διαχείριση και μορφοποίηση των υψίσυχνων σημάτων. Ταυτόχρονα, η αύξηση του εύρους ζώνης έχει δυσμενή επίδραση αναφορικά με το σηματοθορυβικό λόγο του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, αφού η ισχύς του θερμικού θορύβου είναι ευθέως

ανάλογη του εύρους ζώνης. Επομένως, είναι αναγκαία η προσεκτική σχεδίαση του δορυφορικού συστήματος και τα ηλεκτρονικά αυτά συστήματα πρέπει να χαρακτηρίζονται από μικρή ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου.

Αναφορά πρέπει να γίνει στις Απώλειες Ελευθέρου Χώρου (Free Space Loss, FSL), οι οποίες εισάγουν το μεγαλύτερο μέρος της εξασθένησης του σήματος κατά τη διάδοσή του. Όπως είναι γνωστό, η εξασθένηση της ισχύος του σήματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας, επομένως οι υψηλές συχνότητες οδηγούν σε σημαντική υποβάθμιση του σήματος. Για συχνότητες λειτουργίας άνω των 10GHz ο καθοριστικότερος παράγοντας εξασθένησης, εκτός βέβαια των απωλειών ελευθέρου χώρου, είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Έτσι, κυρίως για συχνότητες λειτουργίας άνω των 10GHz γίνεται διάκριση της λειτουργίας της ζεύξης υπό συνθήκες “καθαρού ουρανού” (clear sky conditions) ή υπό συνθήκες διαλείψεων. Σημειώνεται ότι ο όρος «διαλείψεις» αναφέρεται στη χρονική μεταβολή του πλάτους του λαμβανομένου σήματος λόγω αντίστοιχων μεταβολών των συνθηκών διάδοσης στο διάυλο.

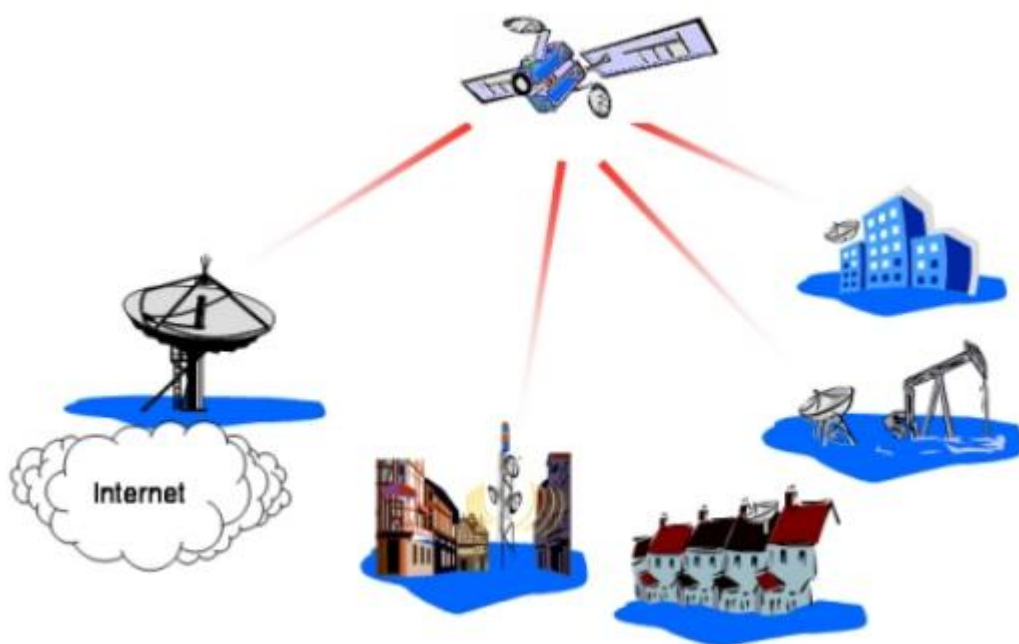
Γενικά, η ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί ένα δορυφορικό σύστημα διαδραματίζει βαρύνοντα ρόλο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καναλιού και έχει σημαντικές επιπτώσεις στο δορυφορικό σήμα κατά τη μετάδοσή του μέσω της ατμόσφαιρας. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη ζώνη λαμβάνουν χώρα διαφορετικά φαινόμενα διάδοσης, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία της σχεδίασης του συστήματος (Νομικός, 2013).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

2.1 Δομή δορυφορικών συστημάτων

Για τις ανάγκες που καλύπτουν οι δορυφόροι κάναμε αναφορά στην προηγούμενη ενότητα και είδαμε πως η κυριότερη ανάγκη για την χρησιμοποίησή τους είναι η δυνατότητα τους να παρέχουν κάλυψη σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Σε αυτή την ενότητα θα προσπαθήσουμε να ανακαλύψουμε τη δομή ενός δορυφορικού συστήματος.

Ένα δορυφορικό σύστημα ή μια δορυφορική σύνδεση αποτελείται από το δορυφόρο και τους σταθμούς εδάφους. Στο σχήμα που ακολουθεί μπορούμε να τα εντοπίσουμε.



Σχήμα 2.1: Δορυφορικό σύστημα

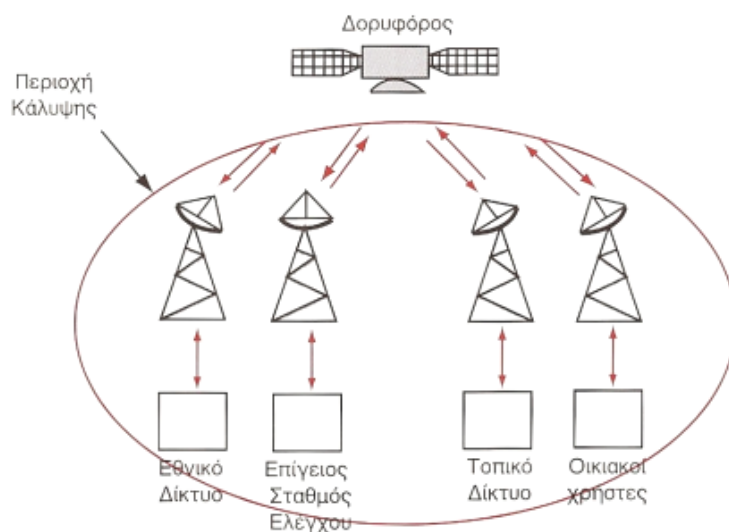
Από τεχνικής πλευράς, οι δορυφορικές ζεύξεις μοιάζουν με τις συνδέσεις των δικτύων μικροκυμάτων οπτικής επαφής όπου οι επίγειοι σταθμοί αντιστοιχούν με

τερματικούς σταθμούς και ο δορυφόρος με σταθμό αναμεταδόσεως (Πετσέλης, 2013).

Στα ραδιοηλεκτρικά δίκτυα η απόσταση από σταθμό σε σταθμό είναι συνήθως 40-50 χιλιόμετρα. Η επαύξηση της αποστάσεως μεταξύ των σταθμών προσκρούει στην καμπυλότητα της γης. Για να εξασφαλιστεί η οπτική επαφή πρέπει οι σταθμοί να τοποθετούνται σε υψηλότερα σημεία και οι κεραίες τους σε μεγάλους ιστούς. Εκτός από αυτό όσο μεγαλώνει η απόσταση, οι αυξομειώσεις του λαμβανόμενου σήματος, που οφείλονται στο ότι από τους δέκτες λαμβάνονται εκτός από το κατευθείαν κύμα και άλλα, μετά από ανάκλαση στη θάλασσα ή στο έδαφος και περίθλαση και είναι γνωστές ως διαλείψεις, γίνονται πιο έντονες. Οι αυξομειώσεις αυτές στις μικρές αποστάσεις αντιμετωπίζονται με τα γνωστά συστήματα διαφορικής λήψεως και με αυτόματη ρύθμιση στάθμης.

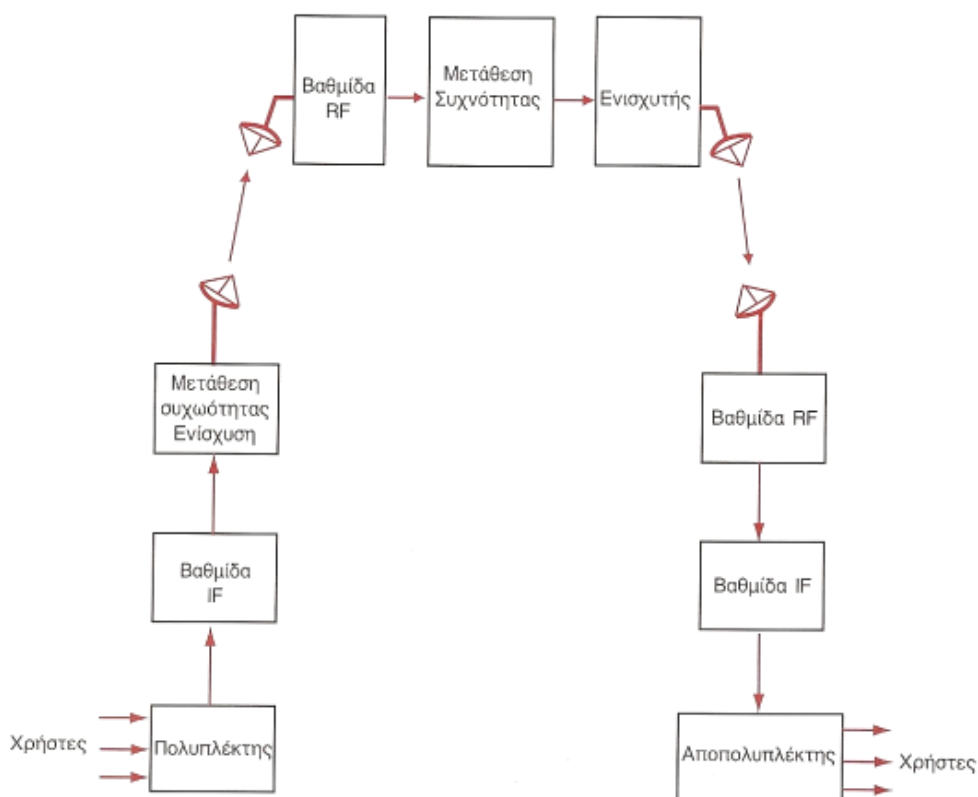
Οι δυσκολίες αυτές από ένα όριο αποστάσεως και πέρα, το οποίο κυμαίνεται από 50-100 χιλιόμετρα, δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν. Για το λόγο αυτό αν ανάμεσα στα σημεία που επιθυμούμε να συνδέσουμε υπάρχει ξηρά, τοποθετούνται σταθμοί αναμετάδοσης. Αν όμως υπάρχει θάλασσα, όπως μεταξύ Ευρώπης και Αμερικής, τότε η επικοινωνία με μικροκύματα δεν είναι δυνατή. Για να υπάρχει μικροκυματική σύνδεση μεταξύ των δυο αυτών ηπείρων, θα έπρεπε να τοποθετηθεί στη μέση του Ατλαντικού ένας σταθμός αναμετάδοσης, πράγμα που φυσικά δεν είναι τεχνικά δυνατό. Κάτι τέτοιο όμως γίνεται με το δορυφόρο. Ο δορυφόρος στη πραγματικότητα είναι ένας σταθμός αναμεταδόσεως ο οποίος αντί να είναι τοποθετημένος σε υψηλό ιστό βρίσκεται στο χώρο και μάλιστα σε ένα πολύ μεγαλύτερο ύψος και αποφεύγονται έτσι και τα φαινόμενα των διαλείψεων (Πετσέλης, 2013).

Το βασικό δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από το δορυφορικό τμήμα και το επίγειο τμήμα. Τα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος εξαρτώνται από το κατά πόσο το σύστημα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε στατικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, εφαρμογές δορυφορικών κινητών τηλεπικοινωνιών ή εφαρμογές για απευθείας κάλυψης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα ενός δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος.



Σχήμα 2.2: Δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα

Οι βασικές βαθμίδες του συστήματος των δορυφορικών επικοινωνιών δίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Βασικές βαθμίδες του συστήματος των δορυφορικών επικοινωνιών

Αναλύοντας το παραπάνω σχήμα έχουμε:

Στην είσοδο του πομπού του επίγειου σταθμού εισέρχονται τα σήματα πληροφορίας από διάφορους χρήστες (σήματα τηλεφωνίας, τηλεοπτικά σήματα, δεδομένα κτλ.) είτε σε αναλογική είτε σε ψηφιακή μορφή, μέσω συμβατικών ζεύξεων (ασυρμάτων ή ενσυρμάτων). Τα σήματα πληροφορίας πολυπλέκονται στην ενδιάμεση συχνότητα του συστήματος. Το προς μετάδοση σήμα αλλάζει συχνότητα (ραδιοσυχνότητα), ενισχύεται από τον ενισχυτή ισχύος της τελικής βαθμίδας και εκπέμπεται προς το δορυφόρο από την κεραία του επίγειου σταθμού. Στο δορυφόρο φθάνει το σήμα προς της τα άνω ζεύξης (uplink), αφού υποστεί ποικίλες αποσβέσεις λόγω της διάδοσης του μέσω της ατμόσφαιρας. Για να αποφεύγεται η παρεμβολή του προς τα άνω σήματος στο προς τα κάτω σήμα, ο δορυφορικός αναμεταδότης εκτός από ενίσχυση, πραγματοποιεί και μετατροπή συχνότητας, ώστε η προς τα κάτω ζεύξη να πραγματοποιείται σε διαφορετική (συνήθως μικρότερη – απόρροια της αρχής κατανάλωσης ελάχιστης δυνατής ενέργειας από το δορυφόρο) συχνότητα, από αυτή της προς τα άνω ζεύξης. Τέλος το σήμα που επανεκπέμπεται από το δορυφορικό αναμεταδότη φθάνει στην είσοδο του επίγειου δέκτη και οδηγείται κατ' αρχήν από στην RF βαθμίδα ενίσχυσης χαμηλού θορύβου (LNA). Στη συνέχεια, η φέρουσα συχνότητα του ραδιοκύματος μετατρέπεται σε ενδιάμεση συχνότητα και μετά την αποπολύπλεξη τα σήματα οδηγούνται στο τελικό προορισμό, δηλαδή στους χρήστες.

Έχοντας πλέον υπόψιν την πιο απλή, αλλά ταυτόχρονα και πλήρη, δομή του τηλεπικοινωνιακού δορυφορικού συστήματος, οφείλουμε να εξετάσουμε τις εφαρμογές των δορυφορικών επικοινωνιών. Αυτές γίνονται φανερές αν αναφέρουμε τα είδη των επίγειων σταθμών, που είναι:

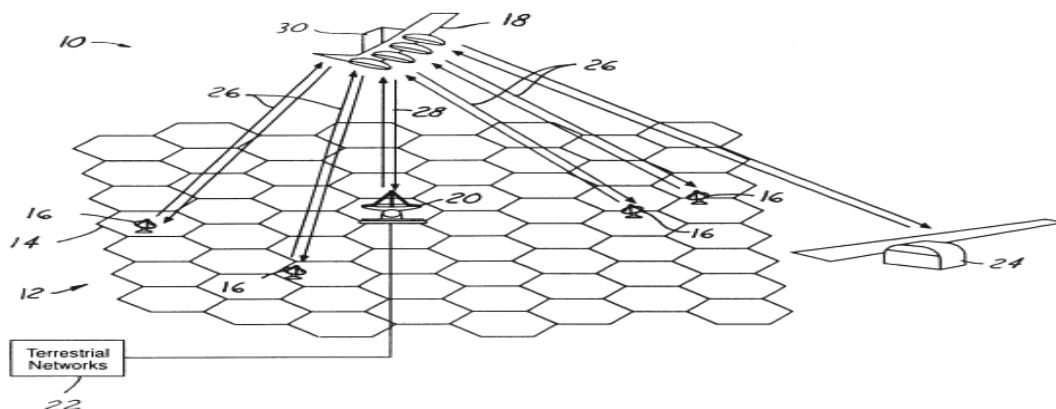
- Σταθερό δίκτυο
- Επίγειος κινητός σταθμός
- Θαλάσσιος κινητός σταθμός (πλοία)
- Αεροπλάνο
- Καθώς επίσης και το είδος των εφαρμογών για τις οποίες χρησιμοποιούνται:
- Υπηρεσίες στενής ζώνης

- Υπηρεσίες ευρείας ζώνης

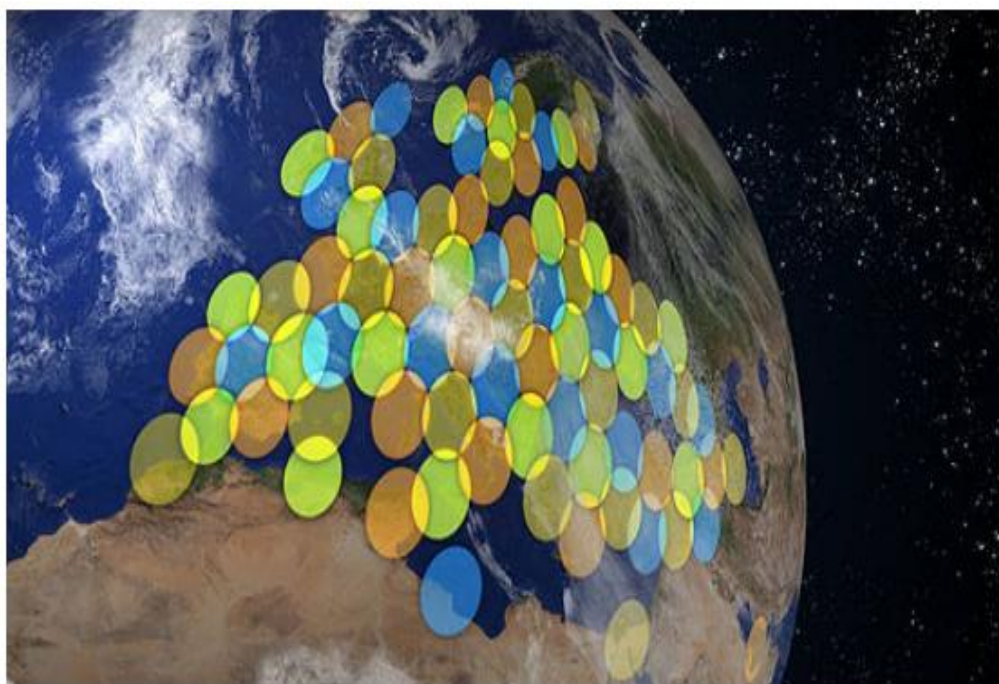
Ουσιαστικά μπορούμε με την χρήση δορυφόρων να καλύψουμε τόσο απλές και χαμηλές σε απαιτήσεις τηλεπικοινωνιακές ανάγκες (όπως για παράδειγμα τηλεφωνία) όσο και πιο πολύπλοκες (όπως Internet), που απαιτούν μεγαλύτερο φασματικό εύρος συχνοτήτων. Η ανάγκη ακόμη για πολλούς χρήστες στους οποίους να προσφέρονται οι υπηρεσίες αυτές σε κάποια σχετική υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, οδηγεί σε λύσεις επαναχρησιμοποίησης συχνότητες του πεπερασμένου φάσματος. Η λύση αυτή ενισχύεται αν σκεφτούμε το γεγονός ότι τα 2/3 της επιφάνειας του πλανήτη είναι νερό, συνεπώς η παγκόσμια κάλυψη δεν θα ήταν ιδανική για περιπτώσεις σταθερών επίγειων σταθμών.

Από την άλλη η μείωση της περιοχής κάλυψης οδηγεί σε αύξηση του κέρδους της κεραίας που παρέχει την κάλυψη (της κεραίας του δορυφόρου). Αυτός ακριβώς ο περιορισμός της περιοχής κάλυψης στην περιοχή του σταθμού ή των σταθμών βάσης που εξυπηρετεί ο δορυφόρος και μόνο, δίνει την δυνατότητα της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας με την τεχνική της διασποράς στο χώρο. Έτσι δύο λοβοί (beams) της κεραίας μπορούν να εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα με μειωμένη παρεμβολή ο ένας στον άλλο. Η ιδέα αυτή της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας, δεν είναι κάτι καινούριο. Στις επίγειες κινητές επικοινωνίες χρησιμοποιούμε δίκτυα κυψελωτής δομής (κυψελωτά δίκτυα) για να μειώσουμε την πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης και ουσιαστικά για να δώσουμε την δυνατότητα σε περισσότερους συνδρομητές να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό τους κανάλι.

Στα παρακάτω σχήματα δίνεται η λογική που ακολουθείται για την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας.



Σχήμα 2.4: Επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας



Εικόνα 2.1: Ζεύγη συχνοτήτων

Στην παραπάνω εικόνα περιοχές με το ίδιο χρώμα χρησιμοποιούν το ίδιο ζεύγος συχνοτήτων για την υλοποίηση της άνω και κάτω ζεύξης. Επίσης γίνεται φανερό ότι με την μέθοδο αυτή καλύπτονται κυρίως ανάγκες επικοινωνίας με σταθερούς σταθμούς βάσεις, αφού από τη μία η θάλασσα (ατλαντικός ωκεανός) δεν καλύπτεται και από την άλλη η πιθανότητα ενός επίγειου χρήστη να κινείται από την μία κυψέλη στην άλλη είναι μικρή (εκτός την περίπτωση επιβατών αεροπλάνου). Είναι φανερό

επίσης ότι για την υλοποίηση της τεχνολογίας αυτής είναι αναγκαία η χρήση κεραιών στον δορυφόρο μεγάλου μεν κέρδους (εφόσον μειώνεται η περιοχή κάλυψης) με περισσότερους του ενός λοβούς. Οι δε λοβοί θα πρέπει να είναι προσανατολισμένοι σε συγκεκριμένες θέσεις.

Στην εισαγωγική ενότητα της εργασίας μας κάναμε λόγο για τις τροχιές των δορυφόρων. Αναφέραμε τις τρεις κατηγορίες δορυφόρων στις οποίες ανήκουν με βάση την θέση που έχουν και την τροχιά στην οποία μπορούν να κινούνται.

Ο χρόνος περιφοράς ενός δορυφόρου που κινείται σε κυκλική τροχιά γύρω από τη γη, δηλαδή η περίοδος εξαρτάται κατά τη Μηχανική, από τη μάζα της γης, τη μάζα του δορυφόρου και την απόσταση από το κέντρο βαρύτητας της γης. Επειδή όμως η μάζα του δορυφόρου είναι εξαιρετικά μικρή σε σύγκριση με τη μάζα της γης, η περίοδος εξαρτάται ουσιαστικά από την απόσταση. Από τον υπολογισμό προκύπτει ότι δορυφόρος που βρίσκεται σε ύψος 36.000 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης έχει περίοδο 24 ώρες. Επομένως, στην περίπτωση των γεωστατικών δορυφόρων για τους οποίους έχουμε ήδη αναφέρει πως είναι αυτοί που περιστρέφονται στο επίπεδο του ισημερινού βρίσκονται στο ύψος των 36.000 χιλιομέτρων κινούνται προς ανατολάς και είναι ως προς την επιφάνεια της γης ακίνητοι και φαίνονται πάντοτε από τις ίδιες περιοχές της γης. Οι δορυφόροι αυτοί ονομάζονται και σύγχρονοι. Όταν όμως έχουν περίοδο διαφορετική από τη διάρκεια περιστροφής της γης λέγονται ασύγχρονοι. Σε αυτή τη περίπτωση, απαιτείται μεγάλος αριθμός δορυφόρων, για την λειτουργία του GPS για παράδειγμα απαιτούνται 24 δορυφόροι σε χαμηλή τροχιά και σε απόσταση 12.552 μιλίων από τον Ισημερινό (Πετσέλης, 2013).

Πώς γίνεται όμως η τοποθέτηση ή πιο ορθά η τροchioθέτηση ενός δορυφόρου;

Η τοποθέτηση δορυφόρου στην τροχιά του γίνεται με την εκτόξευσή του στο διάστημα με πύραυλο. Όταν ο πύραυλος φθάσει στο ύψος των 36,000 χιλιομέτρων αποχωρίζεται και μένει ο δορυφόρος ο οποίος λόγω της ταχύτητας που έχει και της έλξεως της γης, εκτελεί ελλειπτική τροχιά, στη μια εστία της οποίας βρίσκεται η γη, με απόγειο 36.000 χιλιόμετρα περίπου και περίγειο 550 χιλιόμετρα. Με τηλεχειρισμό, ο οποίος γίνεται από τη γη, πυροδοτούνται μικροί πύραυλοι που έχει ο δορυφόρος τη στιγμή που βρίσκεται στο απόγειο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τεθεί ο δορυφόρος

σε τροχιά που είναι κυκλική και λόγω του ύψους έχει περίοδο 24 ώρες. Χάρη στην ταχύτητα που έχει ο δορυφόρος εξακολουθεί να περιφέρεται στην κυκλική τροχιά χωρίς να χρειάζεται κάποια άλλη δύναμη προώθησης και επομένως καύσιμα, επειδή στα ύψη αυτά δεν υπάρχουν τριβές.

Η πράξη έδειξε ότι η θέση του δορυφόρου ως προς τη γη δεν είναι τελείως σταθερή αλλά μεταβάλλεται γιατί επιδρά η έλξη της σελήνης, του ήλιου και η πίεση ακτινοβολίας.

Κατά διαστήματα γίνεται μικρή διόρθωση της τροχιάς με τη βοήθεια των πυραύλων που έχει ο δορυφόρος για το σκοπό αυτό. Τέλος σημειώνεται ότι ο δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του (Πετσέλης, 2013).

Δεν θα μπορούσαμε να μην αναφερθούμε σε αυτό το σημείο της εργασίας μας στις αρχές λειτουργίας ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνίας κοιτάζοντας λίγο πιο προσεκτικά με μέρη που αποτελούν και συγκροτούν ένα τέτοιο σύστημα.

Ο δορυφόρος ενεργεί ως σταθμός αναμετάδοσης των σημάτων, που λαμβάνονται ταυτόχρονα από πολλούς σταθμούς εδάφους, τα οποία είναι στην περιοχή των 6 GHz, αλλά σε διαφορετικές συχνότητες από κάθε σταθμό. Τα σήματα αυτά τα ενισχύει και τα επανεκπέμπει προς όλους τους σταθμούς στην περιοχή των 4 GHz, δηλαδή με μια μετατόπιση συχνότητας προς τα κάτω. Κάθε σταθμός εδάφους επιλέγει από όλο το φάσμα που λαμβάνει από το δορυφόρο, τις ζώνες εκείνες συχνοτήτων που περιέχουν τα σήματα που περιέχουν τα σήματα που προέρχονται από τους σταθμούς με τους οποίους έχει επικοινωνία και προορίζονται γι' αυτόν.

Ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος αποτελείται από (Πετσέλης, 2013):

- Τις κεραίες
- Τους αναμεταδότες
- Τις διατάξεις πληροφοριών ελέγχου και τηλεχειρισμών.

Πιο αναλυτικά, ο δορυφόρος έχει κεραιές που λειτουργούν στην περιοχή των μικροκυμάτων και διάγραμμα ακτινοβολίας κατευθυνόμενο προς τη γη. Εκτός από τις κεραιές αυτές που είναι οι κεραιές του ως σταθμού αναμεταδόσεως έχει και κεραιές βραχέων και υπερβραχέων κυμάτων για την παρακολούθησή του και την οδήγησή του από τη γη. Με τις διατάξεις πληροφοριών ελέγχου και τηλεχειρισμού, δίνονται οι πληροφορίες από το δορυφόρο σχετικά με τη λειτουργική τους κατάσταση, σήματα για να προσανατολίζονται οι κεραιές των σταθμών εδάφους προς το δορυφόρο και γίνεται η διόρθωση της τροχιάς του.

Οι ηλεκτρικές συσκευές του δορυφόρου πρέπει να έχουν μικρό βάρος, μικρές διαστάσεις, μικρή κατανάλωση ρεύματος, εξαιρετική πιστότητα και να μην παθαίνουν εύκολα βλάβες. Για το λόγο αυτό τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ειδικής επιλογής και δοκιμάζονται σε αυστηρές συνθήκες μηχανικής, θερμικής και ηλεκτρικής καταπόνησεως.

Η ρευματοδότηση του δορυφόρου γίνεται από φωτοστοιχεία που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα φωτοστοιχεία αυτά στις παλαιότερες γενιές δορυφόρων κάλυπταν την εξωτερική επιφάνεια του δορυφόρου, όμως στους νεώτερης γενιάς δορυφόρους τοποθετούνται σε μεγάλα περύγια. Για να προστατεύονται τα φωτοστοιχεία από κτυπήματα ξένων σωματίων φέρουν διαφανές κάλυμμα. Υπάρχουν επίσης και συσσωρευτές μέσα στο δορυφόρο που φορτίζονται από τα φωτοστοιχεία και τροφοδοτούν με ρεύμα το δορυφόρο όταν βρίσκεται στη σκιά της γης και επομένως δεν φωτίζεται από τον ήλιο (Πετσέλης, 2013).

Τα παραπάνω ως αναφορά τον σταθμό του δορυφορικού συστήματος που βρίσκεται σε τροχιά πάνω από τη γη. Τι συμβαίνει στο έδαφος όμως και μας επιτρέπεται η χρήση των υπηρεσιών ενός δορυφορικού συστήματος; Στο δορυφορικό σύστημα ανήκει και ένας σταθμός βάσης ο οποίος βρίσκεται στο έδαφος.

Ένας σταθμός εδάφους αποτελείται από:

- Την κεραιά
- Τις ραδιοηλεκτρικές συσκευές
- Το σύστημα ελέγχου

- Τις συσκευές ρευματοδοτήσεως

Στους δορυφορικούς σταθμούς εδάφους χρησιμοποιούνται κεραίες Cassegrain (Cassegrain). Ο τρόπος στήριξης είναι τέτοιος που μπορεί η κεραία να περιστρέφεται κατά αζιμούθιο και καθ' ύψος. Αυτό είναι αναγκαίο για πολλούς λόγους. Οι κεραίες εγκαθίστανται σε διάφορα γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Επομένως οι γωνίες σκόπευσης προς το δορυφόρο είναι διαφορετικές. Αλλά και στον ίδιο σταθμό, άλλη είναι η γωνία σκόπευσης προς το δορυφόρο του ενός ωκεανού και άλλη προς το δορυφόρο του άλλου.

Από την Ελλάδα είναι ορατοί οι δορυφόροι του Ατλαντικού και του Ειρηνικού ωκεανού και φυσικά η γωνία σκόπευσης είναι διαφορετική.

Αλλά και ο δορυφόρος, όπως είπαμε, δεν μένει τελείως ακίνητος. Επομένως η κεραία πρέπει να περιστρέφεται για να τον παρακολουθεί. Τέλος, στις σπάνιες περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα για την οποία έχει υπολογιστεί η κεραία, κατά το διάστημα αυτό μπορεί να τοποθετηθεί η κεραία στη θέση αναπαύσεως με τον ανακλαστήρα προς τα πάνω για να μην καταστραφεί (Πετσέλης, 2013).

Στην πράξη η κεραία που βρίσκεται στον σταθμό εδάφους θα πρέπει πάντα να σκοπεύει το δορυφόρο, αλλά όπως έχουμε ήδη αναφέρει και λίγο παραπάνω αλλά και στην προηγούμενη ενότητα ο δορυφόρος δεν είναι απόλυτα σταθερός Έτσι λοιπόν είναι ανάγκη η κεραία να τον παρακολουθεί συνεχώς.

Η παρακολούθηση του δορυφόρου μπορεί να γίνεται:

- αυτόματα και
- χειροκίνητα

Η αυτόματη παρακολούθηση γίνεται με ένα σήμα που εκπέμπει ο δορυφόρος. Το σήμα αυτό ελέγχεται από 4 σημεία, δυο στη κατακόρυφη και δύο στην οριζόντια διάμετρο της κεραίας. Όταν η κεραία δεν σκοπεύει ακριβώς το δορυφόρο, υπάρχει διαφορά στους χρόνους που φθάνει το σήμα στα 4 σημεία. Η χρονική αυτή διαφορά

με κατάλληλες διατάξεις προκαλεί τη μετακίνηση της κεραίας καθ' ύψος ή κατ' αζιμούθιο αντίστοιχα μέχρι να βρει την ακριβή της κατεύθυνση (Πετσέλης, 2013).

Σε μια μεγάλη τράπεζα ελέγχου (κονσόλα) είναι εγκατεστημένος ένας μεγάλος αριθμός οργάνων και πολλές διατάξεις χειρισμού. Από τη θέση αυτή μετρούνται οι στάθμες του λαμβανόμενου και εκπεμπόμενου σήματος και οι γωνίες αζιμούθιου και ύψους της κεραίας. Επίσης υπάρχουν ενδείξεις αν λειτουργούν οι κύριες ή οι εφεδρικές συσκευές και οθόνες τηλεοράσεων για τις περιπτώσεις που μεταδίδονται τηλεοπτικά προγράμματα (Πετσέλης, 2013).

Επί της ουσίας τι συμβαίνει στην επικοινωνία με ένα δορυφορικό σύστημα; Τι χρονικές καθυστερήσεις υπάρχουν και την εξασθένηση σήματος;

Επειδή ο δορυφόρος βρίσκεται σε ύψος 36.000 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης η μικρότερη διαδρομή του σήματος μεταξύ δυο σταθμών εδάφους μέσω δορυφόρου θα είναι 72.000 χιλιόμετρα. Αν λάβουμε υπόψη ότι η ταχύτητα διαδόσεως του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο χώρο είναι 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο, προκύπτει ότι ο χρόνος που χρειάζεται το σήμα να μεταβεί από τον ένα επίγειο σταθμό στον άλλο είναι 240 ms.

Αν πρόκειται για συνομιλία επειδή η ίδια χρονική καθυστέρηση θα υπάρχει και από την άλλη κατεύθυνση, συνολικά θα υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση λόγω της διαδρομής ηλεκτρομαγνητικού κύματος περίπου μισό sec, που γίνεται αντιληπτή κατά τη συνδιάλεξη αλλά συνηθίζεται εύκολα (Πετσέλης, 2013).

2.2 Κωδικοποίηση καναλιού

Υπάρχουν κάποιες βασικές έννοιες στις οποίες θα πρέπει να αναφερθούμε πριν την περαιτέρω ανάλυση την κωδικοποίησης καναλιού. Στην κωδικοποίηση καναλιού θα αναφερθούμε σε αυτή την ενότητα της εργασίας μας αλλά πολύ εκτενέστερα στην επόμενη ενότητα.

Ξεκινώντας την αναφορά μας σε βασικές έννοιες πριν την αναφορά στην κωδικοποίηση καναλιού σίγουρα θα πρέπει να αναφέρουμε την Θεωρία της Πληροφορίας (Information Theory). Η θεωρία πληροφορίας είναι τμήμα των εφαρμοσμένων Μαθηματικών και ασχολείται με την ποσοτικοποίηση της πληροφορίας. Θεμελιωτής της είναι ο Claude E. Shannon και όρισε αυτή τη θεωρία ώστε να βρει τα θεμελιώδη όρια της επεξεργασίας σήματος σε εφαρμογές όπως η συμπίεση δεδομένων ή η αποστολή δεδομένων σε ένα κανάλι επικοινωνίας (communication channel) με τον λιγότερο δυνατό θόρυβο. Για αυτό το λόγο θα μας χρειαστεί η ανάλυσή της παρακάτω γιατί και η δική μας εργασία πραγματεύεται επικοινωνίες μέσω δορυφόρων όπου η συμπίεση και η πολυπλεξία των δεδομένων χρειάζεται να συμβεί πριν την αποστολή.

Το κυριότερο και το πιο διαδεδομένο μέγεθος της θεωρίας πληροφορίας, είναι η εντροπία πληροφοριών (ή εντροπία πηγής πληροφορίας όπως αναφέρεται συχνότερα) η οποία εκφράζεται στον μέσο αριθμό bit που εκπέμπονται. Για να βρούμε την εντροπία μιας πηγής πληροφορίας αρχικά εξετάζουμε αν είναι πηγή πληροφορίας με ή χωρίς μνήμη.

Στην περίπτωση που έχουμε πηγή πληροφορίας χωρίς μνήμη η εύρεση της εντροπίας δίνεται από το παρακάτω άθροισμα:

$$H = \sum_{i=1}^n P_i \log_2\left(\frac{1}{P_i}\right)$$

Όπου H είναι το σύμβολο της εντροπίας της πηγής πληροφορίας (Information source entropy). Όπου P_i η πιθανότητα του να εκπεμφθεί το εκάστοτε bit πληροφορίας. Άρα ο τύπος μας λέει ότι αν κάνουμε το άθροισμα των bit πληροφορίας (με n όσα είναι αυτά) προσθέτοντας όλες τις πιθανότητες τους και πολλαπλασιάζοντας με τον δυαδικό λογάριθμο του 1/P_i βρίσκουμε τον μέσο όρο bit που εκπέμπονται στο κανάλι επικοινωνίας, δηλαδή την εντροπία της πηγής. Έτσι όσο μεγαλύτερη εντροπία έχει η πηγή τόσο περισσότερα bits εκπέμπονται!

Στην περίπτωση που έχουμε πηγή πληροφορίας με μνήμη εφαρμόζουμε τον παρακάτω τύπο:

$$H(X/Y) = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P(X=i, Y=j) \log_2 P(X=i/Y=j)$$

Σε αυτή την περίπτωση παίρνουμε τις πιθανότητες και των δύο συμβόλων. Δηλαδή αυτού που μόλις εκτέμφθηκε και του επόμενου που θα εκτεμφθεί. Αυτό συμβαίνει διότι η πηγή με μνήμη "θυμάται" ποιο σύμβολο έχει ήδη μεταδοθεί και ποιο είναι το επόμενο στη μετάδοση. Έτσι παίρνουμε και τις δύο πιθανότητες.

Από τη θεωρία πληροφορίας δεν θα μπορούσε να λείπει και η χωρητικότητα καναλιού.

Χωρητικότητα καναλιού είναι το μέγεθος που μας δείχνει ποιος είναι ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σε ένα κανάλι επικοινωνίας. Για την εύρεση της χωρητικότητας χρησιμοποιούμε το περίφημο θεώρημα του Claude Shannon. Ο τύπος αυτού του θεωρήματος είναι ο παρακάτω:

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

Όπου C το σύμβολο της χωρητικότητας, B το εύρος ζώνης συχνοτήτων του καναλιού και ο λόγος S/N (που ονομάζεται και SNR- Signal-to-noise Ratio) είναι ο λόγος του σήματος πληροφορίας προς τον θόρυβο του καναλιού. Έτσι ξέροντας αυτά τα στοιχεία μπορούμε να βρούμε την χωρητικότητα του εκάστοτε καναλιού.

Αυτό το θεώρημα όμως ισχύει όταν έχουμε κανάλι με λευκό προσθετικό θόρυβο του Γκαους (Gauss) ή όπως λέγεται στα αγγλικά Additive White Gaussian Noise (AWGN). Είναι ένα είδος θορύβου που πρωτοεξετάστηκε από τον περίφημο μαθηματικό Carl Friedrich Gauss και λέγεται προσθετικός γιατί προστίθεται στο κανάλι. Καλείται Λευκός επειδή σε όλες τις συχνότητες ίδια ενέργεια, δηλαδή σε οποιαδήποτε συχνότητα κι αν έχουμε μετάδοση σημάτων ο θόρυβος θα έχει την ίδια ενέργεια (ίδιο πλάτος σήματος θορύβου).

Αν ανατρέξουμε στην απόδειξη του θεωρήματος του Shannon θα δούμε ότι δεν

υπάρχει τρόπος να φτάσουμε ποτέ την χωρητικότητα καναλιού. Το μεγαλύτερο ποσοστό που έχει καταφέρει άνθρωπος να φτάσει είναι το 95% της χωρητικότητας.

Φτάνοντας σιγά σιγά στην έννοια της κωδικοποίησης καναλιού θα πρέπει να αναφερθούμε στην κωδικοποίηση δεδομένων ή αλλιώς στην κωδικοποίηση πηγής.

Η κωδικοποίηση καναλιού είναι μια προσπάθεια πολλών επιστημόνων να μειώσουν το θόρυβο που υπάρχει σε όλα τα κανάλια επικοινωνίας. Με τον όρο "μείωση θορύβου" δεν εννοούμε την ελαχιστοποίηση του, αλλά την προστασία του σήματος πληροφορίας ώστε να μην αλλοιώνεται (όσο γίνεται) από διάφορες επιβαρύνσεις που εισάγει ο τηλεπικοινωνιακός διάυλος, όπως θόρυβος, παρεμβολές και διαλείψεις. Αδιαμφισβήτητα, οι επιβαρύνσεις αυτές είναι εντονότερες σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών. Έτσι καταλήγουμε στον εξής διαχωρισμό στην θεωρία των Κωδίκων (Γιαννακός, 2013):

- Κωδικοποίηση Πηγής
- Κωδικοποίηση Καναλιού

Πριν την μετάδοση υπάρχει ανάγκη πολλές φορές να κωδικοποιήσουμε είτε σήματα πληροφορίας που εκπέμπονται από κάποια πηγή είτε να κωδικοποιήσουμε το ίδιο το κανάλι. Έτσι προσπαθούμε την κάθε δυαδική λέξη που θέλουμε να μεταδώσουμε, την αντιστοιχούμε σε πακέτα συμβόλων ώστε να μεταδοθεί "προστατευμένη". Κάποιοι κώδικες που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την κωδικοποίηση της πηγής πληροφορίας είναι:

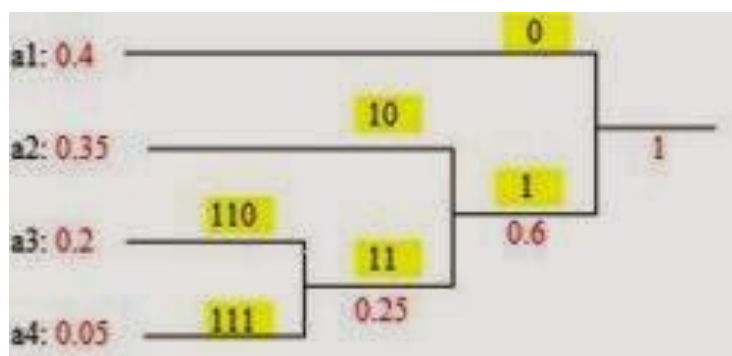
2.2.1 Αλγόριθμος Huffman

Παρακάτω αξίζει να αναφέρουμε την σύντομη ιστορία αυτού του τρόπου κωδικοποίησης που επιτελείται με ένα αλγόριθμο, μεταβλητού μήκους κώδικα. Προτάθηκε στη δημοσίευση του David A. Huffman "A method for the construction of Minimum-Redundancy Code" το 1952. Ο Huffman το 1951 ήταν φοιτητής στο MIT και παρακολουθούσε το μάθημα Θεωρία Πληροφορίας με καθηγητή τον Robert Fano. Ο καθηγητής έδωσε στους σπουδαστές τη δυνατότητα είτε να δώσουν την τελική

εξέταση ή να παρουσιάσουν μία εξαμηνιαία εργασία, σχετικά με την πιο αποτελεσματική απεικόνιση αριθμών, γραμμάτων και άλλων συμβόλων με χρήση δυαδικού κώδικα. Μάλιστα, οι φοιτητές δε γνώριζαν ότι ο Fano και ο Shannon προσπαθούσαν ανεπιτυχώς να βρουν αυτή τη βέλτιστη απεικόνιση. Μετά από πολλούς μήνες ατελέσφορης προσπάθειας και ενώ ο Huffman έριχνε τις σημειώσεις του στα σκουπίδια, είχε την επιφώτιση (epiphany) που τον ανύψωσε για πάντα στο Πάνθεον της επιστήμης, με την υλοποίηση του κώδικα Huffman. Μάλιστα, ο Fano όταν είδε την εργασία αναφώνησε “Is that all there is to it!” (Γρίβας, 2011).

Ο αλγόριθμος Huffman για δυαδικό ή τετραδικό (πιο συχνά) αριθμητικό σύστημα. Είναι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται συχνότερα. Σε αυτό τον αλγόριθμο εργαζόμαστε ως εξής:

Αρχικά ταξινομούμε κατά φθίνουσα σειρά (από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη) τις πιθανότητες των συμβόλων. Έπειτα επιλέγουμε τις δύο πιθανότητες με τις μικρότερες τιμές, τις προσθέτουμε και ταξινομούμε πάλι τις πιθανότητες (έπειτα από το άθροισμα) κατά φθίνουσα σειρά. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε στο σημείο να έχουμε δύο μόνο πιθανότητες που το άθροισμά τους μας κάνει 1. Επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε στις τελευταίες πιθανότητες (τελευταίο βήμα κωδικοποίησης) τις τιμές 0 και 1 (την μία τιμή στη πρώτη και την άλλη στην δεύτερη πιθανότητα). Έπειτα αυτό το συνεχίζουμε κατά σειρά σε όλα τα βήματα της κωδικοποίησης με την προϋπόθεση ότι σε κάθε στήλη προσθέτουμε κάθε φορά κι από ένα bit κωδικοποίησης. Το πως εφαρμόζεται η κωδικοποίηση πηγής Huffman σε δυαδικό σύστημα αρίθμησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.2: Κωδικοποίηση πηγής Huffman σε δυαδικό σύστημα αρίθμησης

2.2.2 Κώδικας Lempel-Ziv

Ο Jacob Ziv και ο Abraham Lempel με δύο δημοσιεύσεις τους το 1977 και το 1978 (και αντίστοιχους αλγορίθμους LZ77 και LZ78) έθεσαν τις βάσεις για το σύνολο αυτών των αλγορίθμων. Η βασική τους ιδέα ήταν να αντικαταστήσουν φράσεις που έχουν εμφανιστεί ήδη στο κείμενο με ένα δείκτη που δείχνει στην προηγούμενη θέση στο κείμενο όπου είχαν εμφανιστεί. Αποδεικνύεται, μάλιστα, ότι, στο όριο, οι αλγόριθμοι αυτής της οικογένειας τείνουν ασυμπτωτικά στην εντροπία των δεδομένων.

Οι δύο κύριοι διαφοροποιημένοι παράγοντες μεταξύ των αλγορίθμων της οικογένειας είναι το όριο μέχρι πόσο πίσω μπορεί να φτάσει ο εκάστοτε δείκτης και πόσες υποακολουθίες αλφαριθμητικών χαρακτήρων εντός αυτού του ορίου μπορούν να αποτελέσουν το πεδίο εφαρμογής του δείκτη. Το όριο του δείκτη μπορεί να μην υπόκειται σε περιορισμούς (αυξανόμενο παράθυρο (growing window)) ή να υπόκειται σε περιορισμό σταθερού μεγέθους παραθύρου, δηλαδή παραθύρου συγκεκριμένου αριθμού χαρακτήρων. Αντίστοιχα, οι υποακολουθίες μπορεί να είναι απεριόριστου ή πεπερασμένου μεγέθους. Ανάλογα με τον συνδυασμό των επιλογών επιτυγχάνεται συμβιβασμός μεταξύ ταχύτητας, απαιτήσεων μνήμης και αποδοτικότητας συμπίεσης.

Στον LZ77 κάποιες κοινά χρησιμοποιούμενες λέξεις και κομμάτια λέξεων που συναντώνται συχνά σε κείμενα ενδέχεται να εμφανίζονται πολλές φορές στο κάθε παράθυρο (για παράδειγμα, στα Αγγλικά τα "the" και "-ing"). Ορολογίες εμφανίζονται συχνά σε αποσιωπητικά. Σπάνια εμφανιζόμενες λέξεις πιθανότατα αποτελούνται από άλλα κομμάτια του λεξικού και, τέλος, ακολουθίες ίδιων χαρακτήρων γίνεται να κωδικοποιηθούν με εμφάνιση της επαναληπτικότητάς τους άρα με λιγότερη πληροφορία. Παρόλα αυτά και μολονότι το κάθε αλγοριθμικό βήμα της κωδικοποίησης διαρκεί ένα σταθερό χρονικό διάστημα, αυτό μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό αντισταθμίζεται με τη χρήση διάφορων δομών (data structures) όπως αταξινόμητη λίστα (unsorted list), ταξινομημένη λίστα (sorted list), δυαδικό δέντρο (binary tree) και πίνακες κατακερματισμού (hash tables). Από όλους τους

αλγόριθμους που προήλθαν από τον LZ77 ο νεώτερος και δημοφιλέστερος είναι ο DEFLATE (2008), ο οποίος συνδυάζει τον LZ77 με την κωδικοποίηση Huffman και χρησιμοποιείται στα προγράμματα PKZIP, GZIP, GIF και PNG.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του LZ78 είναι η ευκολία υλοποίησης πολλών παραλλαγών και η καλή ταχύτητα και αποτελεσματικότητά του σε συμπίεση αρχείων υπολογιστών αλλά και άλλων δεδομένων. Ωστόσο σημαντικό μειονέκτημά του είναι πως είναι βέλτιστος για άπειρο αριθμό δεδομένων. Η δημοφιλέστερη παραλλαγή του LZ78 είναι ο LZW (Lempel-Ziv-Welch) από τον Terry Welch η οποία υλοποιείται πολύ γρήγορα, αλλά δεν είναι συνήθως βέλτιστη, καθώς στηρίζεται σε περιορισμένη ανάλυση των δεδομένων (Γρίβας, 2011).

Επιγραμματικά θα αναφέρουμε σε αυτό το σημείο τις κατηγορίες των κωδικών που ανήκουν σε αυτή την ενότητα. Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας μας θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στην κάθε κατηγορία κωδικών για την κωδικοποίηση καναλιού.

Έχουμε δύο μεγάλες κατηγορίες κωδικών. Τους γραμμικούς κώδικες (Linear codes) και του συγκεραστικούς (ή συνελκτικούς) κώδικες (Convolutional Codes). Επίσης συχνά συναντούμε μία υποκατηγορία γραμμικών που είναι οι κυκλικό κώδικες ενώ τα τελευταία χρόνια σε πολλά συστήματα χρησιμοποιείται μία ακόμα κατηγορία, αυτή των τούρμπο κωδικών.

2.2.3 Γραμμικοί κώδικες

Για να χαρακτηρίσουμε έναν κώδικα γραμμικό αρκεί να ισχύει πως οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός δύο κωδικών λέξεων του κώδικα, αποτελεί επίσης κωδική λέξη (του κώδικα).

Δύο πολύ βασικά στοιχεία της κωδικοποίησης καναλιού είναι:

- Ο Πίνακας γεννήτορας (G): $k \times n$ δυαδικός πίνακας και

- Η Κωδική λέξη (c) του κώδικα: $c=u*G$. Όπου u το μήνυμα που θέλουμε να μεταδώσουμε στο κανάλι.

Ο βασικότερος αλγόριθμος (κώδικας) που χρησιμοποιούμε σε αυτή την κατηγορία, είναι ο κώδικας Hamming. Οι γραμμικοί κώδικες είναι απλοί κώδικες που μας βοηθούν να κωδικοποιήσουμε μηνύματα πριν τα στείλουμε ώστε ο δέκτης να τα πάρει σωστά κατά την αποκωδικοποίηση.

2.2.4 Κυκλικοί κώδικες

Μια υποκατηγορία των γραμμικών κωδίκων είναι οι κυκλικοί κώδικες. Η βασική διαφορά που έχουν σε σχέση με τους γραμμικούς είναι ότι αντί για πίνακα γεννήτορα, ορίζονται από το λεγόμενο πολυώνυμο γεννήτορα. Απλώς αντί για πίνακες που από εκεί αντλούμε πληροφορίες για τον κώδικα, έχουμε ένα πολυώνυμο n -οστού βαθμού (ανάλογα με την περίπτωση). Έτσι ορίζουμε κάποιους κώδικες όπως οι: BCH, Reed-Solomon, κ.ά.

2.2.5 Συγκεραστικοί (ή Συνελικτικοί) κώδικες

Στους συγκεραστικούς κώδικες, η κωδικοποίηση πραγματοποιείται πάνω σε ένα ολόκληρο διάστημα της ροής των συμβόλων του μηνύματος που ονομάζεται διάστημα εξαναγκασμού.

Ένας συγκεραστικός κώδικας με διάστημα εξαναγκασμού k , δημιουργείται με τον συνδυασμό των k εξόδων ενός ολισθητή k -βαθμίδων και με τη βοήθεια v αθροιστών modulo-2.

Οι έξοδοι v_1, v_2, \dots, v_n των αθροιστών δειγματοληπτούνται από έναν κατάλληλο διακόπτη. Έτσι παράγονται v ψηφία εξόδου για κάθε ένα ψηφίο εισόδου.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι έχουμε πολλούς τρόπους για να κωδικοποιήσουμε ένα κανάλι επικοινωνίας και ο καθένας μας προσφέρει άλλες δυνατότητες (Γιαννακός, 2013).

2.2.6 Τούρμπο κώδικες

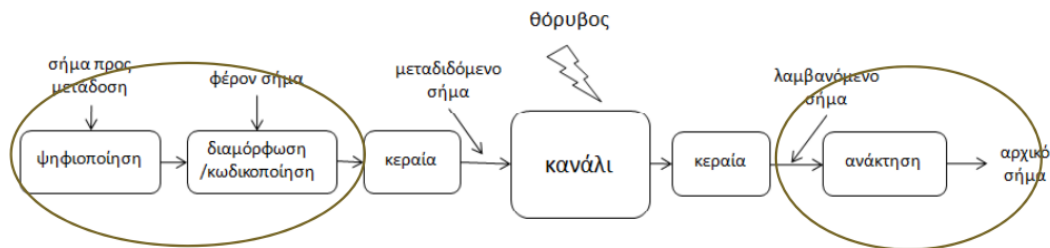
Στη θεωρία της πληροφορίας, οι κώδικες Turbo είναι μια κατηγορία κωδίκων υψηλών επιδόσεων για τη διόρθωση σφαλμάτων (forward error correction - FEC). Αναπτύχθηκαν γύρω στο 1990-1991 (αλλά δημοσιεύτηκαν για πρώτη φορά το 1993), Ήταν οι πρώτοι κώδικες που πρακτικά προσέγγισαν τη χωρητικότητα καναλιού, προσδίδοντας ένα θεωρητικό μέγιστο για το ρυθμό μετάδοσης ώστε να υπάρχει αξιόπιστη επικοινωνία δοθέντος ενός συγκεκριμένου επιπέδου θόρυβου.

2.3 Ψηφιακή διαμόρφωση

Στον τομέα των ηλεκτρονικών διαμόρφωση είναι η διαδικασία της αλλαγής ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών μιας περιοδικής κυματομορφής υψηλής συχνότητας, οριζόμενο ως φέρον σήμα, βάσει ενός άλλου αυξομειούμενου σήματος. Για παράδειγμα ο μουσικός ο οποίος μπορεί να κλιμακώσει τον ήχο σε ένα μουσικό όργανο μεταβάλλοντας την ένταση τον χρονισμό και τον τόνο του. Οι τρεις βασικές παράμετροι της περιοδικής κυματομορφής είναι το πλάτος («ένταση»), η φάση («χρονισμός») και η συχνότητά της («τόνος»), που μπορούν να αλλάξουν από ένα σήμα αποτελούμενο από χαμηλές συχνότητες ώστε να προκύψει το διαμορφωμένο σήμα. Η υψηλής συχνότητας διαμορφωμένη κυματομορφή χρησιμοποιείται ως μεταφορέας του αρχικού σήματος.

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 υψίσυχο σήμα τότε καλείται φέρον και συνήθως είναι σήμα απλής 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

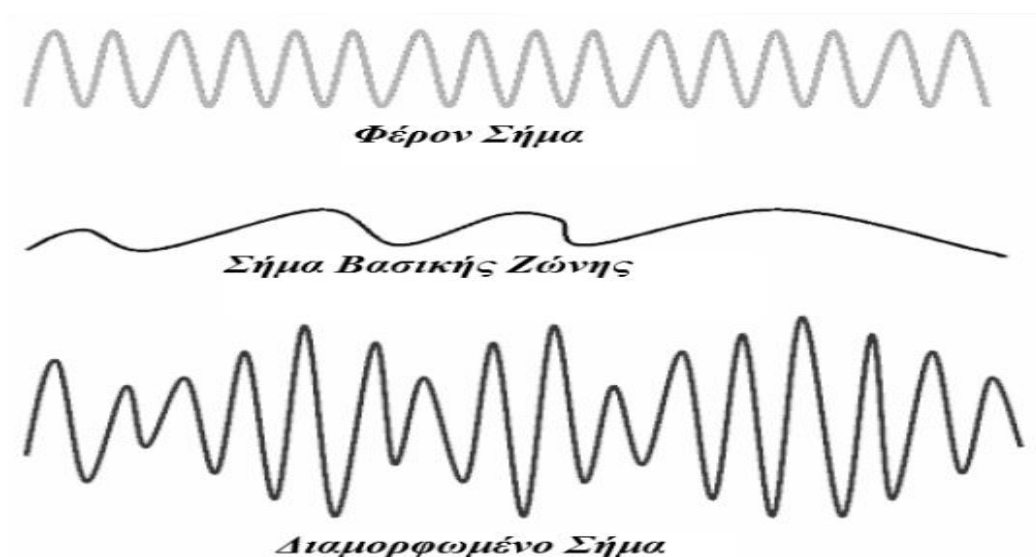
εύρος ζώνης του οποίου δεν επικαλύπτεται με το εύρος ζώνης του σήματος. Στο άλλο άκρο της επικοινωνίας, στον παραλήπτη, λαμβάνει χώρα η ανάστροφη διαδικασία προκειμένου να ανακτηθεί το αρχικό σήμα, η αποδιαμόρφωση. Μία συσκευή η οποία μπορεί να επιτελεί και τις δύο διεργασίες, έτσι ώστε να λειτουργεί και ως αποστολέας και ως παραλήπτης, ονομάζεται μόντεμ (modem, εκ των αγγλικών λέξεων Modulator-Demodulator) (https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση_σήματος).



Σχήμα 2.5: Διαμόρφωση σήματος

Με τη διαμόρφωση επιτυγχάνουμε:

1. Μετάδοση πολλών σημάτων στον ίδιο χώρο με χρήση διαφορετικών φερόντων
2. Ελάττωση των απαιτήσεων στα χαρακτηριστικά των συστημάτων εκπομπής
3. Εκμετάλλευση περιοχών του φάσματος που έχουν καλύτερες συνθήκες μετάδοσης (λιγότερες παρεμβολές)



Σχήμα 2.6: Μετάδοση πολλών σημάτων στον ίδιο χώρο

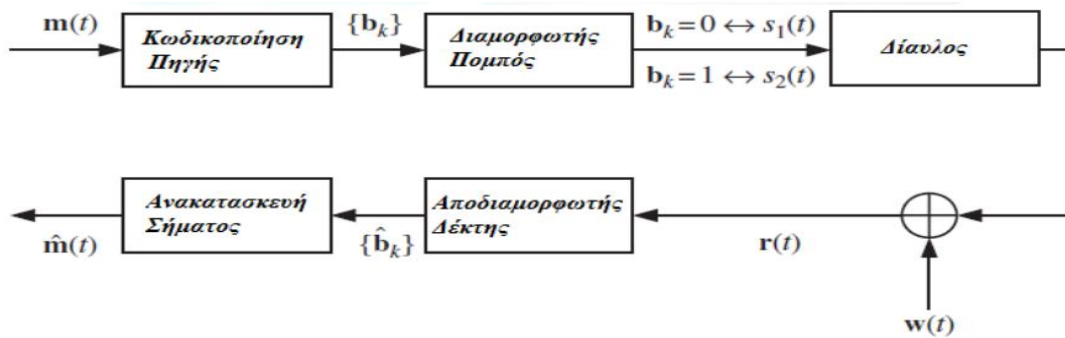
Διαφορετικοί τρόποι διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται ανάλογα με το σήμα (ψηφιακό ή αναλογικό) και τον τρόπο μετάδοσης (ψηφιακή ή αναλογική μετάδοση). Το δικό μας ενδιαφέρον εστιάζεται σε διαμόρφωση ψηφιακών σημάτων για ψηφιακή ή αναλογική μετάδοση. Οι τεχνικές διαμόρφωσης που προκύπτουν αξιολογούνται με βάση:

- το εύρος ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνουν
- την ευκολία συγχρονισμού
- την ευκολία αναγνώρισης σφαλμάτων
- την απλότητα υλοποίησης
- την ευαισθησία στο θόρυβο

Τα Είδη Ψηφιακής Διαμόρφωσης παραθέτονται παρακάτω:

- Μεταλλαγή Μετατόπισης Πλάτους- Amplitude Shift Keying (ASK)
- Μεταλλαγή Μετατόπισης Συχνότητας – Frequency Shift Keying (FSK)
- Μεταλλαγή Μετατόπισης Φάσης- Phase Shift Keying (PSK)
- Quadratic Amplitude Modulation (QAM) – συνδυασμός της ASK και της PSK

Το ψηφίο bit είναι η μονάδα μετάδοσης πληροφορίας ενώ το σύμβολο είναι η μονάδα της μεταδιδόμενης ενέργειας. Και τα δύο μπορούν να παρασταθούν ως κυματομορφές (παλμοί ή ημιτονοειδείς συναρτήσεις). Η αναπαράσταση των bits σε κυματομορφές είναι αυτή που επιτρέπει τη μεταφορά πληροφορίας. Τα ψηφία είναι σαν μικρά αντικείμενα, ενώ τα σύμβολα είναι κουτιά στα οποία ταξιδεύουν τα μικρά αντικείμενα πάνω σε ένα μεταφορικό μέσο. Η συσκευασία των bits σε κουτιά (σύμβολα) είναι η Ψηφιακή Διαμόρφωση. Κάθε σύμβολο μπορεί να αναπαριστά περισσότερα του ενός bit. Τα bits είναι αφηρημένη έννοια, αυτό που πραγματικά μεταδίδεται είναι το σύμβολο. Το baud έχει την έννοια του συμβόλου.



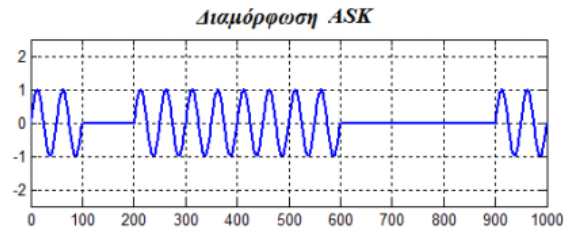
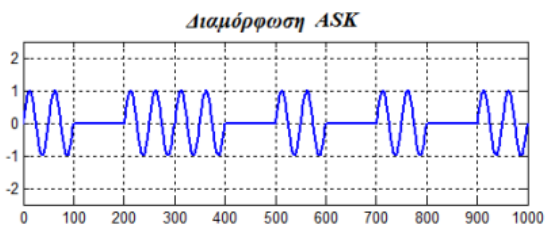
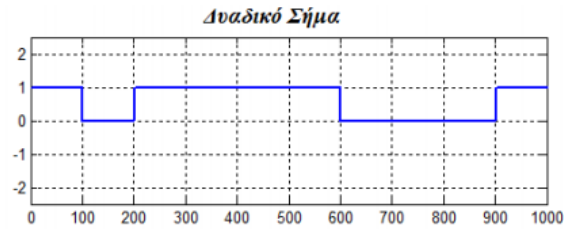
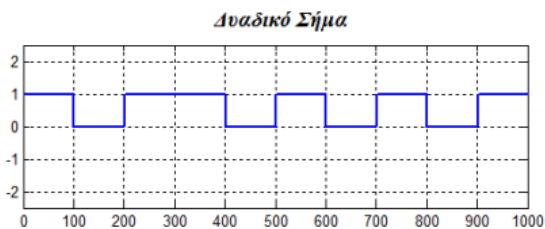
Η διάρκεια του bit του b_k είναι T_b sec.

Ρυθμός Bits: $R_b = 1/T_b$

Σχήμα 2.7: Μεταλλαγή Μετατόπισης Πλάτους- Amplitude Shift Keying (ASK)

Το πλάτος του φέροντος αλλάζει σε σχέση με τη πληροφορία και το υπόλοιπο παραμένει σταθερό. Η ON-OFF Keying τεχνική είναι μια ειδική περίπτωση του ASK. Για τη μετάδοση του 1 θεωρούμε ένα συγκεκριμένο πλάτος. Για το μηδέν αλλάζουμε το πλάτος και κρατάμε σταθερή τη συχνότητα.

$$ASK(t) = m(t)A_c \sin(2\pi f_c t) = \begin{cases} A_c \sin(2\pi f_c t) & m(nT_b) = 1 \\ 0 & m(nT_b) = 0 \end{cases}$$



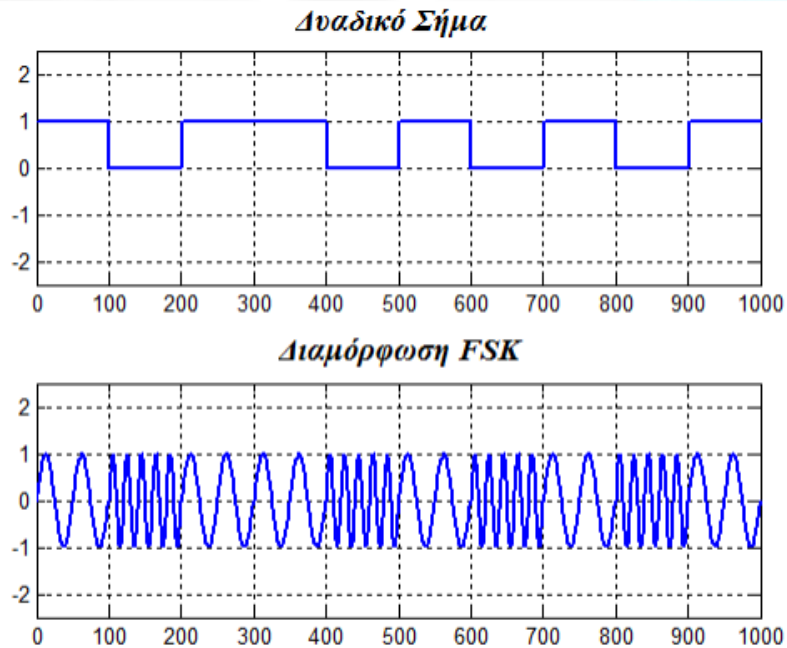
Ακολουθία Πληροφορίας Βασικής Ζώνης: 1 0 1 1 0 1 0 1 1

Ακολουθία Πληροφορίας Βασικής Ζώνης: 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1

Σχήμα 2.8: Μεταλλαγή Μετατόπισης Συχνότητας- Frequency Shift Keying (FSK)

Η συχνότητα αλλάζει σε σχέση με τη πληροφορία και το υπόλοιπο παραμένει σταθερό. Για τη μετάδοση του 1 θεωρούμε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Για το μηδέν αλλάζουμε το συχνότητα και κρατάμε το πλάτος σταθερό.

$$FSK(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 t) & \text{bit 1} \\ \sin(2\pi f_2 t) & \text{bit 0} \end{cases}$$

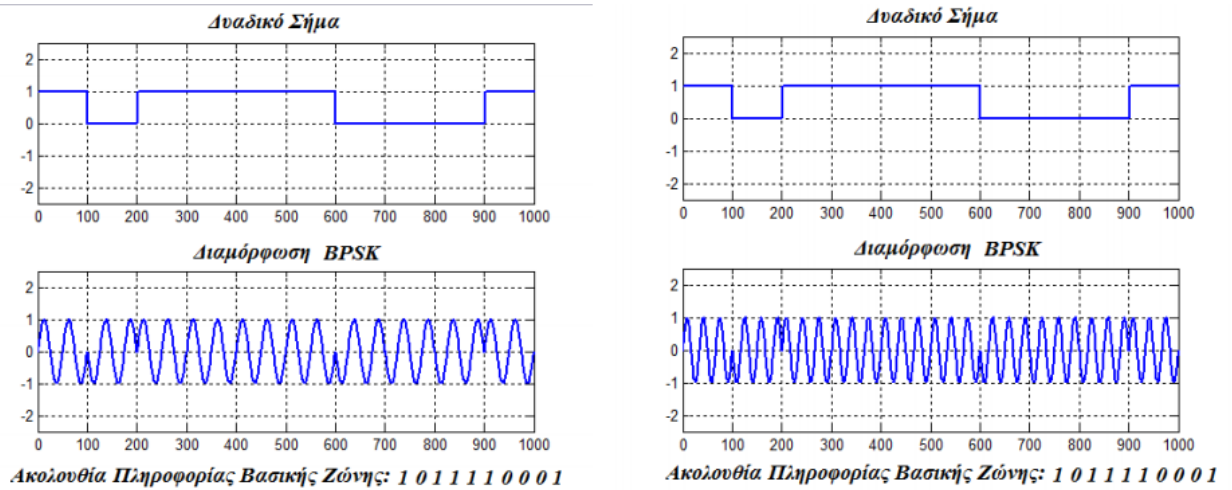


Ακολουθία Πληροφορίας Βασικής Ζώνης: 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1

Σχήμα 2.9: Μεταλλαγή Μετατόπισης Φάσης - Phase Shift Keying (PSK)

Η φάση αλλάζει σε σχέση με τη πληροφορία και το υπόλοιπο παραμένει σταθερό. Για τη μετάδοση του 1 θεωρούμε μηδενική αρχική φάση. Για το μηδέν ολισθαίνουμε τη φάση κατά 180 μοίρες.

$$BPSK(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_c t) & \text{bit 1} \\ \sin(2\pi f_c t + \pi) & \text{bit 0} \end{cases}$$



Πηγή: Παναγόπουλος, nd

Σχήμα 2.10: Αλλαγή φάσης σε σχέση με την πληροφορία

2.4 Κανάλι RICIAN

Το RICIAN κανάλι είναι ένα στοχαστικό μοντέλο που περιγράφει τη μερική ακύρωση του σήματος από το ίδιο λόγω πολυδιαδρομικής μετάδοσης. Όταν κατά τη πολυδιαδρομική μετάδοση τουλάχιστον μία από τις συνιστώσες είναι πολύ ισχυρότερη από τις υπόλοιπες τότε στο κανάλι παρουσιάζονται οι διαλείψεις Rician.

Συνεπώς καταλαβαίνουμε πως η κατανομή Rice χρησιμοποιείται για την περιγραφή του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος σε ένα κανάλι μετάδοσης με ισχυρή επίδραση οπτικής επαφής (Line-of-Sight) μεταξύ κεραίας πομπού και δέκτη. Ο συντελεστής K Rice εκφράζει τον λόγο της συνεισφοράς της ισχύος της απευθείας συνιστώσας του σήματος ως προς την συνολική λαμβανόμενη ισχύ λόγω φαινομένων διάχυσης. Χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό του καναλιού καθώς και τον υπολογισμό του BER (bit-error-ratio) και της πλέον σημαντικής παραμέτρου των τηλεπικοινωνιών SNR (Signal-to-Noise-Ratio), δηλαδή του λόγου σήματος προς θόρυβο.

Όταν υπάρχει μια κυρίαρχη στατική συνιστώσα σήματος, όπως η διαδρομή μεταδόσεως οπτικής επαφής, η κατανομή του φακέλου διαλείψεων μικρής κλίμακας είναι Rician. Σε αυτή την περίπτωση, τυχαίες συνιστώσες πολλαπλών οδεύσεων που φθάνουν σε διαφορετικές γωνίες υπερτίθενται σε ένα στατικό κυρίαρχο σήμα. Στην έξοδο του φωρατή περιβάλλουσας, αυτό οδηγεί στην πρόσθεση μιας dc συνιστώσας στην τυχαία πολλαπλή όδευση. Κατανομή διαλείψεων Rician (Rician Fading Distribution).

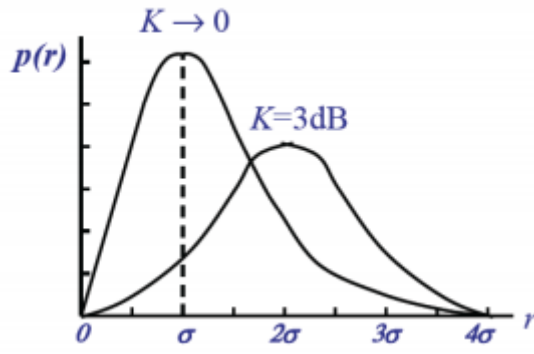
Ακριβώς όπως και στην περίπτωση της φώρασης ενός ημιτονοειδούς κύματος σε θερμικό θόρυβο, η επίδραση ενός κυρίαρχου σήματος που φθάνει μαζί με πολλά ασθενέστερα σήματα πολλαπλών οδεύσεων δημιουργεί μια κατανομή Rician. Όσο το κυρίαρχο σήμα εξασθενεί, το σύνθετο σήμα μοιάζει με ένα σήμα θορύβου που έχει φάκελο Rayleigh. Επομένως, η κατανομή Rician εκφυλίζεται σε Rayleigh όταν η κυρίαρχη συνιστώσα εξασθενεί. Η κατανομή Rician δίνεται από:

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), & \text{για } (A \geq 0, r \geq 0) \\ 0, & \text{για } (r < 0) \end{cases}$$

Η παράμετρος A δηλώνει το πλάτος κορυφής του κυρίαρχου σήματος και το $I_0(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης. Η κατανομή Rician πολλές φορές περιγράφεται με χρήση μιας παραμέτρου K, που ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της ισχύος του ντετερμινιστικού σήματος και της διακύμανσης της πολλαπλής όδευσης. Δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ (dB)}.$$

Η παράμετρος K είναι γνωστή ως παράγοντας Rician και καθορίζει πλήρως την κατανομή Rician. Όσο $A \rightarrow 0$, $K \rightarrow -\infty$ dB, και όσο η κυρίαρχη διαδρομή μειώνεται σε πλάτος, η κατανομή Rician εκφυλίζεται σε Rayleigh.



Πηγή: Κανελλοπούλου, 2009

Σχήμα 2.11: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Rician

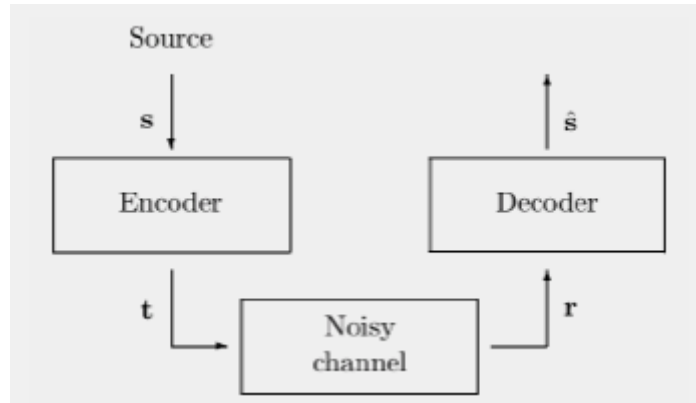
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ

3.1 Γενικά

Στις τηλεπικοινωνίες συχνά συναντούμε και χρησιμοποιούμε την έννοια της κωδικοποίησης καναλιού ωστόσο αυτή έχει νόημα και ύπαρξη μόνο σε ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Λόγο της κωδικοποίησης καναλιού τα ψηφιακά συστήματα υπερέχουν έναντι των αναλογικών.

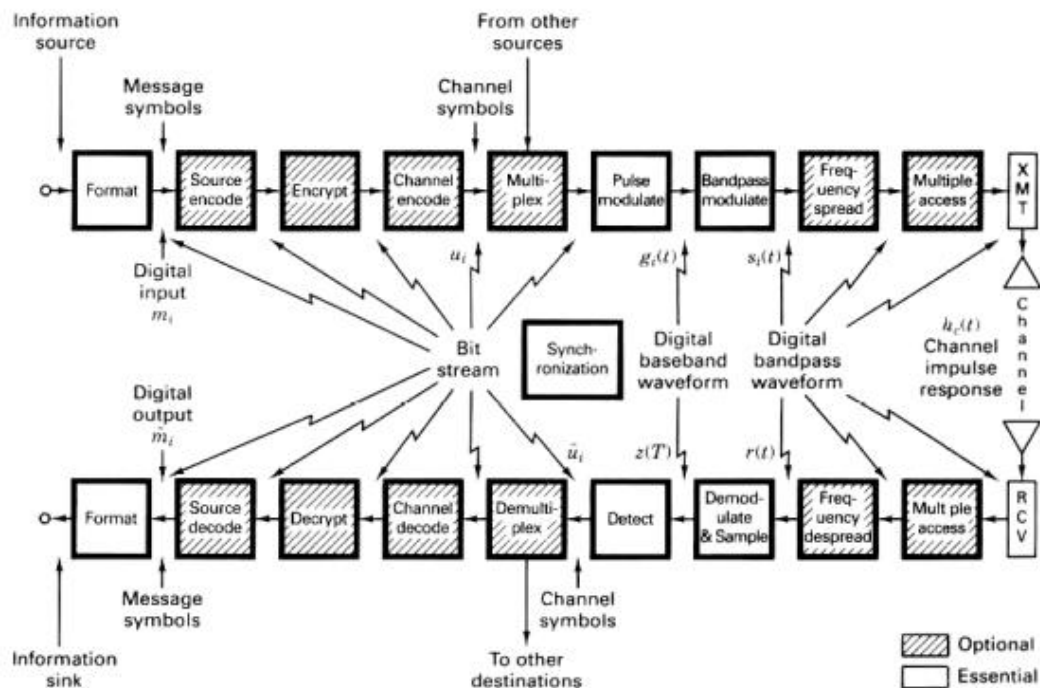
Με την κωδικοποίηση καναλιού μπορούμε να πετύχουμε αυξημένη ποιότητα επικοινωνίας. Αυτή η αυξημένη ποιότητα έχει όμως και το κόστος της, το οποίο μπορεί να είναι για παράδειγμα αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης συχνοτήτων. Συγκρίνοντας όμως την κωδικοποίηση καναλιού με άλλες τεχνικές βελτίωσης της ποιότητας του συστήματος, όπως χρήση πομποδεκτών μεγαλύτερης ισχύος, διαπιστώνεται ότι η κωδικοποίηση είναι από τις πλέον αποδοτικές και οικονομικές λύσεις, κυρίως χάρη στην εξέλιξη στον τομέα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας (LSI) και στις τεχνικές επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων (DSP). Ειδικά μάλιστα στα επικοινωνιακά συστήματα που εξετάζουμε στη δική μας εργασία, δηλαδή τα δορυφορικά δίκτυα υπολογιστών, απαιτείται πολύ μικρό ποσοστό λαθών η κωδικοποίηση καναλιού θεωρείται απαραίτητη. Το ζητούμενο όμως είναι να αποφασιστεί ανάλογα με την περίπτωση ποια συγκεκριμένη τεχνική κωδικοποίησης θα χρησιμοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του συστήματος κάθε φορά.

Οι διαδικασίες κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης σε μία γενική τους μορφή φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1: Διαδικασίες κωδικοποίησης / αποκωδικοποίησης

Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον πομπό και στον δέκτη, φαίνονται στο παρακάτω, λίγο πιο αναλυτικό σχήμα ενός γενικού ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος.



Σχήμα 3.2: Γενικό ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα

Είπαμε πιο πάνω πως βαρύνοντα ρόλο παίζει η απόφαση της τεχνικής κωδικοποίησης καναλιού που θα χρησιμοποιηθεί, για αυτό το λόγο πρέπει να γίνει αναφορά στις κατηγορίες των τεχνικών κωδικοποίησης καναλιού.

Έτσι μπορούν να διαχωριστούν σε:

- κωδικοποιήσεις κυματομορφών (waveform coding)

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μετατροπή των κυματομορφών σε νέες κυματομορφές με στόχο η διαδικασία εκτίμησης σήματος στο δέκτη να έχει πιθανοτικά λιγότερα λάθη.

- κωδικοποιήσεις δομημένων ακολουθιών (structured sequences) ή δομημένου πλεονασμού (structured redundancy)

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε εισαγωγή στα αρχικά δεδομένα (αρχικά bits) επιπλέον δεδομένων (επιπλέον bits). Μετά την εισαγωγή με δομημένο τρόπο των επιπλέον bits παίρνουμε το κωδικοποιημένο μήνυμα, που θα είναι και το μήνυμα που θα μεταδοθεί πάνω από το δίαυλο. Τα επιπλέον αυτά bits συνεισφέρουν στον εντοπισμό ή και τη διόρθωση σφαλμάτων, που εισάγονται από το δίαυλο, κατά τη φάση αποκωδικοποίησης στο δέκτη.

Κοινό σημείο και των δύο κατηγοριών είναι ότι η διαδικασία κωδικοποίησης παράγει κωδικοποιημένα σήματα με καλύτερες ιδιότητες απόστασης ανάμεσας τους σε σχέση με τα ακωδικοποίητα. Η έννοια της απόστασης χρησιμοποιείται εδώ όπως αυτή ορίζεται στη θεωρία Πληροφορίας.

Στόχος της κωδικοποίησης καναλιού είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη αντιμετώπιση των σφαλμάτων που εισάγει ο δίαυλος πάνω στο μεταδιδόμενο σήμα.

Η κατηγοριοποίηση των τεχνικών επίσης μπορεί να γίνει βάσει του τρόπου αντιμετώπισης – ελέγχου των λαθών. Έτσι έχουμε το παρακάτω διαχωρισμό:

- Εντοπισμός των λαθών και επανεκπομπή (error detection and retransmission)

Σε αυτή την περίπτωση προστίθενται στα αρχικά bits πληροφορίας, bits ισοτιμίας (parity bits) που καθιστούν δυνατό τον εντοπισμό πιθανών λαθών. Σε περίπτωση εντοπισμού λάθους ή λαθών, ο δέκτης δεν κάνει προσπάθεια διόρθωσης τους αλλά στέλνει στον πομπό αίτηση επανεκπομπής των δεδομένων που ελήφθησαν εμπεριέχοντας λάθη.

Από την παραπάνω περιγραφή γίνεται κατανοητό ότι η μέθοδος ‘error detection and retransmission’ (ARQ) απαιτεί διαθεσιμότητα αμφίδρομου καναλιού.

- Έλεγχος λαθών είναι η πρόσθια διόρθωση λαθών (forward error correction, FEC)

Σε αυτή την περίπτωση, τα επιπλέον bits γνωστά και ως bits ισοτιμίας, σχεδιάζονται έτσι ώστε όχι μόνο να εντοπίζουν τυχόν σφάλματα αλλά να τα διορθώνουν κιόλας.

Ένας κώδικας δεν μπορεί να διορθώσει γενικά όλα τα σφάλματα, καθώς υπάρχουν περιορισμοί στη λεγόμενη διορθωτική ικανότητα του όπως θα δούμε στη συνέχεια. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν FEC βλέπουμε ότι δεν στέλνονται δεδομένα από το δέκτη στον πομπό, δεν υπάρχει δηλαδή ανάγκη διαθεσιμότητας καναλιού ανάδρασης αλλά αρκεί μονόδρομο κανάλι.

Πολλές φορές η μέθοδος ελέγχου σφαλμάτων που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από το αν το κανάλι δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας ή όχι (Λαμπρινάκος, 2007).

Συνεχίζοντας την εξέταση της κωδικοποίησης καναλιού φτάνουμε στο σημείο που θα πρέπει να γίνει η ακριαφνής παρουσίαση των κωδίκων που χρησιμοποιούνται σε αυτή.

Στην προηγούμενη ενότητα μιλήσαμε επιγραμματικά για γραμμικούς κώδικες, συνελεκτικούς κώδικες, κυκλικούς κώδικες και κώδικες τούρμπο ενώ αναφέραμε πως από τους παραπάνω οι δύο κύριες κατηγορίες κωδίκων είναι οι γραμμικοί κώδικες (υποκατηγορία των μπλοκ κωδίκων, block codes) και οι συνελεκτικοί κώδικες (convolutional codes).

Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ αυτών είναι οι παρακάτω:

1. Οι μπλοκ κώδικες χωρίζουν την πληροφορία σε κομμάτια(μπλοκ) από bits καθορισμένου μήκους τα οποία ονομάζονται και κωδικές λέξεις.

2. Στους μπλοκ κώδικες στην αποκωδικοποίηση τα μπλοκ εισάγονται ένα-ένα στον αποκωδικοποιητή ενώ στους συνελκτικούς κώδικες η ακολουθία των bits δεν χωρίζεται σε ομάδες, αλλά αντιμετωπίζεται ενιαία κατά την αποκωδικοποίησή της.
3. Οι συνελκτικοί κωδικοποιητές έχουν μνήμη. Η έξοδος του κωδικοποιητή σε κάθε χρονική στιγμή δεν εξαρτάται μόνο από την είσοδό του στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή αλλά και από κάποιες προηγούμενες.
4. Ενώ για τους μπλοκ κώδικες έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι εύρεσης αποτελεσματικών κωδίκων, κάτι αντίστοιχο δεν έχει επιτευχθεί για τους συνελκτικούς κώδικες, με αποτέλεσμα η αναζήτηση «καλών» συνελκτικών κωδίκων να γίνεται κυρίως μέσω υπολογιστών.

Στην κατηγορία των μπλοκ κωδίκων ανήκουν οι κώδικες Hamming, οι κυκλικοί κώδικες, οι BCH, οι Reed-Solomon (RS), οι LDPC (Low-Density-Parity-Check) κώδικες και άλλοι. Συνδυασμός απλών κωδίκων έχει οδηγήσει στη δημιουργία εξαιρετικά επιτυχημένων σύνθετων σχημάτων κωδικοποίησης καναλιού. Οι κώδικες γινομένου, οι αλυσιδωτοί κώδικες και οι τούρμπο (turbo) κώδικες είναι ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Οι τελευταίοι αποτέλεσαν τα τελευταία χρόνια τους πλέον αποδοτικούς κώδικες για κωδικοποίηση καναλιού, επιτυγχάνοντας σε αρκετές περιπτώσεις ρυθμούς μετάδοσης πολύ κοντά στο όριο του Shannon.

Τις περισσότερες από αυτές τις κατηγορίες για την κωδικοποίηση καναλιού θα τις αναπτύξουμε αναλυτικότερα σε αυτό το κεφάλαιο.

3.2 Block κώδικες

Οι block κώδικες ομαδοποιούν τη συνεχόμενη ακολουθία των bits της πληροφορίας, τα οποία εισέρχονται στον κωδικοποιητή, σε block k συμβόλων. Block κώδικας, ονομάζεται ένα σύνολο από M ακολουθίες συμβόλων μήκους n .

Έστω q , ο αριθμός των διακριτών συμβόλων πληροφορίας (στην περίπτωση της δυαδικής μετάδοσης πληροφορίας $q=2$). Οι ακολουθίες συμβόλων μήκους n , q

διακριτών συμβόλων, ονομάζονται κωδικές λέξεις του κώδικα. Ο αριθμός των κωδικών λέξεων είναι μια δύναμη του q , είναι δηλαδή $M=q^m$. Στον δέκτη, ακολούθως, λαμβάνεται μια απόφαση, με βάση την πληροφορία από το ληφθέν n -διάστατο πολυώνυμο, σχετικά με την κωδική λέξη που μεταδόθηκε. Αυτή η απόφαση είναι μια στατιστική απόφαση, είναι μια απόφαση που από την φύση της χρησιμοποιεί ως βάση την πληροφορία που είναι διαθέσιμη και κατά συνέπεια δεν μπορεί να είναι αλάνθαστη. Με την χρήση του κατάλληλου κώδικα, η πιθανότητα μιας λανθασμένης απόφασης είναι συνήθως πολύ μικρότερη από την πιθανότητα που υπήρχε αρχικά, στα σύμβολα εισόδου στο κανάλι, να αναπαραχθούν χωρίς λάθος στην έξοδο του καναλιού.

Οι κωδικές λέξεις αποτελούν την πρώτη σειρά του πίνακα. Όταν λαμβάνεται μια κωδική λέξη, είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι η ίδια κωδική λέξη είναι και αυτή που στάλθηκε. Η απόφαση του δέκτη για άλλες πιθανές ληφθείσες λέξεις περιγράφεται παραθέτοντας κάτω από κάθε μια κωδική λέξη, τις ληφθείσες λέξεις οι οποίες θα αποκωδικοποιηθούν σε αυτήν. Έτσι κάθε μια από τις πιθανές να ληφθούν λέξεις, εμφανίζεται μόνο μια φορά στον πίνακα αποκωδικοποίησης.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν τέσσερα πιθανά μηνύματα a, b, c και d και ότι το μήνυμα μεταδίδεται χρησιμοποιώντας έναν δυαδικό block κώδικα με μήκος πέντε. Στη συνέχεια, τέσσερις κωδικές λέξεις πρέπει να επιλεγούν, έστω 11000 για το a , 00110 για το b , 10011 για το c και 01101 για το d . Ένα παράδειγμα για το πώς μπορεί να γίνει αυτό φαίνεται στον παρακάτω πίνακα αποκωδικοποίησης για έναν δυαδικό κώδικα με $q=k=2$ και $n=5$.

Κωδικές Λέξεις 1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1

Άλλες ληφθείσες λέξεις 1 1 0 0 1 0 0 1 1 1 1 0 0 1 0 0 1 1 0 0

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

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

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

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

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

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

Οι κανόνες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης, αποκωδικοποιούν σωστά μια λέξη η οποία δεν θα έχει περισσότερα από ένα λάθη, δηλαδή περισσότερα από ένα αλλαγμένα σύμβολα, μια και κάθε μια από τις πέντε λέξεις οι οποίες θα είχαν ως αποτέλεσμα ένα μοναδικό λάθος βρίσκονται κάτω από κάθε μια κωδική λέξη. Όμως, δεν αποκωδικοποιούνται σωστά όλα τα μοτίβα λαθών. Για παράδειγμα, εάν μεταδοθεί το 11000 και συμβούν δύο λάθη οδηγώντας έστω στο 11110 η λέξη θα αποκωδικοποιηθεί σωστά γιατί το 11110 είναι στην στήλη κάτω από το 11000 στον πίνακα. Όμως, αν σε άλλη περίπτωση τα δύο λάθη έχουν σαν αποτέλεσμα να λάβουμε την 11011, θα αποκωδικοποιηθεί λανθασμένα σε 10011, επειδή το 11011 είναι στην στήλη κάτω από το 10011.

Σε μερικές περιπτώσεις, είναι δυνατό ο αποκωδικοποιητής να είναι σε θέση να δηλώσει απλά ότι υπάρχει λάθος στην κωδική λέξη που λήφθηκε χωρίς όμως να μπορεί να υποδείξει ποια ήταν η κωδική λέξη που εστάλη. Αυτό μπορεί να πάρει την μορφή ενός συστήματος εντοπισμού λαθών, στο οποίο ο αποκωδικοποιητής δίνει το σήμα ότι υπάρχει λάθος αλλά δεν πράττει τίποτε πιο πέρα εκτός και αν ληφθεί μια κωδική λέξη. Επιπρόσθετα, μπορεί να συνδυαστεί ο εντοπισμός λάθους με την διόρθωση σφαλμάτων.

Για παράδειγμα, για τον κώδικα ο οποίος φαίνεται στον πίνακα κάθε ληφθείσα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί στην κωδική λέξη στην κορυφή της στήλης, αλλά ο αποκωδικοποιητής δεν θα μπορέσει να εντοπίσει λάθη για τις λέξεις που λαμβάνονται κάτω από αυτή τη γραμμή. Αυτό αντιστοιχεί σε διόρθωση μοναδικού λάθους με εντοπισμό μερικών συνδυασμών δύο ή περισσότερων λαθών (Μπαμπάνη, 2014).

3.3 Γραμμικοί κώδικες

Ένας δυαδικός block κώδικας είναι γραμμικός κώδικας $C(n, k)$ και ορίζεται πλήρως από $M=2^k$ δυαδικές ακολουθίες μήκους n που ονομάζονται κωδικές λέξεις. Ένας κώδικας C , συνίσταται από M κωδικές λέξεις c_i με $1 \leq i \leq M$, $C=\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ όπου c_i είναι μια ακολουθία μήκους n με όρους που παίρνουν τιμές 0 ή 1.

Πριν ξεκινήσουμε την παρουσίαση των γραμμικών κωδίκων πρέπει να κάνουμε αναφορά στις βασικές έννοιες τους.

Ξεκινάμε θεωρώντας έναν κώδικα C ως γραμμικό. Κάθε πίνακας, του οποίου οι γραμμές αποτελούν μια βάση του κώδικα C , ονομάζεται γεννήτορας πίνακας για τον C . Το πλήθος των γραμμών του γεννήτορα πίνακα είναι ίσο με τη διάσταση του C , δηλαδή το πλήθος των λέξεων που απαρτίζουν μια βάση του. Αν η διάσταση ενός κώδικα C συμβολίζεται με k , το μήκος των κωδικών λέξεων είναι n και η απόστασή του d , τότε χαρακτηρίζουμε τον C και ως (n, k, d) γραμμικό κώδικα.

Για έναν κώδικα C που ονομάζεται γραμμικός κάθε x και y που ανήκουν στο σύνολο C , τότε και το άθροισμά τους $(x + y)$, θα ανήκει στο C . Παραδείγματος χάριν, ο κώδικας $C = \{00, 11\}$ είναι γραμμικός, αφού $00 + 00 = 00$, $00 + 11 = 11$, $11 + 00 = 11$ και $11 + 11 = 00$ είναι κωδικές λέξεις. Όμως, ο κώδικας $C = \{00, 10, 11\}$ δεν είναι γραμμικός, αφού η $11 + 10 = 01$ δεν είναι κωδική λέξη. Κάθε γραμμικός κώδικας πρέπει να περιέχει τη μηδενική λέξη, αφού το άθροισμα μιας οποιασδήποτε κωδικής λέξης με τον εαυτό της δίνει τη μηδενική λέξη.

Αν G είναι ένας γεννήτορας πίνακας για έναν κώδικα C , τότε κάθε πίνακας ισοδύναμος του G , ως προς τις γραμμές, είναι γεννήτορας πίνακας για τον C . Για την εύρεση, βεβαίως, ενός γεννήτορα πίνακα για κάποιον κώδικα C , αρκεί να βρούμε μια βάση του.

Ο πίνακας ελέγχου ισοτιμίας σχετίζεται με ένα γραμμικό κώδικα C και συνδέεται με το γεννήτορα πίνακα. Ο πίνακας ελέγχου ισοτιμίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκωδικοποίηση κωδικοποιημένων μηνυμάτων.

Οι κώδικες Hamming είναι μια οικογένεια κωδίκων, οι οποίοι επιτρέπουν εύκολη κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση και τη διόρθωση κάθε μεμονωμένου σφάλματος (απλού σφάλματος). Οι κώδικες αυτοί προτάθηκαν το 1950 από τον R.W. Hamming.

Ένας κώδικας μήκους $n = 2r - 1$ ($r \geq 2$) και πίνακα ελέγχου ισοτιμίας H , ο οποίος (H) απαρτίζεται από όλες τις δυνατές μη μηδενικές λέξεις μήκους r , ονομάζεται κώδικας Hamming μήκους $2r - 1$.

Παραδείγματος χάριν, ένας πίνακας ελέγχου ισοτιμίας ενός κώδικα Hamming, μήκους $2r - 1$ με $r = 3$, άρα μήκους 7 θα μπορούσε να είναι ο ακόλουθος:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Από τον πίνακα H μπορούμε, ακολουθώντας με αντίστροφη σειρά τα βήματα της διαδικασίας σχηματισμού του H από το γεννήτορα πίνακα G να σχηματίσουμε ένα γεννήτορα πίνακα G του κώδικα. Έτσι λοιπόν, από τον H μπορούμε να σχηματίσουμε τον ακόλουθο G :

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Επομένως, ο κώδικας έχει διάσταση $k = 4$.

Η κωδικοποίηση, χρησιμοποιείται στα συστήματα επικοινωνίας, κατά κύριο λόγο, για να αυξηθεί η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των μεταδιδόμενων σημάτων και έτσι να μειωθεί η πιθανότητα σφάλματος για δεδομένη ισχύ μετάδοσης, πράγμα που είδαμε με παράδειγμα στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό το πετυχαίνουμε διαλέγοντας τις κωδικές λέξεις έτσι ώστε να βρίσκονται όσο μακριά γίνεται η μία από την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι ένα καλό μέτρο για να συγκρίνουμε την επίδοση δύο κωδικών είναι η απόσταση Hamming μεταξύ των κωδικών λέξεων. Αλλά το να εξετάζουμε όλες τις αποστάσεις μεταξύ των κωδικών λέξεων είναι δύσκολο και σε αρκετές περιπτώσεις

αδύνατο. Έτσι, η σύγκριση μεταξύ κωδίκων γίνεται συνήθως με βάση την ελάχιστη απόσταση ενός κώδικα, που για τους γραμμικούς κώδικες είναι ίση με το ελάχιστο βάρος. Έτσι, με δεδομένα τα n και k , ένας κώδικας με μεγαλύτερη απόσταση d_{\min} (ή w_{\min}) έχει συνήθως καλύτερη επίδοση από έναν κώδικα με μικρότερη απόσταση (Μπαμπάνη, 2014).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των γραμμικών κωδικών σε σύγκριση με τους μη γραμμικούς είναι τα παρακάτω:

- Η απόσταση του κώδικα είναι ίση με το ελάχιστο των βαρών των μη μηδενικών κωδικών λέξεων.
- Η κωδικοποίηση ενός γραμμικού κώδικα είναι πιο απλή και έχει μικρότερες αποθηκευτικές απαιτήσεις.
- Η περιγραφή των συνόλων των προτύπων σφάλματος που ανιχνεύει ή διορθώνει ένας κώδικας είναι πιο εύκολη στην περίπτωση των γραμμικών από ό,τι στη γενική περίπτωση.

Γενικά, ένας οποιοσδήποτε κώδικας που χρησιμοποιείται για κωδικοποίηση καναλιού είναι μία συνάρτηση ή ισοδύναμα μια μία-προς-μία απεικόνιση στοιχείων από ένα σύνολο A σε ένα σύνολο B . Το σύνολο A αποτελείται από τα στοιχεία τα οποία ονομάζουμε λέξεις πληροφορίας και συμβολίζουμε με u_i όπου $i=1,2,\dots,M$, ενώ το σύνολο B αποτελείται από τα στοιχεία τα οποία ονομάζουμε κωδικές λέξεις, ή codewords, και συμβολίζουμε με c_i . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε ότι όλες οι λέξεις πληροφορίας έχουν σταθερό μήκος k ψηφίων. Το δυνατό πλήθος των λέξεων είναι $M=2^k$ (θεωρούμε ότι έχουμε δυαδικές λέξεις, δηλαδή τα ψηφία μπορούν να πάρουν την τιμή 0 ή 1). Εφόσον ορίσαμε τον κώδικα σαν μία-προς-μία απεικόνιση στοιχείων προκύπτει ότι και το πλήθος των κωδικών λέξεων θα είναι M . Γενικά όμως οι κωδικές λέξεις δεν είναι του ίδιου μήκους με τις λέξεις πληροφορίας αλλά μεγαλύτερου μήκους, έστω n , καθώς έχουν προστεθεί κάποια bits πλεονασμού. Συνεπώς, μόνο ένα μέρος (M για την ακρίβεια) των 2^n δυνατών λέξεων ($2^n > 2^k$, αφού $n > k$) είναι κωδικές λέξεις, οι οποίες ονομάζονται έγκυρες κωδικές λέξεις.

Ο κωδικοποιητής καναλιού τροφοδοτείται από την έξοδο του κωδικοποιητή πηγής, ο οποίος παράγει σύμβολα με ένα σταθερό ρυθμό. Έτσι έχουμε στην έξοδο του κωδικοποιητή πηγής μια συνεχόμενη ροή δεδομένων. Για τη λειτουργία όμως ενός γραμμικού block κωδικοποιητή, θα πρέπει η ροή αυτή να τεμαχιστεί σε πακέτα ή λέξεις σταθερού μήκους και μετά να επεξεργαστεί από τον κωδικοποιητή ενώ σε διαφορετικού τύπου κωδικοποιητές δεν είναι απαραίτητη η προϋπόθεση αυτή. Για αυτό το λόγο, γίνεται εμφανές ότι οι γραμμικοί block κώδικες οφείλουν το όνομά τους στο γεγονός ότι τα δεδομένα στην είσοδό τους πρέπει αυστηρώς να τεμαχίζονται σε λέξεις ή blocks σταθερού μήκους. Κατά απόλυτη αντιστοιχία, η έξοδος του κωδικοποιητή πηγής ενός γραμμικού block κώδικα είναι και αυτή στη μορφή λέξης σταθερού μήκους. Θεωρούμε ότι το μήκος της λέξης εισόδου στον κωδικοποιητή είναι k bits ενώ το μήκος της λέξης εξόδου είναι n bits, όπου $k < n$.

Η μετατροπή της αρχικής λέξης των k bits (λέξη πληροφορίας) σε λέξη των n bits (κωδική λέξη) αποτελεί τη διαδικασία της κωδικοποίησης (encoding). Αυτή πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός $k \times n$ δυαδικού πίνακα G , ο οποίος ονομάζεται γεννήτορας πίνακας του κώδικα. Η κωδική λέξη παράγεται με τον πολλαπλασιασμό της λέξης πληροφορίας με τον γεννήτορα πίνακα, κάτι το οποίο εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$c_i = u_i \otimes G$$

Κάθε κωδική λέξη c_i , λόγω του τρόπου δημιουργίας της που μόλις περιγράφηκε, έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Αυτά μπορούμε να τα χαρακτηρίσουμε σαν την ικανοποίηση μιας σειράς εξισώσεων που ισοδύναμα καθορίζουν ποια από τις 2^n δυνατές λέξεις μήκους n είναι έγκυρη κωδική λέξη. Συνθέτοντας όλες αυτές τις εξισώσεις που θα πρέπει να ικανοποιούν οι κωδικές λέξεις δημιουργούμε έναν πίνακα ο οποίος ονομάζεται πίνακας ελέγχου ισοτιμίας (parity check matrix) και συμβολίζεται με H . Ο έλεγχος τώρα της εγκυρότητας μιας κωδικής λέξης γίνεται από την εξίσωση:

$$c_i \otimes H^T = 0$$

Η επαναληπτική διαδικασία εύρεσης μιας κωδικής λέξης που να ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης, η οποία απαιτεί πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική πολυπλοκότητα (Αγγελόπουλος, 2009).

3.4 Κυκλικοί κώδικες

Μια ειδική κατηγορία γραμμικών κωδίκων είναι οι κυκλικοί κώδικες. Επειδή στη μελέτη των κυκλικών κωδίκων θα μας διευκολύνει η παράσταση των λέξεων με πολυώνυμα, πριν προχωρήσουμε θα φρεσκάρουμε κάποιες γνώσεις μας για τα πολυώνυμα μιας μεταβλητής.

Μία λέξη a μήκους n , αποτελούμενη από τα bits $a_0 a_1 a_2 \dots a_{n-1}$, παριστάνεται ως ένα πολυώνυμο βαθμού $(n - 1)$ με συντελεστές στο σύνολο $K = \{0, 1\}$: $a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1}$. Το σύνολο όλων των πολυωνύμων με συντελεστές στο K συμβολίζεται με $K[x]$. Πολυώνυμα, στοιχεία του $K[x]$, συμβολίζονται με $f(x)$, $p(x)$, $q(x)$, $r(x)$, κ.ο.κ.

Οι πράξεις του πολλαπλασιασμού και της πρόσθεσης μεταξύ πολυωνύμων του $K[x]$ εμφανίζουν μια διαφορά από τις αντίστοιχες πράξεις μεταξύ πολυωνύμων με συντελεστές στο σύνολο των ακεραίων ή πραγματικών αριθμών, αφού οι δυνατοί συντελεστές είναι μόνο το 0 και 1. Η διαφορά έγκειται στο ότι το άθροισμα δύο συντελεστών ίσων με 1 δίνει 0, δηλαδή $1 + 1 = 0$ και επομένως $x^n + x^n = (1 + 1)x^n = 0$.

Αν $f(x)$, $g(x)$ ανήκουν στο $K[x]$, με $g(x)$ διάφορο του 0, τότε υπάρχουν τα μοναδικά πολυώνυμα $q(x)$, $r(x)$ που ανήκουν στο $K[x]$, τέτοια ώστε $f(x) = q(x) \cdot g(x) + r(x)$, όπου $r(x) = 0$ ή ο βαθμός του είναι μικρότερος του βαθμού του $g(x)$. Το $q(x)$ είναι το πηλίκο και το $r(x)$ είναι το υπόλοιπο.

Επίσης, θα χρειαστούμε τις γνώσεις μας για τα πεπερασμένα πεδία που θα μας χρησιμεύσουν στη μελέτη των κωδίκων BCH.

Πολυωνυμικές ισοτιμίες με μέτρο ένα πολυώνυμο $g(x)$ μπορούν να αξιοποιηθούν στην κατασκευή κωδίκων, την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός πολυωνύμων modulo ένα πολυώνυμο $g(x)$ βαθμού n μπορεί να αξιοποιηθεί για την εκτέλεση των αντίστοιχων πράξεων μεταξύ λέξεων μήκους n , δηλαδή λέξεων στο K^n . Ιδιαίτερα, επιλέγοντας κατάλληλο μέτρο ισοτιμίας, δηλαδή το πολυώνυμο $g(x)$ μη αναγόμενο (irreducible) στο $K = \{0,1\}$ και βαθμού n , δημιουργούμε ένα πεπερασμένο πεδίο $GF(2^n)$. Αν δε το μέτρο ισοτιμίας είναι ένα πρωτογενές (primitive) πολυώνυμο, τότε οι υπολογισμοί στο $GF(2^n)$ γίνονται πιο εύκολοι.

Η κυκλική μετατόπιση $\kappa(x)$ μιας λέξης x είναι η λέξη y που έχει ως πρώτο ψηφίο της το τελευταίο ψηφίο της x και τα υπόλοιπα ψηφία της προκύπτουν με απλή μετατόπιση κατά μία θέση προς τα δεξιά όλων των ψηφίων της x . Για παράδειγμα, $\kappa(010011) = 101001$ και $\kappa(101001) = 110100$. Με τη βοήθεια της συνάρτησης της κυκλικής μετατόπισης μπορούμε να ορίσουμε τους κυκλικούς κώδικες. Έτσι ένας γραμμικός κώδικας C καλείται κυκλικός αν η κυκλική μετατόπιση κάθε κωδικής λέξης είναι και αυτή κωδική λέξη.

Για ένα γραμμικό κώδικα μπορούμε να βρούμε διάφορους γεννήτορες πίνακες. Στην περίπτωση των κυκλικών κωδίκων, ο πιο απλός γεννήτορας πίνακας είναι εκείνος που έχει ως γραμμές τις λέξεις που αντιστοιχούν στο πολυώνυμο – γεννήτορα του κώδικα και τις πρώτες $k - 1$ κυκλικές μετατοπίσεις του.

Ας δούμε τώρα πώς επιτυγχάνεται η αποκωδικοποίηση.

Θα μπορούσαμε να ορίσουμε τον πίνακα ελέγχου ισοτιμίας H , του οποίου η γραμμή i_j μήκους $n - k$ αντιστοιχεί στο πολυώνυμο $i_j(x) = x^j \text{ mod } \gamma(x)$, καθώς επίσης και την ΤΔΑ (Ο πίνακας που περιέχει τα σύνδρομα και τους οδηγούς (τις λέξεις ελάχιστου βάρους) όλων των συνομάδων καλείται τυπική διάταξη αποκωδικοποίησης (ΤΔΑ, standard decoding array)). Έτσι, η αποκωδικοποίηση θα συνίστατο κάθε φορά στον υπολογισμό του συνδρόμου της ληφθείσας λέξης, στην εύρεση του αντίστοιχου προτύπου σφάλματος από την ΤΔΑ και στον υπολογισμό της κωδικής λέξης που μεταδόθηκε (άθροισμα της ληφθείσας λέξης με το πρότυπο σφάλματος).

Όμως, στους κυκλικούς κώδικες μπορούν να αξιοποιηθούν ορισμένες συμμετρίες, οι οποίες επιτρέπουν μια πιο απλή διαδικασία αποκωδικοποίησης που δε βασίζεται στην ΤΔΑ (Ζορκάδης, 2002).

Οι κώδικες BCH (Bose, Chaundhuri, Hocquenghem) αποτελούν μία μεγάλη κατηγορία ισχυρών κυκλικών κωδίκων. Αποτελούν ακόμα μία γενίκευση των κωδίκων Hamming για πολλαπλή διόρθωση σφαλμάτων. Οι κώδικες BCH μπορεί να είναι είτε δυαδικοί είτε μη δυαδικοί με $p = m$ σύμβολα. Μία ειδική περίπτωση αυτής της υποκατηγορίας των μη δυαδικών κωδίκων είναι οι κώδικες Reed-Solomon (RS), στους οποίους θα γίνει στη συνέχεια μία μικρή αναφορά. Για ένα οποιοδήποτε θετικό ακέραιο m ($m \geq 3$) και t ($t < 2m-1$) υπάρχει ένας δυαδικός BCH κώδικας με τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Μήκος μπλοκ: $n = 2^m - 1$
- Πλήθος ψηφίων ελέγχου ισοτιμίας: $n - k \leq mt$
- Ελάχιστη απόσταση: $d_{\min} \geq 2t + 1$

Είναι εμφανές ότι αυτό το είδος κώδικα είναι ικανό να διορθώσει οποιοδήποτε συνδυασμό t ή λιγότερων σφαλμάτων σε ένα μπλοκ μήκους $n=2^m -1$ ψηφίων. Το πολυώνυμο γεννήτορας αυτού του κώδικα χαρακτηρίζεται με βάση τις ρίζες του από ένα πεδίο Galois το $GF(2^m)$.

Οι κώδικες Reed-Solomon αποτελούν μία σημαντική κατηγορία των μη δυαδικών BCH κωδίκων. Δεδομένου ενός πρώτου αριθμού p , αν θεωρήσουμε q μια δύναμη του p , είναι δυνατόν να κατασκευαστούν κώδικες με σύμβολα που ανήκουν στο Galois πεδίο $GF(q)$. Αυτοί οι κώδικες ονομάζονται q -αδικοί κώδικες (Γκίκα, 2012).

3.5 Συνελικτικοί κώδικες

Οι συνελικτικοί κώδικες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από τη δεκαετία του 70 και μετά, κυρίως σε τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις που υποφέρουν από ισχυρό Gaussian προσθετικό θόρυβο. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα καθώς με το πέρασμα των χρόνων

έχουν αναπτυχτεί αλγόριθμοι αποκωδικοποίησης με πολύ καλές επιδόσεις καθώς και αποδοτικές αρχιτεκτονικές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής τους αποτελούν οι δορυφορικές επικοινωνίες αν και έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς πολλές φορές σε συνδυασμό με μεθόδους καταπολέμησης άλλων επιδεινώσεων του σήματος. Οι συνελκτικοί κώδικες στην ουσία είναι γραμμικοί κώδικες που έχουν τέτοια δομή όσον αφορά τον γεννήτορα πινάκα ώστε η κωδικοποίηση να απαιτεί ένα πλήθος από ψηφιακά φίλτρα γραμμικά και χρονικώς ανεξάρτητα, με την κωδική λέξη να προκύπτει ως αποτέλεσμα δειγματοληψίας των εξόδων του φίλτρου.

Ένας συνελκτικός κωδικοποιητής ισοδυναμεί με μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένας συνελκτικός κώδικας έχει πεπερασμένη μνήμη και άρα μπορούν να παρατηρηθούν μεταβάσεις σε έναν συγκεκριμένο αριθμό μοναδικών καταστάσεων.

Αξίζει να γίνει μία αναφορά στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί ένας συνελκτικός κώδικας.

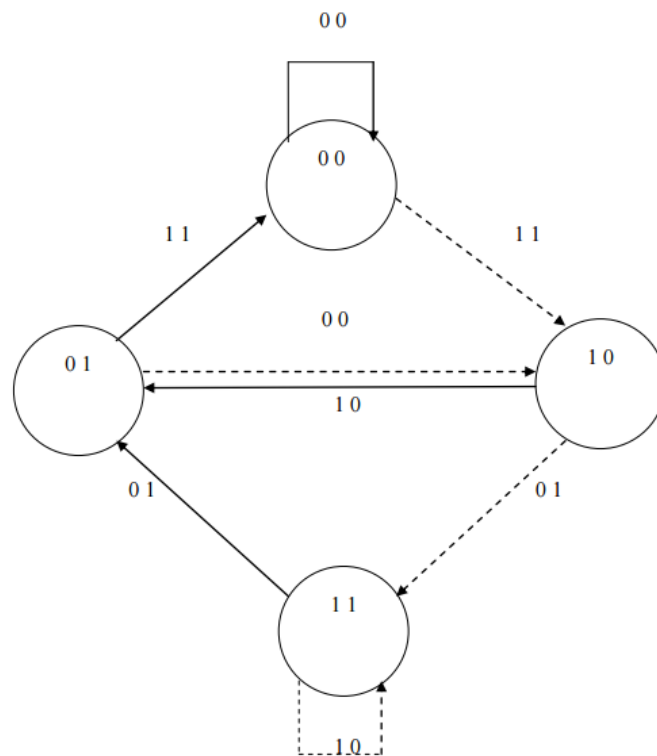
Παρακάτω θα δούμε 3 διαφορετικές τεχνικές.

3.5.1 Διάγραμμα μετάπτωσης καταστάσεων

Στο διάγραμμα αυτό, κάθε κατάσταση του συνελκτικού κώδικα μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα τετράγωνο (ή έναν κύκλο) και οι μεταπτώσεις (μεταβάσεις) μεταξύ των καταστάσεων δηλώνονται με βέλη που συνδέουν τα τετράγωνα (κύκλους), προσδιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις αφίξεις προς ή τις αποχωρήσεις από την κατάσταση. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε βέλος προσδιορίζονται τόσο η είσοδος του κωδικοποιητή που προκάλεσε την συγκεκριμένη μετάβαση όσο και η έξοδος του κωδικοποιητή). Συνοψίζοντας, ο κωδικοποιητής βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και δεχόμενος μια είσοδο μεταβαίνει σε μια κατάσταση (μπορεί να είναι και η ίδια) και παράγει την έξοδό του. Αυτό που επίσης πρέπει να επισημανθεί είναι ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας από μία κατάσταση προς όλες τις καταστάσεις. Μία ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι

ότι το πλήθος των βελών που εξέρχονται από κάθε κατάσταση ισούται με το πλήθος των δυνατών εισόδων του κωδικοποιητή όταν βρίσκεται στην κατάσταση αυτή. Τέλος, το πλήθος των βελών που συγκλίνουν προς κάθε κατάσταση είναι ίσο με το πλήθος των καταστάσεων από τις οποίες είναι δυνατή μια μετάπτωση προς την κατάσταση αυτή. Να επισημανθεί, ότι στο διάγραμμα καταστάσεων που ακολουθεί τα διακεκομμένα βέλη αναπαριστούν μεταβάσεις που προκλήθηκαν λόγω εισόδου 0, και τα βέλη με συνεχή γραμμή αναπαριστούν μεταβάσεις που προκλήθηκαν λόγω εισόδου 1. Έτσι, παρακάτω βλέπουμε να παρουσιάζεται ένα διάγραμμα καταστάσεων για τον κωδικοποιητή του παραδείγματός μας.

Ένα πρόβλημα που υπάρχει με την αναπαράσταση με χρήση του Διαγράμματος Καταστάσεων είναι ότι δεν μπορούσε να αναπαραστήσει το χρόνο. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την χρήση του Δεντρικού Διαγράμματος που θα δούμε ως επόμενη τεχνική.



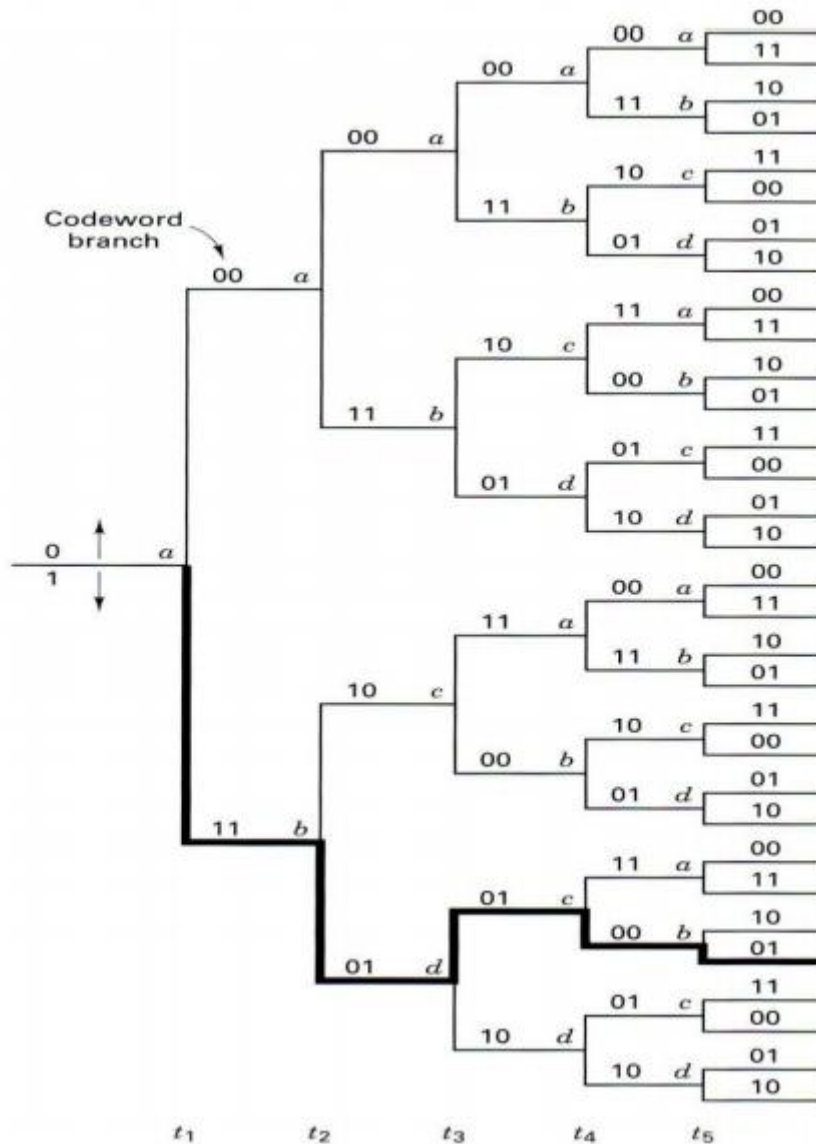
Πηγή: Μπαμπάνη, 2014

Σχήμα 3.3: Διάγραμμα μετάπτωσης καταστάσεων

3.5.2 Δεντρικό διάγραμμα

Το Δεντρικό διάγραμμα προσθέτει την διάσταση του χρόνου στην αναπαράσταση. Αν ξεκινήσουμε από την ρίζα του δέντρου, σε κάθε βήμα της κωδικοποίησης, προχωράμε προς τα δεξιά και πάνω εάν είναι μηδέν (0) η είσοδος του κωδικοποιητή ή δεξιά και κάτω εάν είναι ένα (1) η είσοδος του κωδικοποιητή. Επιπλέον, σε κάθε κόμβο του δέντρου αναγράφεται η τρέχουσα κατάσταση του κωδικοποιητή. Σε κάθε κλαδί του δέντρου αναγράφεται η λέξη εξόδου, η οποία είναι αποτέλεσμα της παραγωγής από τον κωδικοποιητή κατά την συγκεκριμένη μετάβαση.

Μπορεί η αναπαράσταση με την χρήση Δεντρικού Διαγράμματος να έδωσε λύση στο πρόβλημα του χρόνου, όμως εισήγαγε ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα: επειδή είναι δυναμικό, το μέγεθός του μετά από λίγες χρονικές στιγμές αυξάνεται υπερβολικά πολύ. Το γεγονός αυτό καθιστά την χρήση Δεντρικών Διαγραμμάτων απαγορευτική. Ας αναλογιστούμε το εξής: Για δυαδικούς συνελκτικούς κώδικες με $k=1$ σε κάθε χρονική στιγμή φεύγουν δύο διακλαδώσεις, κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι στην i -στη χρονική στιγμή θα έχουν προκύψει 2^{i-1} κόμβοι.



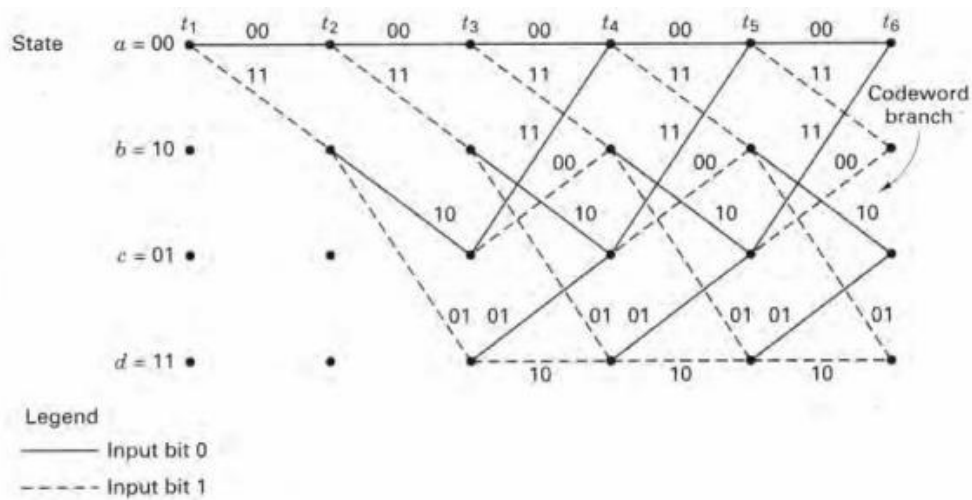
Πηγή: Μπαμπάνη, 2014

Σχήμα 3.4: Δεντρικό διάγραμμα

3.5.3 Διάγραμμα δικτυώματος

Το διάγραμμα δικτυώματος αποτελεί την τρίτη και πιο δημοφιλή μέθοδο για την περιγραφή των συνελκτικών κωδίκων. Το διάγραμμα trellis αποτελεί έναν τρόπο παρουσίασης των μεταπτώσεων μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων, καθώς εξελίσσεται ο χρόνος. Ο τρόπος κατασκευής του διαγράμματος trellis είναι ο εξής: Τοποθετούμε σε έναν κατακόρυφο άξονα όλες τις δυνατές καταστάσεις και

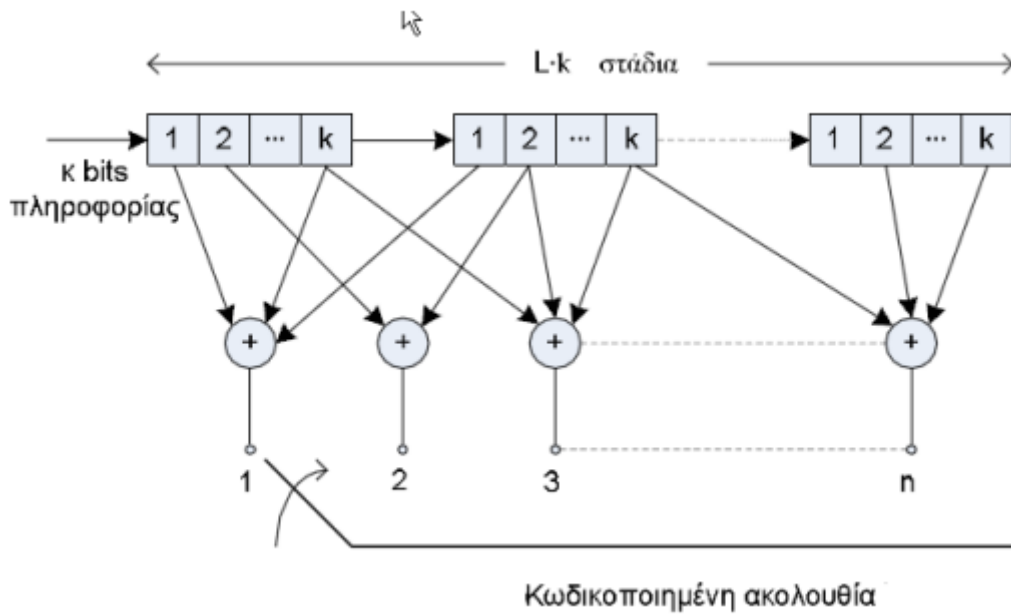
επαναλαμβάνουμε τον άξονα αυτό για κάθε χρονική περίοδο μετάπτωσης (μετάβασης). Κάθε μετάπτωση (μετάβαση) από μια κατάσταση σε μία άλλη αναπαρίσταται με ένα ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τα παραστατικά σημεία των δύο καταστάσεων σε δύο διαδοχικούς κατακόρυφους άξονες. Θα μπορούσε κανείς να αναφέρει ότι το διάγραμμα trellis αποτελεί επανάληψη του διαγράμματος καταστάσεων στον άξονα του χρόνου. Στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα trellis που αντιστοιχεί στο παράδειγμά μας. Με βέλη διακεκομμένα συμβολίζονται οι μεταβάσεις προκαλούμενες λόγω εισόδου ένα (1) και με συνεχόμενα βέλη οι μεταβάσεις που προκαλούνται λόγω εισόδου μηδέν (0). [1,2,3,5,10]



Πηγή: Μπαμπάνη, 2014

Σχήμα 3.5: Διάγραμμα δικτύωματος

Πάμε όμως να δούμε πως λειτουργούν οι συνελκτικοί κώδικες. Στους συνελκτικούς κώδικες (convolutional codes) σε αντίθεση με τους κώδικες που εξετάσαμε στις προηγούμενες ενότητες, τα ψηφία εξόδου του κωδικοποιητή σε μια χρονική στιγμή δεν εξαρτώνται μόνο από τα ψηφία εισόδου αυτής της χρονικής στιγμής αλλά και από προηγούμενα. Η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση στους συνελκτικούς κώδικες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση απλών ολισθητών καταχωρητών, όπως άλλωστε και η πολυωνυμική κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση όπως στην περίπτωση των κυκλικών κωδίκων (Ζορκάδης, 2002).

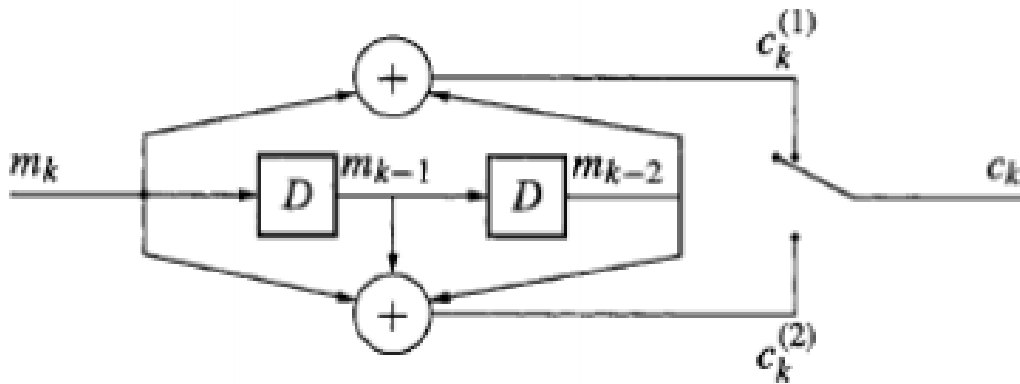


Σχήμα 3.6: Κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση στους συνελκτικούς κώδικες

Παρακάτω θα προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε την λειτουργία των συνελκτικών κώδικων. Ο συνελκτικός κωδικοποιητής τροφοδοτείται συνεχώς με σύμβολα τα οποία όπως έχουμε ήδη πει δεν διαχωρίζονται σε μπλοκ ενώ κάθε χρονική στιγμή δειγματολειτουργούν οι έξοδοι του κωδικοποιητή που προκύπτουν ως modulo-2 άθροιση του τρέχοντος συμβόλου με προηγούμενα. Χρησιμοποιείται η σύμβαση ότι πρόκειται για κώδικες με ρυθμό $R=k/n$ δεχόμενοι ότι k καινούρια σύμβολα εισόδου σε δεδομένα χρονικά διαστήματα παράγουν n σύμβολα εξόδου. Γενικά κάθε ακολουθία από σύμβολα $m(x) = [\dots, m_{-2}, m_{-1}, m_0, m_1, m_2, m_3, \dots]$ που εισέρχεται στον συνελκτικό κωδικοποιητή μπορεί να περιγράψει ως μια σειρά δυνάμεων μιας μεταβλητής x με τιμές από ένα πεδίο F . Μια τέτοια ακολουθία μπορεί να περιγράψει και ως μια σειρά Laurent ορίζεται το άθροισμα $m(x)$ με το l να παίρνει τιμές από μείον άπειρο έως συν άπειρο. Το πλήθος όλων των σειρών Laurent στο F είναι πεδίο το οποίο δηλώνεται ως $F[[x]]$. Έτσι ισχύει ότι το $m(x) \in F[[x]]$. Για πολλαπλές εισόδους χρησιμοποιείται η αναπαράσταση $m(x) = [m(1)(x) \ m(2)(x)]$ για τις επιμέρους ακολουθίες με την τελική να γράφεται ως $m(x) = [m(1)(x) \ m(2)(x)] \in F[[x]]^2$.

Η είσοδος-ακολουθία $m(x)$ περνάει διαμέσου δυο φίλτρων που μοιράζονται στοιχεία μνήμης παράγοντας τις δυο κωδικοποιημένες εξόδους. Ο ρυθμός του κώδικα είναι

$R=1/2$. Οι δυο ακολουθίες που προκύπτουν στην έξοδο interleaved και παράγουν την τελική έξοδο c_k . Παρακάτω βλέπουμε την αναπαράσταση του συνελεκτικού κώδικα που περιγράφουμε:



Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση του συνελεκτικού κώδικα

Την σχέση μεταξύ εισόδου-εξόδου μπορούμε να την αναπαραστήσουμε μέσω συνάρτησης μεταφοράς. Έτσι έχουμε $c(1)(x) = g(1)(x)m(x)$ καθώς και $c(2)(x) = g(2)(x)m(x)$. Κάθε ακολουθία εισόδου και εξόδου μπορούμε να την αναπαραστήσουμε με ένα πολυώνυμο όπου οι συντελεστές τους ανήκουν στο πεδίο $GF(q)$ ανάλογα του πλήθους των bits που αντιστοιχούν σε κάθε σύμβολο της ακολουθίας εισόδου. Με όμοιο τρόπο αναπαρίστανται και οι συναρτήσεις μεταφοράς. Θα δώσουμε ένα παράδειγμα χρησιμοποιώντας τον κωδικοποιητή του παραπάνω σχήματος και δεχόμενοι ότι ένα σύμβολο εισόδου είναι ένα bit. Μια ακολουθία εισόδου $m=\{1,1,0,0,1,0,1\}$, αναπαριστάται ως $m(x) = 1 + x + x^4 + x^6 \in GF(2)[[x]]$. Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι οι: $g(1)(x) = 1 + x^2$, $g(2)(x) = 1 + x + x^2$. Οι έξοδοι που προκύπτουν είναι:

$$c(1)(x) = m(x)g(1)(x) = (1 + x + x^4 + x^6)(1 + x^2) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^8$$

$$c(2)(x) = m(x)g(2)(x) = (1 + x + x^4 + x^6)(1 + x + x^2) = 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^7 + x^8$$

Οι έξοδοι τελικά είναι οι:

$$c(1)(x)=\{1,1,1,1,1,0,0,0,1\}, c(2)(x)=\{1,0,0,1,1,1,0,1,1\}$$

Γενικά ένας κωδικοποιητής συνελκτικού κώδικα με ρυθμό $R=k/n$ σχετίζεται με ένα $k \times n$ πίνακα συνάρτησης μεταφοράς $G(x)$.

Παρατηρούμε ότι οι επιμέρους συναρτήσεις μεταφοράς του παραπάνω πίνακα συνάρτησης μεταφοράς είναι πολυωνυμικές Ένας τέτοιος κωδικοποιητής λέγεται FIR η feed forward κωδικοποιητής. Αντίθετα όταν οι επιμέρους συναρτήσεις μεταφοράς του πίνακα είναι κλασματικές με αριθμητή και παρονομαστή πολώνυμα ο κωδικοποιητής ονομάζεται IIR η feedback κωδικοποιητής. Άλλη μια ιδιότητα που σχετίζεται άμεσα με τον πίνακα συνάρτησης μεταφοράς είναι αν ο κωδικοποιητής είναι συστηματικός η όχι. Ένας κωδικοποιητής γενικά λέγεται συστηματικός αν η είσοδος του εμφανίζεται στην εξόδου του ξεκάθαρα με την ίδια μορφή. Συνήθως σε συστηματικούς κωδικοποιητές το πρώτο τμήμα της κωδικής λέξης είναι η είσοδος και ακολουθεί το τμήμα με την πλεονάζουσα πληροφορία. Στους συνελκτικούς κώδικες προκειμένου ο κωδικοποιητής να είναι συστηματικός πρέπει ο πίνακας συνάρτησης μεταφοράς να έχει την εξής μορφή:

$$G(x) = [I_k \mid G_k] \text{ όπου } I_k \text{ είναι ο μοναδιαίος πίνακας.}$$

Γενικά για κάθε συνελκτικό κώδικα που έχει κλασματικούς όρους στην συνάρτηση μεταφοράς υπάρχει ο ισοδύναμος του, ο οποίος στην συνάρτηση μεταφοράς έχει μόνο πολυωνυμικούς όρους ωστόσο υπάρχει το ενδεχόμενο ο ισοδύναμος κώδικας να μην είναι και συστηματικός που σε αρκετές περιπτώσεις είναι χρήσιμο να είναι. Γενικά δυο κώδικες είναι ισοδύναμοι αν οι συναρτήσεις μεταφοράς τους παράγουν τον ίδιο κώδικα στην έξοδο. Για να είναι δυο συναρτήσεις μεταφοράς $G_1(x)$, $G_2(x)$ ισοδύναμες πρέπει να ισχύει $G_1(x) = T(x)G_2(x)$ όπου ο πίνακας $T(x)$ να μην αντιστρέψιμος. Άλλο επίσης σημαντικό στοιχείο όσον αφορά τον κωδικοποιητή είναι το πλήθος των στοιχείων μνήμης που χρησιμοποιούνται. Προφανώς προτιμούνται κωδικοποιητές μεταξύ ισοδύναμων κωδικών με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων μνήμης και καταστάσεων.

Για την αποκωδικοποίηση των συνελκτικών κωδικών έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι. Μεταξύ των σημαντικότερων είναι ο αλγόριθμος Viterbi βασική αρχή του οποίου είναι η μεγιστοποίηση της πιθανοφάνειας της ακολουθίας. Μια παραλλαγή αυτού του αλγορίθμου (SOVA) μπορεί επίσης να παρέχει και μια ένδειξη

της αξιοπιστίας των αποκωδικοποιημένων συμβόλων που προκύπτουν. Άλλος αλγόριθμος αποκωδικοποίησης ο MAP (maximum a posteriori) που αναφέρεται και ως BCJR ο οποίος υπολογίζει πιθανότητες των αποκωδικοποιημένων bits. Φυσικά υπάρχουν και μερικούς βέλτιστοι αλγόριθμοι αποκωδικοποίησης που παρουσιάζουν αρκετό ενδιαφέρον καθώς έχουν πολύ καλά χαρακτηριστικά τόσο σε απόδοση αλλά και χαμηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

3.5.4 Αλγόριθμος Viterbi

Ο αλγόριθμος Viterbi είναι ένας από τους πρώτους και πιο σημαντικούς αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για την αποκωδικοποίηση συνελκτικών κωδικών. Χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος τηλεπικοινωνιακών θεμάτων. Είναι βέλτιστος όσον αφορά την μεγιστοποίηση της πιθανοφάνειας της ακολουθίας εξόδου από τα δεδομένα εισόδου. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο συντομότερης διαδρομής ανάλογο με αυτόν του Dijkstra καθώς υπολογίζει την συντομότερη διαδρομή με την χρήση του trellis του κάθε κώδικα. Κεντρική ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξής: Κάθε κωδικοποιημένη ακολουθία (c_0, c_1, \dots) αντιστοιχεί σε μια διαδρομή διάμεσου του trellis του κωδικοποιητή. Εξαιτίας του θορύβου του καναλιού η ακολουθία r που έλαβε ο αποκωδικοποιητής δεν αντιστοιχεί ακριβώς σε κάποιο μονοπάτι του trellis. Ο αποκωδικοποιητής μέσω αυτού του αλγορίθμου βρίσκει ένα μονοπάτι το οποίο είναι κοντινότερο στην ληφθείσα ακολουθία βάση της συνάρτησης πιθανότητας που είναι κατάλληλη για το εκάστοτε μοντέλο καναλιού που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση του καναλιού με λευκό προσθετικό θόρυβο χρησιμοποιείται η ευκλείδεια απόσταση ως η κατάλληλη συνάρτηση για την εύρεση του κοντινότερου μονοπατιού.

Αν και όπως αναφέραμε ο αλγόριθμος Viterbi είναι βέλτιστος η πολυπλοκότητα του αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των καταστάσεων (2^n όπου n οι καταστάσεις). Το όριο πιθανότητας για την κωδικοποίηση καναλιού στους συνελκτικούς κώδικες προβλέπει ότι για την βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των κωδικών απαιτείται μεγαλύτερη μνήμη. Προκύπτει συνεπώς το πρόβλημα ότι δεν είναι πάντα εφικτή η σχεδίαση ενός αποκωδικοποιητή με αρκετή μνήμη για να πετύχουμε το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης. Επίσης ο αλγόριθμος Viterbi ανεξάρτητα του επιπέδου του

θορύβου κάνει την ίδια ποσότητα υπολογισμών. Για αυτούς τους λογούς δημιουργήθηκαν κώδικες όπου και μικρότερη πολυπλοκότητα υλικού έχουμε και λιγότερους υπολογισμούς ανάλογα με το επίπεδο του θορύβου. Το κόστος βέβαια για αυτούς τους αλγορίθμους είναι ότι αν και μικροί και γρήγοροι δεν παρέχουν πάντα την απόφαση όπου μεγιστοποιεί την πιθανοφάνεια. Αυτοί οι κώδικες για την αναπαράσταση τους χρησιμοποιούν δέντρα και όχι το διάγραμμα trellis. Κάθε φορά λοιπόν επιλέγεται το ανάλογο μονοπάτι-κλαδι ανάλογα με την απόφαση που παίρνεται για το κάθε σύμβολο. Επίσης για αυτούς τους κώδικες απαιτούνται συναρτήσεις όσον αφορά την μέτρηση της πιθανοφάνειας τέτοιες ώστε να μπορούν να πάρουν απόφαση για μονοπάτια.

3.5.5 Αλγόριθμος stack η ZJ

Ο αλγόριθμος stack η ZJ είναι ένας μη-βελτιστος αλγόριθμος. Η λειτουργία του βασίζεται στην ιδέα της χρήσης μιας λίστας όπου διατηρούνται όλα τα μερικά μονοπάτια. Η λίστα είναι ταξινομημένη έτσι ώστε το μονοπάτι που μεγιστοποιεί την συνάρτηση πιθανοφάνειας να είναι στην κορυφή της λίστας. Σε κάθε βήμα αποκωδικοποίησης το μονοπάτι που βρίσκεται στην κορυφή της λίστας εξετάζεται. Υπολογίζονται τα $2k$ μονοπάτια – απόγονοι του υπολογίζοντας κάθε φορά την καινούρια τιμή της συνάρτησης και επανατοποθετούνται στην λίστα κατά φθίνουσα σειρά. Όταν φτάσουμε σε κόμβο-«φύλλο» στο δέντρο ο αλγόριθμος τερματίζει.

3.5.6 Αλγόριθμος Fano

Η διαφορά του Fano με τον stack είναι ότι πλέον δεν διατηρούνται στην μνήμη όλα τα μονοπάτια που είναι υπό εξέταση αλλά ένα κάθε φορά. Ο αλγόριθμος διατηρεί μια τιμή κατωφλίου T . Προκειμένου να προχωρήσει περισσότερο στο δέντρο πρέπει η συνάρτηση να αυξάνει. Ο αλγόριθμος είναι λογικής depth-first. Αν προχωρώντας στο μονοπάτι η συνάρτηση πάρει τιμή μικρότερη του T τότε ο αλγόριθμος γυρίζει σε προηγούμενο κόμβο και υπολογίζει εκ νέου την τιμή της συνάρτησης.

3.5.7 Αλγόριθμος M

Ο αλγόριθμος M είναι μια παραλλαγή του αλγορίθμου Viterbi. Ο κανονικός αλγόριθμος Viterbi έχει μεγάλο αριθμό καταστάσεων η πολυπλοκότητα αυξάνεται, ενώ επειδή μόνο ένα μονοπάτι είναι το σωστό, πολλοί υπολογισμοί επεκτείνονται σε μονοπάτια που δεν χρησιμοποιούνται. Ο αλγόριθμος M διατηρεί σε λίστα M μονοπάτια. Σε κάθε βήμα αυτά τα μονοπάτια επεκτείνονται σε $M2^k$ (όπου k είναι ο αριθμός των bits εισόδου). Η συνάρτηση υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στον Viterbi. Τα καλύτερα M μονοπάτια διατηρούνται για το επόμενο βήμα και στο τέλος κρατείται το μονοπάτι με το καλύτερη τιμή (Σπουρλής, 2012).

3.6 Τούρμπο κώδικες

Οι κώδικες turbo είναι πολύ αποδοτικοί κώδικες και αποτελούν ένα ψηφιακό σχήμα κωδικοποίησης, με το οποίο επιτυγχάνονται ρυθμοί μετάδοσης που είναι πολύ κοντά στο όριο του C. Shannon. Οι κώδικες turbo με τους διαφορετικούς τύπους κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών λειτουργούν με επαναληπτική κωδικοποίηση και στηρίζονται στις ιδιότητες των συνελκτικών κωδικών.

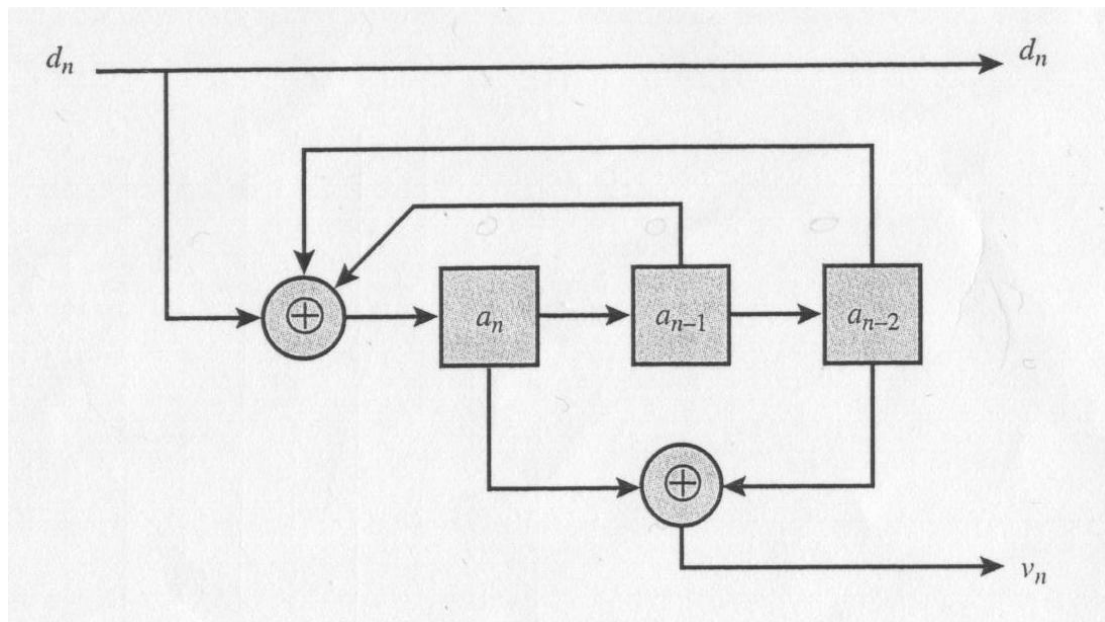
Πριν από δέκα χρόνια, ο Berrou, ο Glavieux και ο Thitimajshima εισήγαγαν μια νέα προσέγγιση στην κωδικοποίηση διόρθωσης λαθών που έφερε επανάσταση στη θεωρία και στις τεχνικές κωδικοποίησης. Ανακάλυψαν ένα ψηφιακό σχήμα κωδικοποίησης που μπορούσε να παρέχει εικονικά αλάνθαστες επικοινωνίες σε μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων και αποδόσεις μεταδιδόμενης ισχύος από ότι θεωρούσαν δυνατόν οι ειδικοί. Το σχήμα που ανακάλυψαν, το οποίο ονομάστηκε κώδικες turbo (turbo codes) σε αναλογία με τη μηχανή turbo και την αποτελεσματική χρήση της ανατροφοδότησης.

Η καινούρια τάξη κωδικών αποτελεί σημαντική επιλογή για τα ασύρματα συστήματα τρίτης γενιάς και συγκεκριμένα χρησιμοποιείται από τα συστήματα UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems) και τα κυψελωτά συστήματα τρίτης γενιάς cdma2000.

3.6.1 Κωδικοποιητής turbo

Ο κωδικοποιητής turbo, ο οποίος αποτελείται από δύο όμοιους κωδικοποιητές RSC (Recursive Systematic Convolutional) σε παράλληλη αλληλουχία. Τι είναι όμως ένας RSC κωδικοποιητής;

Ένας RSC κωδικοποιητής σχηματίζεται από έναν μη επαναληπτικό, μη συστηματικό, συνελκτικό κωδικοποιητή NSC (Non-Systematic Convolutional) με ανατροφοδότηση μίας από τις δύο εξόδους ισοτιμίας του στην είσοδο. Οι NSC κωδικοποιητές χρησιμοποιούνται στα κυβελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς, στις δορυφορικές επικοινωνίες και σε άλλες εφαρμογές. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζουν οι NSC κωδικοποιητές είναι ότι η ακολουθία εισόδου δεν εμφανίζεται στην έξοδο τους. Συνεπώς η κωδική λέξη περιέχει μόνο ψηφία ισοτιμίας (parity bits) και δεν μπορεί να διαιρεθεί σε ξεχωριστά δεδομένα και σε τμήματα ισοτιμίας, όπως απαιτείται από τον κωδικοποιητή turbo. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται συστηματικός κωδικοποιητής, του οποίου η είσοδος εμφανίζεται στην έξοδο. Η ανατροφοδότηση της μιας εξόδου ισοτιμίας επιτρέπει τη μετάδοση της ακολουθίας εισόδου (η οποία ονομάζεται συστηματική έξοδος) μαζί με την έξοδο ισοτιμίας που δεν ανατροφοδοτήθηκε, με ρυθμό κωδικοποίησης $r=1/2$. Επίσης η ανατροφοδότηση είναι αναγκαία στον κωδικοποιητή turbo ώστε αυτός να επιτύχει το μέγιστο κέρδος αναδιάταξης.



Σχήμα 3.8: Κωδικοποιητής RSC

Για την κωδικοποίηση turbo είπαμε πως χρησιμοποιείται μια παραλλαγή της συνελκτικής κωδικοποίησης, γνωστή ως επαναληπτική συστηματική συνελκτική κωδικοποίηση RSC (Recursive Systematic Convolutional). Ο συνδυασμός των δύο κωδικοποιητών που λειτουργούν μαζί επιτυγχάνει ένα αποτέλεσμα το οποίο δεν θα ήταν δυνατό να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα μόνο κωδικοποιητή.

Ο πρώτος κωδικοποιητής (encoder 1- RSC) δέχεται μια ακολουθία ψηφίων εισόδου και παράγει για κάθε εισερχόμενο ψηφίο ένα ψηφίο ελέγχου C1 (check bit).

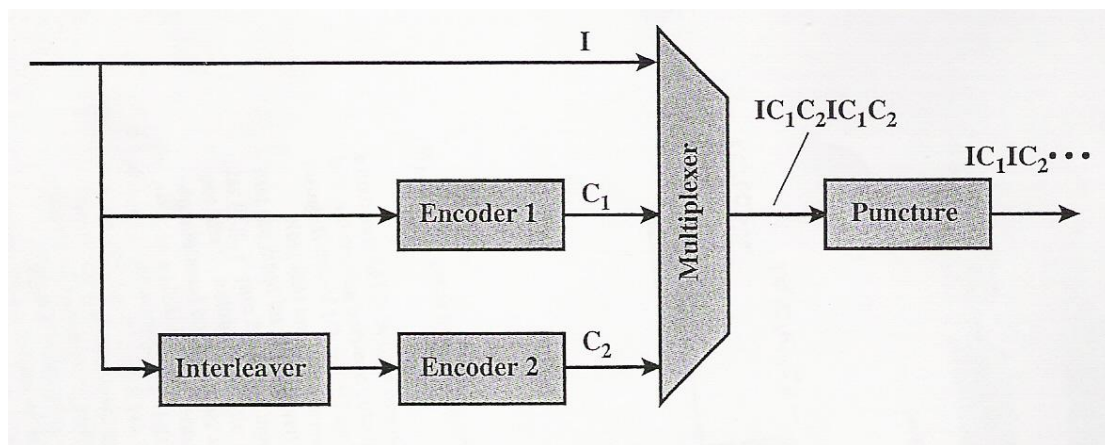
Η είσοδος στο δεύτερο κωδικοποιητή (encoder 2- RSC) είναι μια αναδιαταγμένη εκδοχή της ακολουθίας ψηφίων εισόδου, παράγοντας έτσι μία ακολουθία ψηφίων ελέγχου C2.

Οι δύο κωδικοποιητές διαχωρίζονται με μία συσκευή αναδιάταξης (interleaver). Η συσκευή αναδιάταξης (interleaver), της οποίας το μέγεθος αντιστοιχεί σε αυτό της ακολουθίας εισόδου, αναδιατάσσει την είσοδο σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο αλγόριθμο.

Τα αρχικά ψηφία εισόδου σε συνδυασμό με τα δύο ψηφία ελέγχου πολυπλέκονται στη συνέχεια και παράγουν την ακολουθία $I_1C_{11}C_{21}I_2C_{12}C_{22}I_3C_{13}C_{23}\dots$, η οποία

αποτελείται από το πρώτο ψηφίο εισόδου που ακολουθείται από το πρώτο ψηφίο του πρώτου κωδικοποιητή, που ακολουθείται από το πρώτο ψηφίο του δεύτερου κωδικοποιητή, κ.ο.κ.

Η τελική ακολουθία έχει ρυθμό κωδικοποίησης $1/3$. Λαμβάνοντας μόνο τα μισά από τα ψηφία ελέγχου, εναλλάσσοντας τις εξόδους των δύο κωδικοποιητών, μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός κωδικοποίησης $1/2$. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διάτρηση (puncturing). Οι ρυθμοί κωδικοποίησης $1/3$ και $1/2$ συναντώνται στα συστήματα τρίτης γενιάς.



Σχήμα 3.9: Απλοποιημένο σχήμα Κωδικοποιητή turbo

Πιο αναλυτικά για τη λειτουργία του κωδικοποιητή turbo έχουμε τα παρακάτω. Πριν την κωδικοποίηση, και οι δύο RSC κωδικοποιητές θέτονται σε μηδενική κατάσταση, το οποίο σημαίνει ότι κάθε καταχωρητής ολίσθησης γεμίζεται με μηδενικά. Μετά την κωδικοποίηση του k ψηφίου εισόδου, κάθε κωδικοποιητής μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε από τις οκτώ διαφορετικές καταστάσεις (κάθε κατάσταση είναι ένας μοναδικός συνδυασμός μηδενικών και μονάδων στο εσωτερικό του καταχωρητή ολίσθησης τριών ψηφίων). Εντούτοις, ο αποκωδικοποιητής λειτουργεί πολύ καλύτερα εάν γνωρίζει όχι μόνο την αρχική κατάσταση των κωδικοποιητών, αλλά και την τελική τους κατάσταση. Επομένως, είναι επιθυμητό οι κωδικοποιητές να επιστρέψουν σε μια γνωστή κατάσταση αφού κωδικοποιήσουν ολόκληρη την ακολουθία εισόδου. Μία προφανής επιλογή είναι η χρήση της μηδενικής κατάστασης, αφού οι κωδικοποιητές πρέπει να βρίσκονται σε αυτήν την κατάσταση πριν την κωδικοποίηση της επόμενης κωδικής λέξης.

Ένας NSC κωδικοποιητής μπορεί να επιστρέψει στη μηδενική κατάσταση εισάγοντας απλά τρία μηδενικά, τα οποία ονομάζονται ψηφία ουράς (tail bits). Οι RSC κωδικοποιητές, ωστόσο, δεν μπορούν να επιστρέψουν στη μηδενική κατάσταση με μια ακολουθία μηδενικών. Εντούτοις, εάν ένα ψηφίο ανατροφοδότησης χρησιμοποιούνταν ως είσοδος του κωδικοποιητή, τότε η λογική πράξη XOR των δύο αυτών ψηφίων θα ήταν μηδέν, και επομένως ο κωδικοποιητής θα επέστρεφε στη μηδενική κατάσταση μετά από τρεις κύκλους ρολογιού. Επομένως, ο κωδικοποιητής μπορεί να επιστρέψει στη μηδενική κατάσταση με εισαγωγή των τριών ψηφίων ανατροφοδότησης που παράγονται αμέσως μετά την κωδικοποίηση της κωδικής λέξης k ψηφίων.

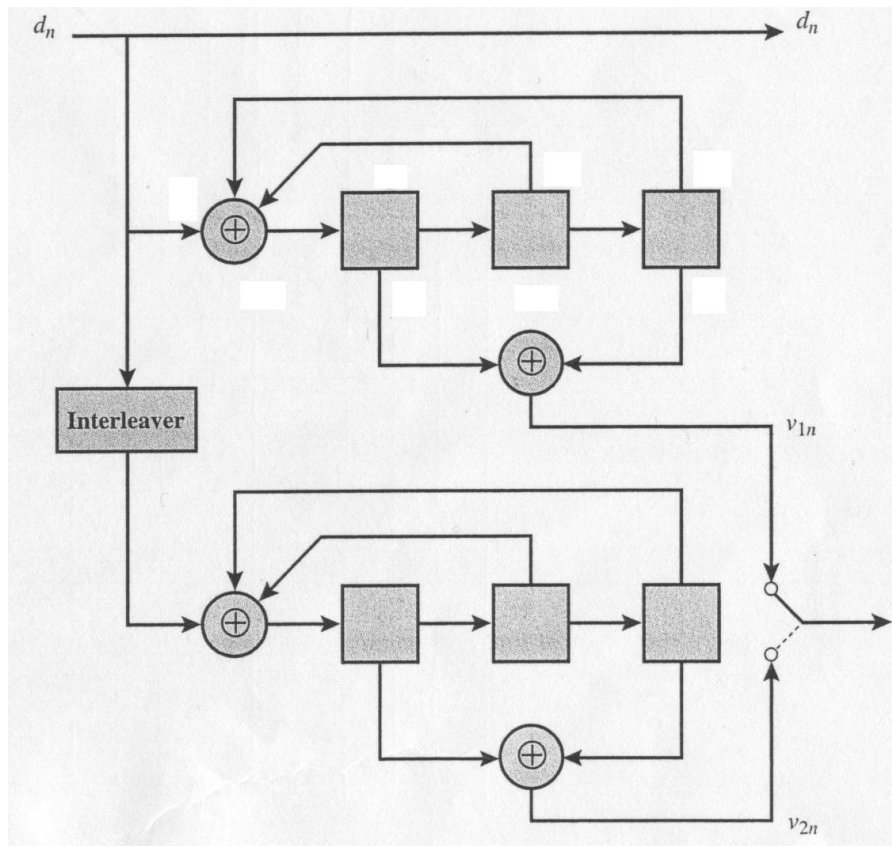
Η ακολουθία εισόδου και τα ψηφία ισοτιμίας (parity bits) εξόδου των δύο παράλληλων κωδικοποιητών διατάσσονται σειριακά και σχηματίζουν μία κωδική λέξη turbo.

Η συσκευή αναδιάταξης (interleaver) αποτελεί σημαντικό στοιχείο του κωδικοποιητή turbo. Είναι μία απλή συσκευή η οποία αναδιατάσσει τη σειρά των ψηφίων πληροφορίας με έναν προκαθορισμένο, αλλά ακανόνιστο τρόπο. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι εξαιτίας της ύπαρξης του interleaver, είναι πιθανό η κατάσταση των δύο κωδικοποιητών να είναι διαφορετική, και επομένως τα ψηφία ουράς που απαιτούνται για τον κάθε κωδικοποιητή να είναι επίσης διαφορετικά. Για αυτό αν και στην έξοδο της συσκευής αναδιάταξης παρουσιάζεται η αρχική ακολουθία ψηφίων εισόδου, η σειρά αυτών των ψηφίων είναι διαφορετική. Χωρίς τη συσκευή αυτή, οι δύο συνεχείς κωδικοποιητές θα λάμβαναν την ακολουθία ψηφίων πληροφορίας ακριβώς με την ίδια σειρά και συνεπώς η έξοδος τους θα ήταν η ίδια. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα ο εν λόγω κώδικας να μην είναι ισχυρός.

Εντούτοις, χρησιμοποιώντας τη συσκευή αναδιάταξης, η ακολουθία των ψηφίων πληροφορίας $\{X_i\}$ αναδιατάσσεται έτσι ώστε ο δεύτερος κωδικοποιητής να λαμβάνει τα ψηφία αυτά με διαφορετική σειρά $\{X_i'\}$. Συνεπώς, η έξοδος του δεύτερου κωδικοποιητή θα είναι διαφορετική από την έξοδο του πρώτου – με εξαίρεση τη σπάνια περίπτωση στην οποία τα ψηφία πληροφορίας, αφού περάσουν μέσα από τη συσκευή αναδιάταξης (interleaver), έχουν ακριβώς την ίδια σειρά. Σημειώνουμε ότι ο

interleaver που χρησιμοποιείται σε έναν κωδικοποιητή turbo είναι διαφορετικός από τους ορθογώνιους interleavers που χρησιμοποιούνται κοινώς στα ασύρματα συστήματα και έχουν ως σκοπό την εξάλειψη των διαλείψεων. Ενώ ένας ορθογώνιος interleaver διατάσσει τα δεδομένα σύμφωνα με ένα κανονικό πρότυπο, ο interleaver που χρησιμοποιείται στον κωδικοποιητή turbo διατάσσει τυχαία τα δεδομένα με έναν ακανόνιστο τρόπο.

Συμπερασματικά, η μεταδιδόμενη ακολουθία δεν περιλαμβάνει μόνο τα ψηφία ουράς (tail bits) που αντιστοιχούν στον πρώτο κωδικοποιητή, αλλά και τα ψηφία ουράς (tail bits) που αντιστοιχούν στο δεύτερο κωδικοποιητή. Μαζί με αυτά τα έξι ψηφία ουράς (tail bits) μεταδίδονται επίσης τα ψηφία ισοτιμίας από τον πρώτο και από τον δεύτερο κωδικοποιητή. Έτσι, ο πραγματικός ρυθμός κωδικοποίησης είναι λίγο μικρότερος από $1/3$. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι $r = k/(3k+12)$. Εντούτοις, για μεγάλα μήκη ακολουθίας k η κλασματική απώλεια του ρυθμού κωδικοποίησης εξαιτίας των ψηφίων ουράς (tail bits) είναι αμελητέα. Με τον μηχανισμό που ονομάζεται διάτρηση (puncturing) που αναφέραμε προηγουμένως είναι δυνατό να επιτύχουμε ρυθμό κωδικοποίησης ίσο με $1/2$ μιας και η λειτουργία του στηρίζεται στη διαγραφή ορισμένων από τα ψηφία ισοτιμίας πριν από την μετάδοση τους (Γραβάνη και Ευαγγελινού, 2005).



Σχήμα 3.10: Κωδικοποιητής τούρμπο με την παράλληλη αλληλουχία δύο RSC κωδικοποιητών

3.6.2 Αποκωδικοποιητής turbo

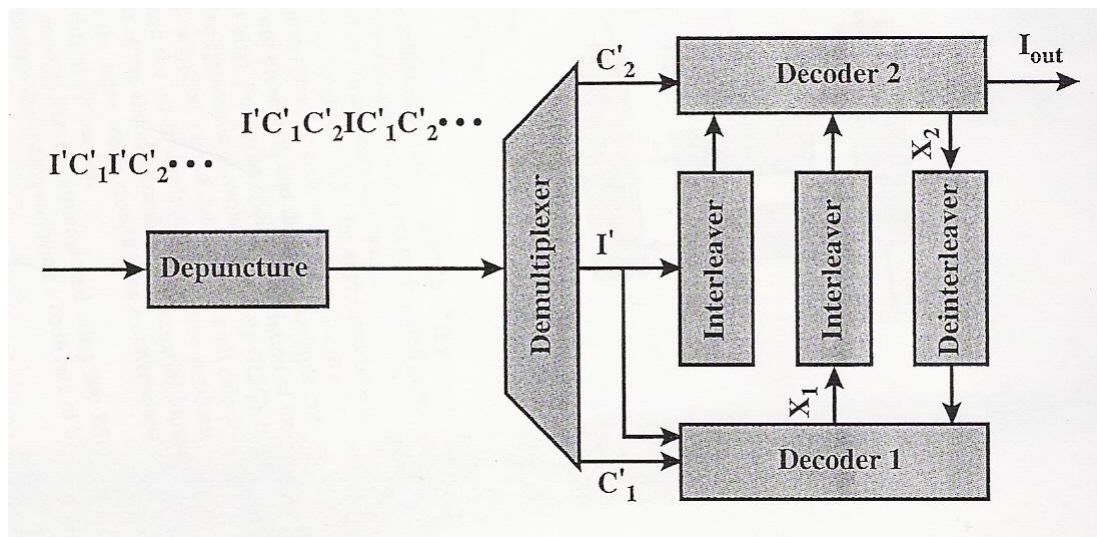
Στα λαμβανόμενα δεδομένα εφαρμόζεται η αντίστροφη διαδικασία της διάτρησης (depuncturing), εάν αυτό είναι απαραίτητο, εκτιμώντας τα ψηφία ελέγχου που λείπουν ή θέτοντας τα ίσα με το μηδέν.

Ο πρώτος αποκωδικοποιητής (decoder 1) λειτουργεί πρώτος χρησιμοποιώντας τις Γ και $PC1$ τιμές και παράγει τα ψηφία διόρθωσης $X1$.

Τα ψηφία I' και X_1 τροφοδοτούνται στο δεύτερο αποκωδικοποιητή, σε συνδυασμό με τις τιμές C_2' . Για την ευθυγράμμιση των ψηφίων πρέπει να πραγματοποιηθεί αναδιάταξη (interleaving).

Ο δεύτερος αποκωδικοποιητής (decoder 2) χρησιμοποιεί όλες του εισόδους και παράγει τις τιμές διόρθωσης X_2 . Αυτές τροφοδοτούνται στον πρώτο αποκωδικοποιητή (decoder 1) για μια δεύτερη επανάληψη του αλγόριθμου αποκωδικοποίησης, αφού πρώτα πραγματοποιηθεί η αντίστροφη διαδικασία αναδιάταξης (deinterleaving).

Μετά από αρκετές επαναλήψεις, παράγεται από τα I' και X_2 ένα ψηφίο εξόδου.



Σχήμα 3.11: Αποκωδικοποίηση turbo

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΤΟΥΡΜΠΟ ΚΩΔΙΚΕΣ

Η παρούσα εργασία μελετά την απόδοση ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τους Turbo codes για την μετάδοση ψηφιακής πληροφορίας πάνω από κανάλια για δορυφορικές επικοινωνίες. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός τέτοιου συστήματος με την χρήση κατάλληλου λογισμικού ώστε να εξετασθεί η απόδοση του για διάφορες παραμέτρους. Ο έλεγχος της απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με την παρουσίαση του Bit Error Rate (BER) κατά την λειτουργία του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης δεδομένων. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του προγράμματος είναι το MATLAB.

Με βάση τα ανωτέρω, στα επόμενα τμήματα του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν:

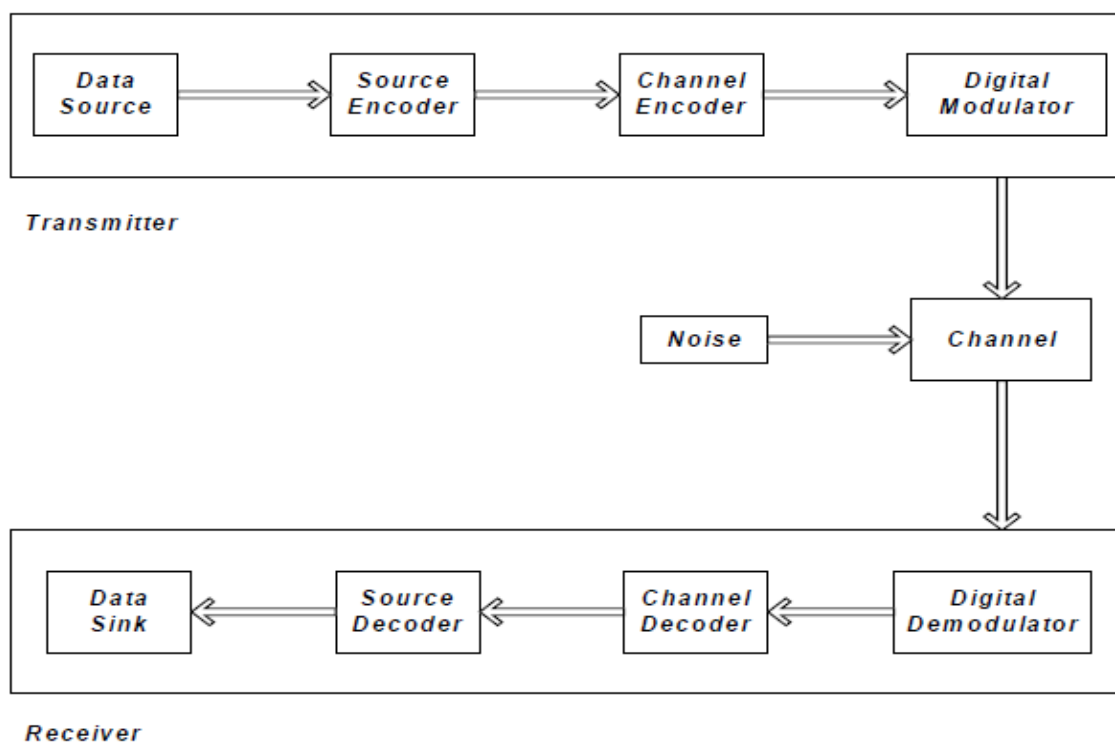
- Η δομή του ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της συγκριμένης εργασίας.
- Τα διάφορα υποσυστήματα για την υλοποίηση των Turbo codes και την χρήση τους στη γενική δομή ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος.
- Τα διαφορετικά υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ψηφιακή διαμόρφωση του σήματος.
- Το μοντέλο μετάδοσης πάνω σε κανάλι με λευκό θόρυβο καθώς και με την επίδραση του φαινομένου Rician που εμφανίζεται στις δορυφορικές επικοινωνίες.
- Η ανάπτυξη, του λογισμικό προσομοίωσης του συστήματος για δορυφορική επικοινωνία. Πιο αναλυτικά θα παρουσιαστούν τα δεδομένα εισαγωγής, οι συναρτήσεις MATLAB που υλοποιήθηκαν καθώς και οι διαφορετικοί παράμετροι για την εκτέλεση του κώδικα.

4.1 Γενικές Πληροφορίες

Η μετάδοση πληροφοριών από την πηγή πληροφορίας ως τον προορισμό πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, ώστε η ποιότητα της λαμβανόμενης πληροφορίας να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην ποιότητα της μεταδιδόμενης πληροφορίας. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι:

- ψηφιακή πηγή (digital source)
- κωδικοποιητής (source encoder)
- διαμορφωτής (digital modulator)
- δίαυλος (channel)
- αποδιαμορφωτής (digital demodulator)
- αποκωδικοποιητής (source decoder)
- data sink.

Τα διαφορετικά τμήματα ενός ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος καθώς και ο τρόπος ένωσης των τμημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1



Εικόνα 4.1: Γενική μορφή ψηφιακού τηλεπικοινωνιακού συστήματος

Τα δεδομένα που μεταδίδονται σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα μπορεί να αποτελούνται είτε από κάποιο αναλογικό σήμα, όπως φωνή ή video, είτε από κάποιο ψηφιακό σήμα. Σε ένα ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα τα δεδομένα μετατρέπονται σε ακολουθίες δυαδικών ψηφιακών συμβόλων (bits). Αρχικά, η ακολουθία των δυαδικών ψηφίων μεταβιβάζεται στον κωδικοποιητή. Σκοπός της ύπαρξης του τελευταίου είναι να εισάγει με ελεγχόμενο τρόπο κάποια πλεονάζοντα στοιχεία στην ακολουθία δυαδικής πληροφορίας έτσι ώστε τα δεδομένα να προφυλάσσονται από τις διαταραχές που δημιουργούνται από το τηλεπικοινωνιακό κανάλι και που μπορεί να οδηγήσουν σε παρερμηνεία του μεταδιδόμενου μηνύματος. Σε ένα ψηφιακό σύστημα μετάδοσης, ο έλεγχος σφαλμάτων επιτυγχάνεται με την χρήση ενός κωδικοποιητή καναλιού στο μεταδότη και με έναν αντίστοιχο αποκωδικοποιητή στο δέκτη.

Στη συνέχεια η δυαδική ακολουθία μεταβιβάζεται στον ψηφιακό διαμορφωτή, ο οποίος διαμορφώνει κατάλληλα το σήμα έτσι ώστε να μπορεί να μεταδοθεί πάνω από ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Ο κύριο σκοπός του ψηφιακού διαμορφωτή είναι η αντιστοίχιση των δυαδικών ακολουθιών πληροφορίας σε κυματομορφές.

Το τηλεπικοινωνιακό κανάλι είναι το φυσικό μέσο το οποίο χρησιμοποιείται για να σταλούν σήματα από τον πομπό στο δέκτη. Στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, όπως στην περίπτωση που εξετάζουμε, είναι η ατμόσφαιρα. Πάντως, όποιο και αν είναι το χρησιμοποιούμενο μέσο, το μεταδιδόμενο σήμα μεταβάλλεται λόγω διάφορων θορύβων που δημιουργούνται είτε από φυσικά είτε από τεχνικά αίτια, πχ. ο θόρυβος από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ο ατμοσφαιρικός θόρυβος κτλ.

Στο άλλο άκρο του συστήματος ο ψηφιακός αποκωδικοποιητής επεξεργάζεται το λαμβανόμενο σήμα, αναλύοντάς το σε μια ακολουθία bits που αναπαριστά τα μεταδιδόμενα bits. Στη συνέχεια, ο αποκωδικοποιητής καναλιού προσπαθεί να ανακατασκευάσει αυτήν την ακολουθία στην αυθεντική ακολουθία δεδομένων, βάσει της γνώσης που ήδη κατέχει για την κωδικοποίηση, η οποία έλαβε χώρα στον πομπό πριν αποσταλούν τα δεδομένα.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφουμε τα υποσυστήματα που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αποτελούν μέρη του τελικού συστήματος που προσομοιώνεται.

4.2 Υποσυστήματα Ψηφιακού Συστήματος

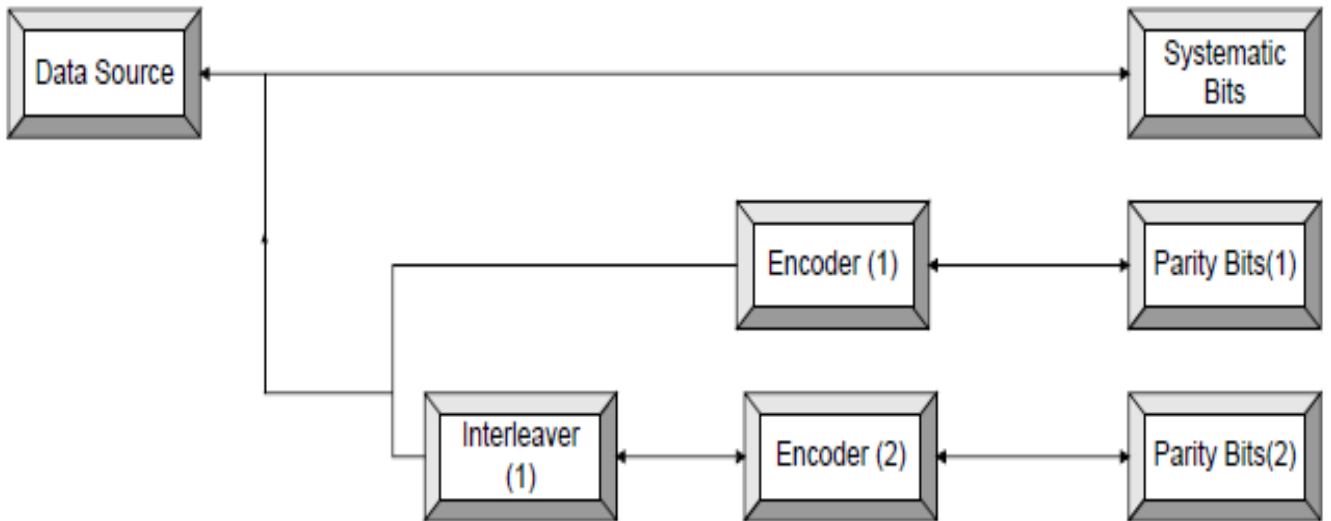
4.2.1 Turbo Κώδικες

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφούν οι κωδικοποιητές και οι αποκωδικοποιητές ενός συστήματος που περιλαμβάνει Turbo κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση, αντίστοιχα.

4.2.1.1 Κωδικοποιητής Turbo Κωδίκων

Η δομή ενός γενικού Turbo Code κωδικοποιητή (turbo encoder) παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. Στην γενική περίπτωση, η έξοδος του κωδικοποιητή αποτελείται από δύο μέρη: από την αρχική μη-κωδικοποιημένη πληροφορία και μια ομάδα parity ακολουθιών που παράγονται περνώντας μια αναδιατεταγμένη εκδοχή δυαδικών ψηφίων της πληροφορίας μέσα από συνελκτικούς κωδικοποιητές. Οι κωδικοποιητές χρησιμοποιούν συνήθως αναδρομικούς συστηματικούς κωδικοποιητές.

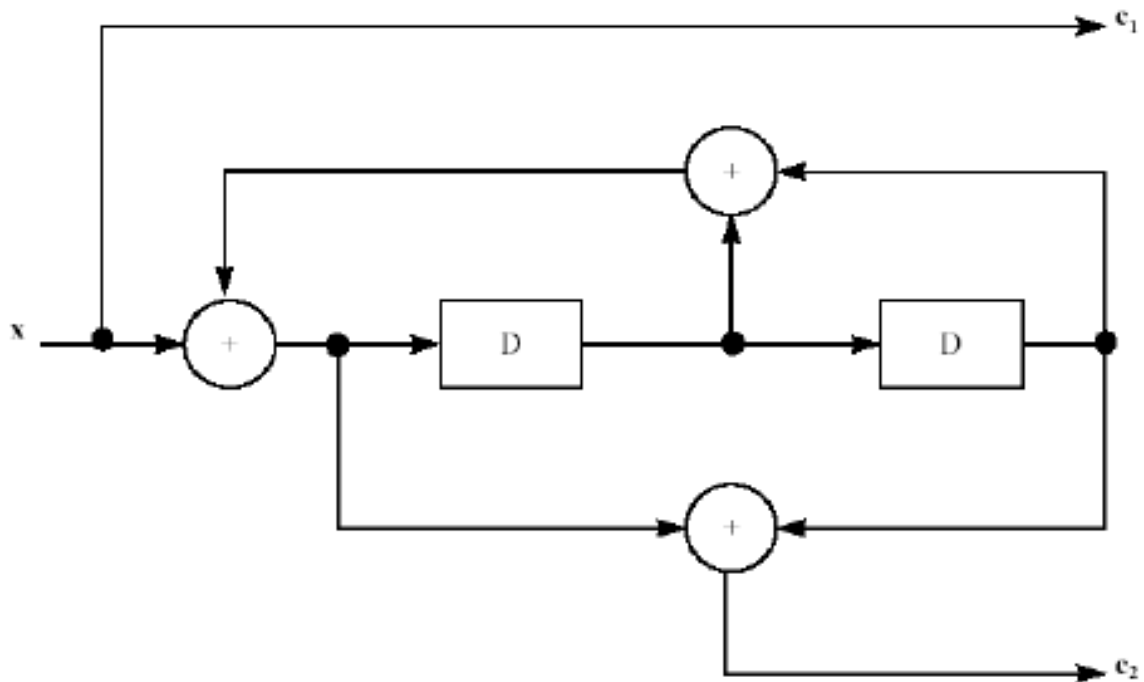
Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν 2 ίδιοι κωδικοποιητές με αποτέλεσμα οι επαναληπτικοί κώδικες να είναι συμμετρικοί ενώ προκύπτουν δυο σύνολα από parity δυαδικά ψηφία, εκ των οποίων το ένα παράγεται από τη μη-αναδιαταγμένη ακολουθία δεδομένων και το άλλο παράγεται από την αναδιαταγμένη ακολουθία.



Εικόνα 4.2: Γενική μορφή Turbo Code κωδικοποιητή με δύο ίδιους κωδικοποιητές και χρήση αναδιάταξης της πληροφορίας

4.2.1.2 Αναδρομικοί Συστηματικοί Συνελκτικοί Κώδικες

Οι Turbo codes χρησιμοποιούν συνήθως αναδρομικούς συστηματικούς συνελκτικούς κώδικες (Recursive Systematic Convolutional Codes – RSC) για την κωδικοποίηση τους. Εμείς επικεντρωθήκαμε στην περίπτωση που έχουμε μόνο συμμετρικούς επαναληπτικούς κώδικες, δηλαδή οι δύο encoders, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.2 έχουν ακριβώς την ίδια δομή. Ο αναδρομικός συστηματικός συνελκτικός κωδικοποιητής προέρχεται από τον μη-αναδρομικό συστηματικό συνελκτικό κωδικοποιητή, τροφοδοτώντας προς τα πίσω (στην είσοδο) μία από τις κωδικοποιημένες εξόδους. Ένα παράδειγμα αναδρομικού συνελκτικού κωδικοποιητή παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 4.3: Παράδειγμα αναδρομικού συνελκτικού κωδικοποιητή

4.2.1.3 Interleaver

Ο interleaver είναι μια συνάρτηση, η οποία χρησιμοποιείται για να αντιστοιχίζει μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων σε μια άλλη ακολουθία δυαδικών ψηφίων ίδιου μεγέθους. Στους Turbo Codes η εργασία αυτού του module είναι να αναδιατάσσει τα bits εισόδου και στην συνέχεια να τα προωθεί στον δεύτερο encoder. Η σχεδίαση ενός interleaver είναι ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την καλή απόδοση των επαναληπτικών κωδίκων. Στην συγκεκριμένη εργασία υλοποιήσαμε έναν interleaver που αναδιατάσσει τα δεδομένα με τυχαίο τρόπο χρησιμοποιώντας ψευδο-τυχαία νούμερα.

4.2.1.4 Αποκωδικοποιητής Turbo Codes

Μια καλή ιδιότητα των συνελκτικών κωδικοποιητών είναι το γεγονός ότι η αποκωδικοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο

επαναληπτικός αποκωδικοποιητής χρησιμοποιεί δύο κωδικοποιητές, με τον ίδιο αλγόριθμο, οι οποίοι λειτουργούν με επαναληπτικό τρόπο.

Ο επαναληπτικός (turbo) κώδικας αποτελείται από δύο ή περισσότερους όμοιους συνελκτικούς τύπου RSC κωδικοποιητές, διαχωρισμένους από έναν ή περισσότερους interleavers, αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο interleaver αναδιατάσσει την ακολουθία πληροφορίας του δεύτερου κωδικοποιητή, με σκοπό να αποσυσχετίσει τις εισόδους των δύο κωδικοποιητών. Εφόσον υπάρχουν δύο κωδικοποιημένες ακολουθίες στον αποκωδικοποιητή, η εφαρμογή της αποκωδικοποίησης ξεκινά με την αποκωδικοποίηση πρώτα μίας ακολουθίας, ώστε να υπάρχει η πρώτη εκτίμηση της ακολουθίας πληροφορίας. Στην συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται (επαναληπτικός αποκωδικοποιητής) όσες φορές έχουμε δώσει ως είσοδο τον αριθμό των επαναλήψεων.

4.2.2 Ψηφική Διαμόρφωση / Αποδιαμόρφωση

4.2.2.1 Ψηφιακός Διαμορφωτής

Η αποτελεσματική χρήση του επικοινωνιακού καναλιού απαιτεί τη μετατροπή του σήματος βασικής ζώνης σε ένα σήμα κατάλληλο για μετάδοση. Τη λειτουργία αυτή αναλαμβάνει ο διαμορφωτής.

Διαμόρφωση (modulation) είναι η διαδικασία κατά την οποία κάποιο χαρακτηριστικό (πλάτος, συχνότητα, φάση) του φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα βασικής ζώνης ή σήμα διαμόρφωσης. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε την δυαδική διαμόρφωση μεταλλαγής φάσης (BPSK). Η δυαδική PSK είναι η πιο απλή περίπτωση της διαμόρφωσης μεταλλαγής φάσης. Κατά τη διαμόρφωση ενός φέροντος κατά BPSK έχουμε μεταβολή της φάσης του σήματος μεταξύ δύο τιμών. Όταν το bit που μεταδίδεται είναι το 1 η φάση του φέροντος είναι 0° , ενώ η φάση του σήματος για μετάδοση δυαδικού 0 διαφέρει κατά 180° από αυτή που αντιστοιχεί στο δυαδικό 1.

4.2.2.2 Ψηφιακός Αποδιαμορφωτής

Αποδιαμόρφωση είναι η αντίστροφη διαδικασία από τη διαμόρφωση. Ο αποδιαμορφωτής δέχεται στην είσοδό του το παραμορφωμένο αναλογικό σήμα (διαμορφωμένο φέρον) που μεταδίδεται μέσα από το επικοινωνιακό κανάλι και δίνει στην έξοδό του μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων. Η ακολουθία αυτή πρέπει, στην ιδανική περίπτωση, να είναι ταυτόσημη με αυτή που διαμόρφωσε το φέρον στο διαμορφωτή.

4.2.3 Διάυλος

Ο όρος θόρυβος αναφέρεται σε ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα, τα οποία είναι παρόντα στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα. Η παρουσία θορύβου, προστιθέμενου σε ένα σήμα πληροφορίας, τείνει να καλύψει ή να μεταβάλλει τη μορφή του σήματος, περιορίζει την ικανότητα του δέκτη να πάρει σωστές αποφάσεις για τα λαμβανόμενα σύμβολα και ως συνέπεια συντελεί στη μείωση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Ο θόρυβος πηγάζει από ποικιλία πηγών, είτε αυτές είναι τεχνητές είτε φυσικές

4.2.3.1 Λευκός Θόρυβος (AWGN)

Το κυρίαρχο φασματικό χαρακτηριστικό του λευκού θορύβου είναι ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι η ίδια για όλες τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν. Με άλλα λόγια, ο λευκός θόρυβος εναποθέτει ίσα ποσά ισχύος θορύβου σε όλες τις συχνότητες. Το επίθετο «λευκός» χρησιμοποιείται σε παραλληλισμό με το λευκό φως, το οποίο περιέχει ίσα ποσά όλων των συχνοτήτων στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Παρόλο που η έννοια του λευκού θορύβου είναι χρήσιμη, καμία διαδικασία θορύβου δεν μπορεί να είναι καθαρά λευκή.

4.2.3.2 Διάλειψη Rician

Για πολλά κανάλια, το μοντέλο καναλιού με πρόσθετο λευκό θόρυβο είναι κατάλληλο. Εν τούτοις, σε πολλές ασύρματες μεταδόσεις, το κανάλι είναι συχνά ασταθές λόγω διάλειψης (fading) που παρουσιάζεται στο μεταδιδόμενο σήμα. Η διάλειψη είναι αποτέλεσμα του φυσικού μέσου του καναλιού. Επίσης, γνωρίζουμε ότι η ψηφιακή μετάδοση πληροφορίας στις δορυφορικές επικοινωνίες γίνεται σε πολύοδα κανάλια με διαλείψεις.

Στην συγκεκριμένη εργασία ασχοληθήκαμε με την μετάδοση πληροφορίας πάνω από κανάλια με διάλειψη Rician. Σε αυτή την περίπτωση, η κωδικοποιημένη λέξη θα επηρεαστεί τόσο από τον θόρυβο, όσο και από την χρονικά μεταβαλλόμενη διάλειψη σε κινητά ράδιο-κανάλια. Το σημαντικό στην μοντελοποίηση ενός καναλιού με διάλειψη Rician είναι ότι υπάρχει οπωσδήποτε μία ευθεία οπτική επαφή του πομπού και του δέκτη. Προφανώς, το σήμα που φθάνει στον δέκτη από το “ευθύ” μονοπάτι είναι πολύ πιο ισχυρό από τα σήματα που φθάνουν στον δέκτη μέσω άλλων διαδρομών. Επίσης, εκτός από τον αριθμό των διαφορετικών μονοπατιών μία άλλη μετρική που είναι πολύ σημαντική είναι αυτή που καθορίζει την μέγιστη αλλαγή στην συχνότητα του σήματος κατά την μεταφορά.

Σε αυτή την ενότητα περιγράφηκαν τα υποσύστημα που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου υπάρχει ανάλυση των βασικών τμημάτων κώδικα που υλοποιούν τα υποσυστήματα που περιγράφηκαν παραπάνω.

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ & ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και κατά την εισαγωγή, η παρούσα διπλωματική είχε στόχο είχε να δημιουργήσει ένα μοντέλο συστήματος ασύρματης δορυφορικής επικοινωνίας, για το οποίο θα έπρεπε να υλοποιηθεί η προσομοίωση του με κατάλληλο λογισμικό, ώστε να εξεταστεί η απόδοσή του βάσει τις διάφορες παραμέτρους του. Σε αυτή την

ενότητα θα γίνει η περιγραφή του κώδικα που υλοποιεί τα παραπάνω υποσυστήματα καθώς και τις παραμέτρους που δέχονται ως είσοδο για να λειτουργήσουν.

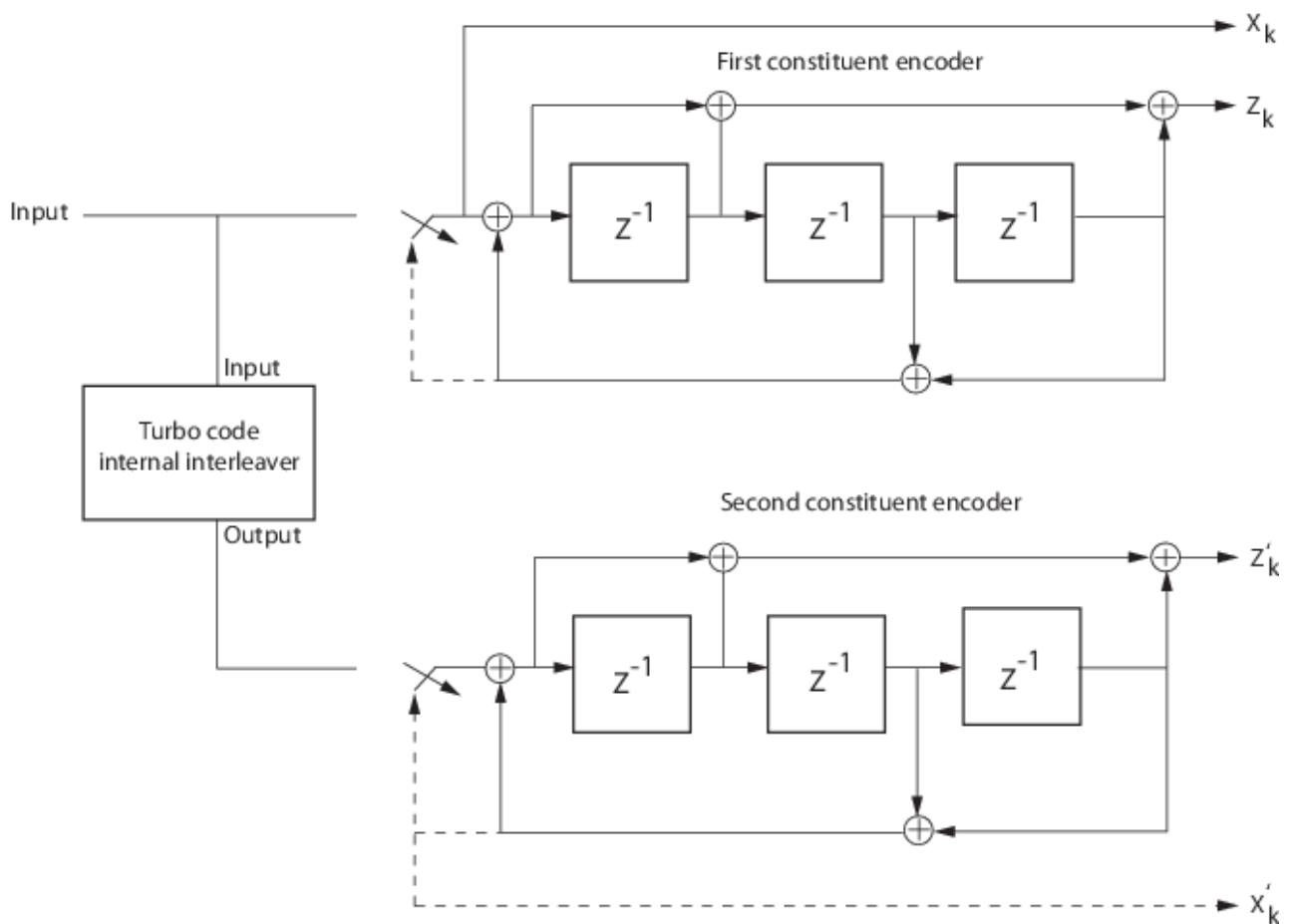
4.3.1 Ψηφιακή πηγή (digital source)

Το μήκος του stream που δίνεται ως είσοδος για όλα τα πειράματα μου είναι καθορισμένο και ίσο με 10000 bits για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό το stream είναι ουσιαστικά η χρήσιμη πληροφορία. Η δημιουργία αυτής της πληροφορίας γίνεται με τυχαίο τρόπο χρησιμοποιώντας τυχαία κατανομή.

4.3.2 Turbo Code Κωδικοποιητής και Αποκωδικοποιητής

Για την υλοποίηση ενός Turbo Code κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή υλοποιήθηκε μία συνάρτηση με το όνομα `turbo_code` που παίρνει ως όρισμα τον αριθμό των bits των δεδομένων που θα μεταδοθούν και επιστρέφει δύο “objects” της MATLAB που υλοποιούν έναν κωδικοποιητή και έναν αποκωδικοποιητή Turbo Codes. Η συνάρτηση εσωτερικά ζητάει από τον χρήστη πληροφορίες σχετικά με την υλοποίηση των Turbo Codes κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή. Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του Turbo Encoder και Decoder είναι οι **`comm.TurboEncoder`** και **`comm.TurboDecoder`**, αντίστοιχα.

Η πρώτη πληροφορία που ζητάει η υλοποίηση από τον χρήστη είναι η δομή που επιθυμεί να έχει ο encoder και αντίστοιχα decoder. Στην συγκεκριμένη εργασία υλοποιήθηκαν δύο διαφορετικές δομές για τους Turbo Code κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές. Οι δομές των δύο διαφορετικών τύπου κωδικοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.3 και 5.4. Η Εικόνα 5.3 παρουσιάζει την δομή ενός Turbo Code κωδικοποιητή που χρησιμοποιείται ευρέως και είναι η πιο κοινή δομή για τέτοιου τύπου encoders. Ο δεύτερος κωδικοποιητής έχει μία δομή που δίνει η MATLAB για την υλοποίηση Turbo Code κωδικοποιητών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην εργασία υλοποιήθηκαν αναδρομικοί συνελκτικοί κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές.



Εικόνα 4.4: Παράδειγμα Turbo Codes κωδικοποιητή (MATLAB)

Η δομή για τους αποκωδικοποιητές έχει παρόμοια δομή με αυτή των κωδικοποιητών και ακολουθεί την αντίστροφη διαδικασία.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αναδρομικοί συνελκτικοί κωδικοποιητές και αποκωδικοποιητές χρησιμοποιούν έναν interleaver για να αυξάνουν την απόδοση τους. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας interleaver που αναδιατάσσει τυχαία την σειρά των μεταδιδόμενων στοιχείων χρησιμοποιώντας την συνάρτηση **randperm**.

Τέλος, το πρόγραμμα κατά την υλοποίηση των Turbo κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών ζητάει ως παράμετρο τον αριθμό των επαναλήψεων που θα εφαρμοστεί η διαδικασία της αποκωδικοποίησης.

4.3.3 Ψηφιακή Διαμόρφωση και Αποδιαμόρφωση

Το σήμα για να μεταδοθεί πάνω από ένα μέσο χρειάζεται να γίνει ψηφιακή διαμόρφωση και αντίστοιχα κατά την λήψη του απαιτείται η αποδιαμόρφωση του. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε την πιο απλή ψηφιακή διαμόρφωση σήματος τη δυαδική διαμόρφωση μεταλλαγής φάσης (BPSK). Στην κώδικα MATLAB χρησιμοποιήσαμε τις συναρτήσεις **comm.BPSKModulator** και **comm.BPSKDemodulator** για την υλοποίηση δύο “objects” που υλοποιούν την ψηφιακή δυαδική διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση.

4.3.4 Δίαυλος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στον δίαυλο που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η μετάδοση πληροφορίας για δορυφορικές επικοινωνίες εφαρμόστηκαν δύο είδη θορύβου, ο λευκός θόρυβος και το φαινόμενο Rician fading.

4.3.4.1 Λευκός Θόρυβος

Για την προσομοίωση του λευκού θορύβου χρησιμοποιήθηκε μία συνάρτηση της MATLAB, **comm.AWGNChannel**, η οποία παράγει τυχαίο θόρυβο ανάλογα με τον τύπο εισόδου που δίνει ο χρήστης. Στην υλοποίησή μου χρησιμοποιήθηκε ο λόγος ισχύς του σήματος ως προς τον θόρυβο (Signal to noise ratio (SNR)), όπως φαίνεται και από τον τύπο υπολογισμού. Για κάθε πείραμα που τρέξαμε η μεταβλητή του θορύβου έπαιρνε τιμές στο διάστημα [0, 9] και με βήμα 0.5 σε μονάδες dB. Η τελική έξοδος του κώδικα είναι ένα διάγραμμα που δείχνει για τις διαφορετικές τιμές του θορύβου ποιος είναι ο ρυθμός σφαλμάτων κατά την μετάδοση.

$$SNR = \frac{\text{Ισχύς Σήματος}}{\text{Ισχύς Θορύβου}}$$

Τύπος υπολογισμού SNR

4.3.4.2 Διάλειαση Rician

Το πρόγραμμα προσομοιώνει τη διάλειαση Rician πάνω από ένα κανάλι για δορυφορική επικοινωνία. Για την προσομοίωση του καναλιού με διάλειαση Rician χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση **ricianchan**. Η συνάρτηση **ricianchan** δημιουργεί ένα αντικείμενο που προσομοιώνει ένα κανάλι μονής διαδρομής με σταθερή συχνότητα και με το φαινόμενο διάλειασης Rician. Η παραπάνω συνάρτηση δέχεται 5 διαφορετικές παραμέτρους ως είσοδο:

- Την συχνότητα του σήματος, με βάση την οποία γίνεται η μετάδοση της πληροφορίας. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το εύρος συχνοτήτων για μετάδοση πληροφορίας σε δορυφορικές μεταδόσεις είναι από 1 GHz - 40 GHz. Αυτές τις τιμές χρησιμοποιήσαμε και για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.
- Την μεγαλύτερη δυνατή μεταβολή στη συχνότητα του σήματος λόγω του φαινομένου Doppler. Το φαινόμενο Doppler αφορά την αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός σήματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε κίνηση σε σχέση με την πηγή του σήματος. Οι δορυφόροι που κινούνται με αρκετά μεγάλη ταχύτητα παρουσιάζουν μία μεγαλύτερη μεταβολή στην συχνότητα λόγω του φαινομένου Doppler, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι με και μερικές δεκαδες kHz.
- Η τρίτη παράμετρος αφορά τον παράγοντα K για την Rician διάλειαση. Ο παράγοντας πρέπει να δοθεί σε γραμμική κλίμακα. Ο παράγοντας K για το φαινόμενο της Rician διάλειασης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύς του σήματος από λαμβάνεται από την “ευθεία” μετάδοση (direct link) και την ισχύ των σημάτων που λαμβάνονται από την διεσπαρμένη μετάδοση. Η παράμετρος αυτή δείχνει την ποιότητα της σύνδεσης.

- Οι επόμενες δύο παραμέτρους αφορούν την μη απευθείας μετάδοση πληροφορίας. Δηλαδή, σε αυτές τις παραμέτρους θεωρούμε ότι δεν έχουμε λήψη πληροφορίας μόνο από την απευθείας “οπτική επαφή” αλλά και από άλλες διαδρομές. Έτσι, η τέταρτη παράμετρος είναι $aggay$ που δείχνει τον αριθμό των διαφορετικών διαδρομών από τις οποίες φτάνει το σήμα καθώς επίσης και την καθυστέρηση που φτάνει από κάθε διαδρομή. Ενώ, η τελευταία παράμετρος δείχνει την εξασθένιση

Όλες οι παραπάνω συναρτήσεις και παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του προγράμματος που προσομοιώνει την χρήση Turbo Codes πάνω από δορυφορικές επικοινωνίες. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα γίνει μία περιγραφή των αποτελεσμάτων κατά την εκτέλεση όλων των συναρτήσεων και του κώδικα που παρουσιάστηκε στο παρόν Κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Κεφάλαιο 5 έγινε η περιγραφή του προγράμματος που υλοποιήθηκε καθώς και των βασικών παραμέτρων και συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Κεφάλαιο 6 θα γίνει μία παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων για διαφορετικές τιμές των παραπάνω παραμέτρων. Συνολικά υλοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις για κάθε μία από τις παραμέτρους που περιγράφηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε είναι παραμετρικό και υλοποιεί διαφορετικές περιπτώσεις υλοποίησης συστήματος και μετράει το BER ώστε να ελεγχθεί η απόδοση του σε κάθε περίπτωση.

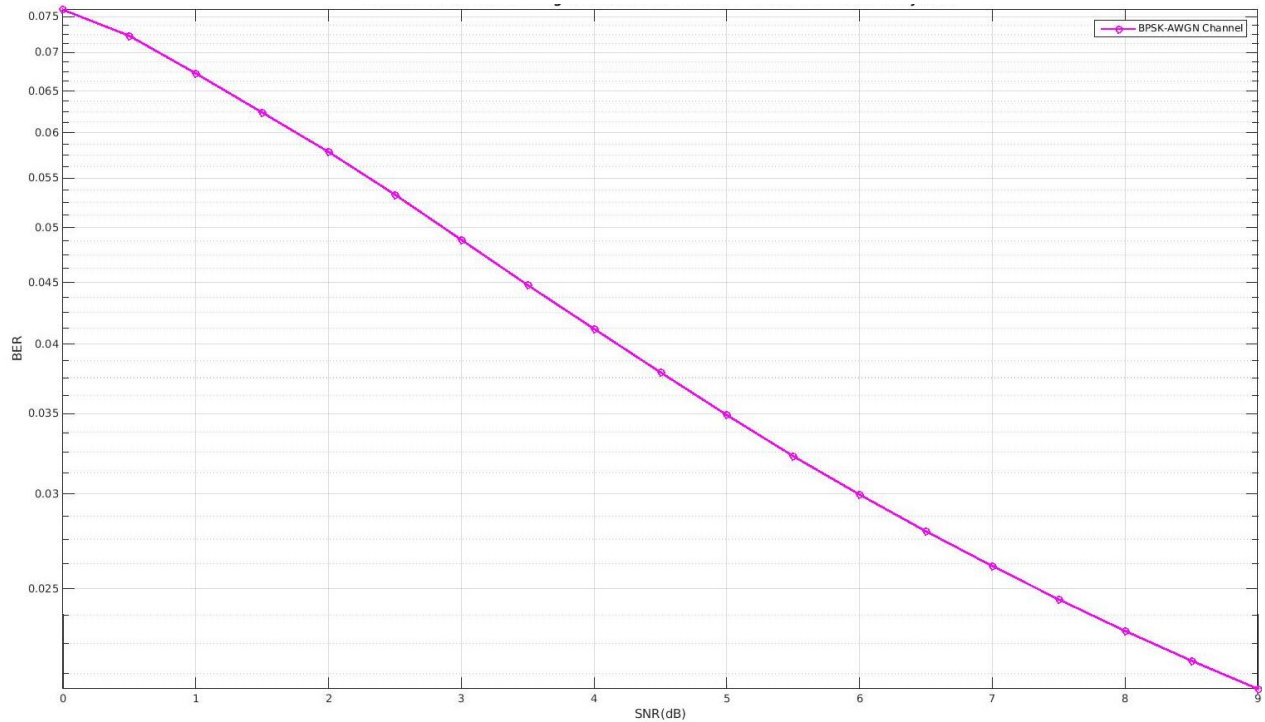
Οι διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Μετάδοση μη κωδικοποιημένων δεδομένων πάνω σε κανάλι με AWGN,
- Μετάδοση μη κωδικοποιημένων δεδομένων σε κανάλι με AWGN και διάλειαση Rician.
- Μετάδοση κωδικοποιημένων δεδομένων με την χρήση Turbo codes σε κανάλι με AWGN και διάλειαση Rician.

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις εξάγονται οι σχετικές γραφικές παραστάσεις χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικές τιμές παραμέτρων εισόδου.

5.1 Πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN

Στο συγκεκριμένο πείραμα δείχνουμε το BER για μετάδοση πάνω από ένα κανάλι μόνο με λευκό θόρυβο για διάφορες τιμές SNR. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται οι τιμές του διαφορετικού SNR ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται το BER σε λογαριθμική κλίμακα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1, όσο το SNR αυξάνει τόσο το BER μειώνεται με λογαριθμικό ρυθμό.



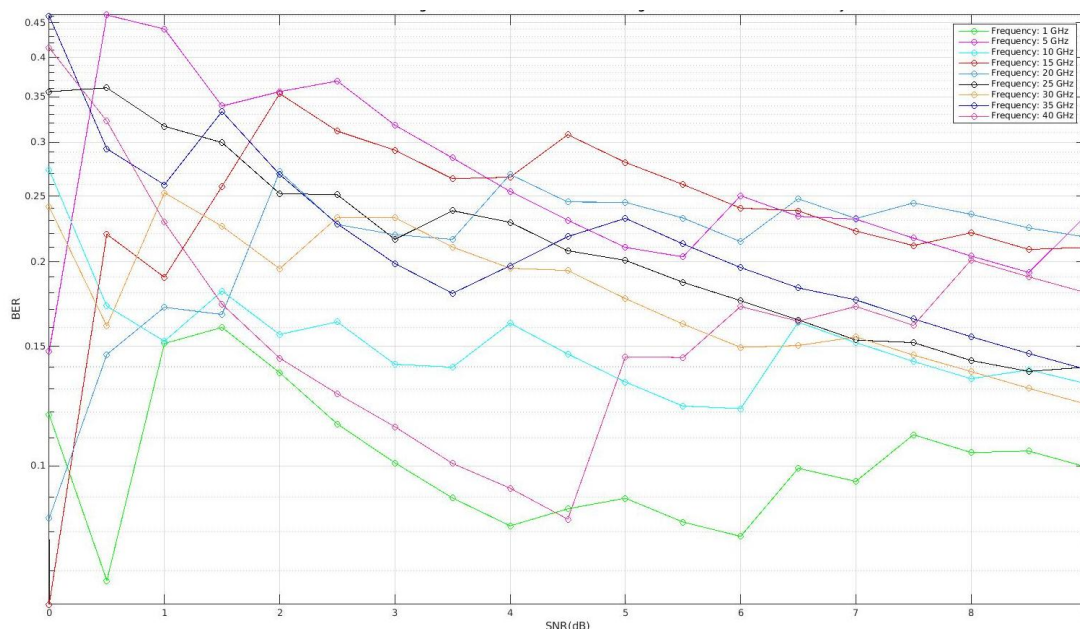
Εικόνα 5.1: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN και BPSK διαμόρφωση

5.2 Πείραμα μετάδοσης μη κωδικοποιημένης πληροφορίας πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician

Σε αυτή την παράγραφο θα δείξουμε την απόδοση του συστήματος, μετρώντας το BER, για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων της διάλειψης Rician που προσομοιώθηκε για την επικοινωνία δορυφορικών συνδέσεων. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν για το κατά πόσο η μεταβολή τους επηρεάζει το σφάλμα κατά την μετάδοση είναι οι εξής: η συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος, η μεταβολή στη συχνότητα του σήματος λόγω του φαινομένου Doppler, η τιμή της παραμέτρου K για την Rician διάλειψη, ο αριθμός των διαφορετικών μονοπατιών για να φθάσει στον τελικό προορισμό η μεταδιδόμενη πληροφορία. Παρακάτω περιγράφονται όλα τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

5.2.1 Συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος

Όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 5, η συχνότητα των δορυφορικών επικοινωνιών βρίσκεται στο εύρος 1 GHz – 40 GHz. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετάδοσης σημάτων με διαφορετικές συχνότητες πάνω στο παραπάνω εύρος και σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.2, η μετάδοση πληροφορίας σε χαμηλότερες συχνότητες έχει μικρότερο BER.

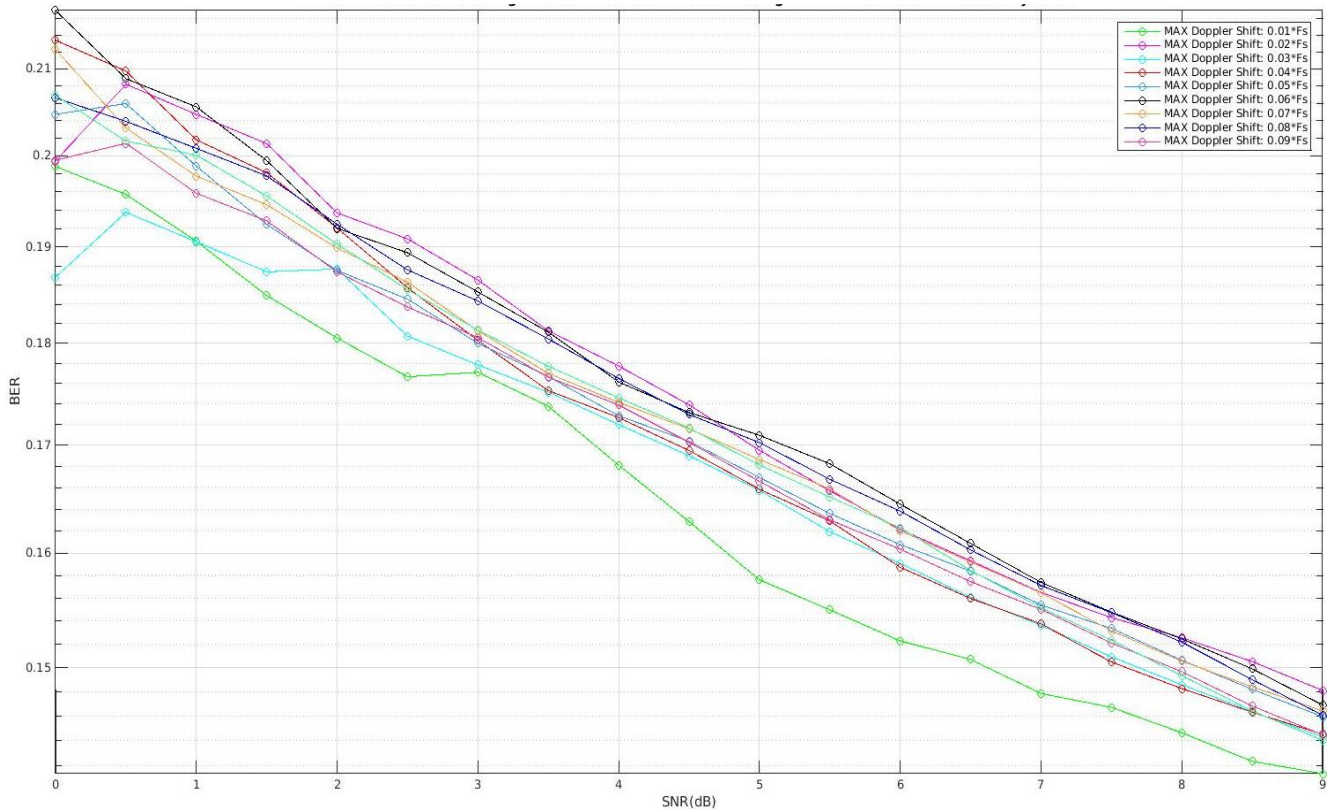


Εικόνα 5.2: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με σήματα διαφορετικών συχνοτήτων πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.2.2 Μέγιστη μεταβολή συχνότητας Doppler

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στο σφάλμα μετάδοσης αλλάζοντας την μέγιστη αλλαγή συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler και διατηρώντας τις υπόλοιπες ρυθμίσεις σταθερές. Η Εικόνα 6.3 παρουσιάζει το BER για αλλαγή συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler από 0.01 έως 0.1 της αρχικής

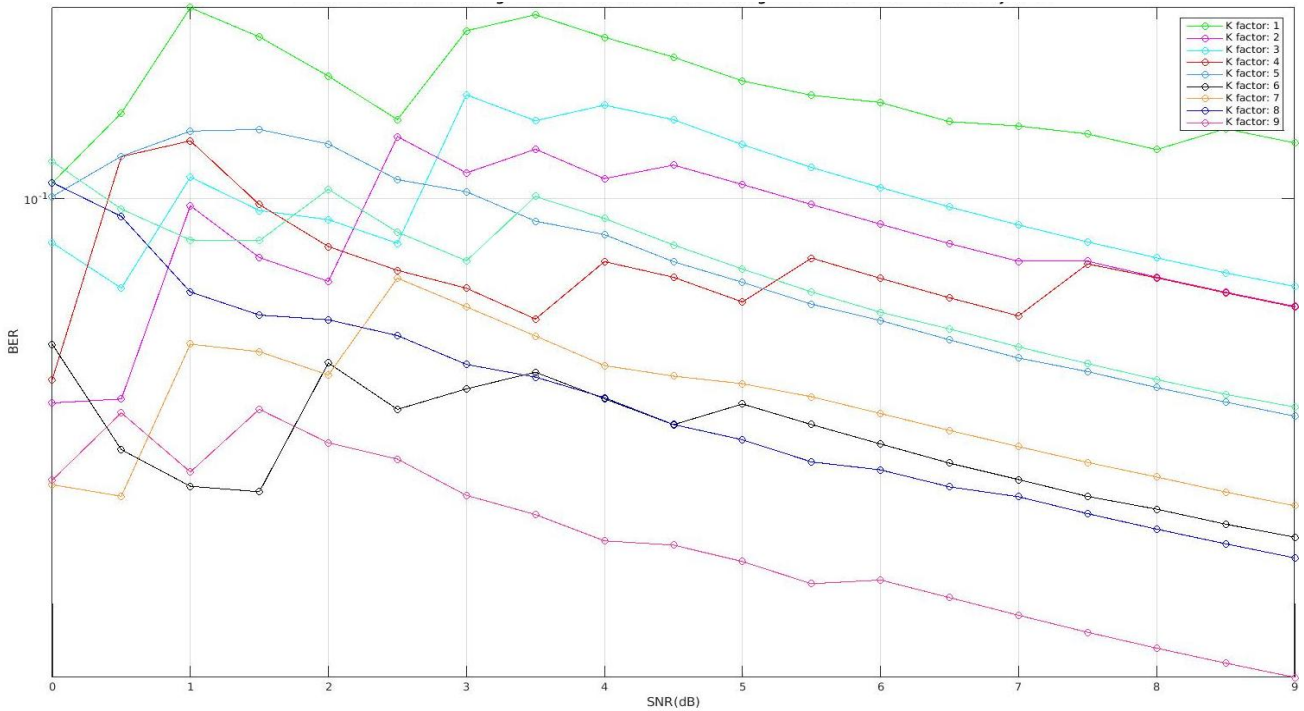
συχνότητας μεταδιδόμενου σήματος. Προφανώς, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα όσο μικρότερη είναι η αλλαγή στην συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος τόσο μικρότερο είναι και το BER της μετάδοσης μας.



Εικόνα 5.3: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική τιμή αλλαγής της συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.2.3 Παράγοντας K για το κανάλι με φαινόμενο Rician

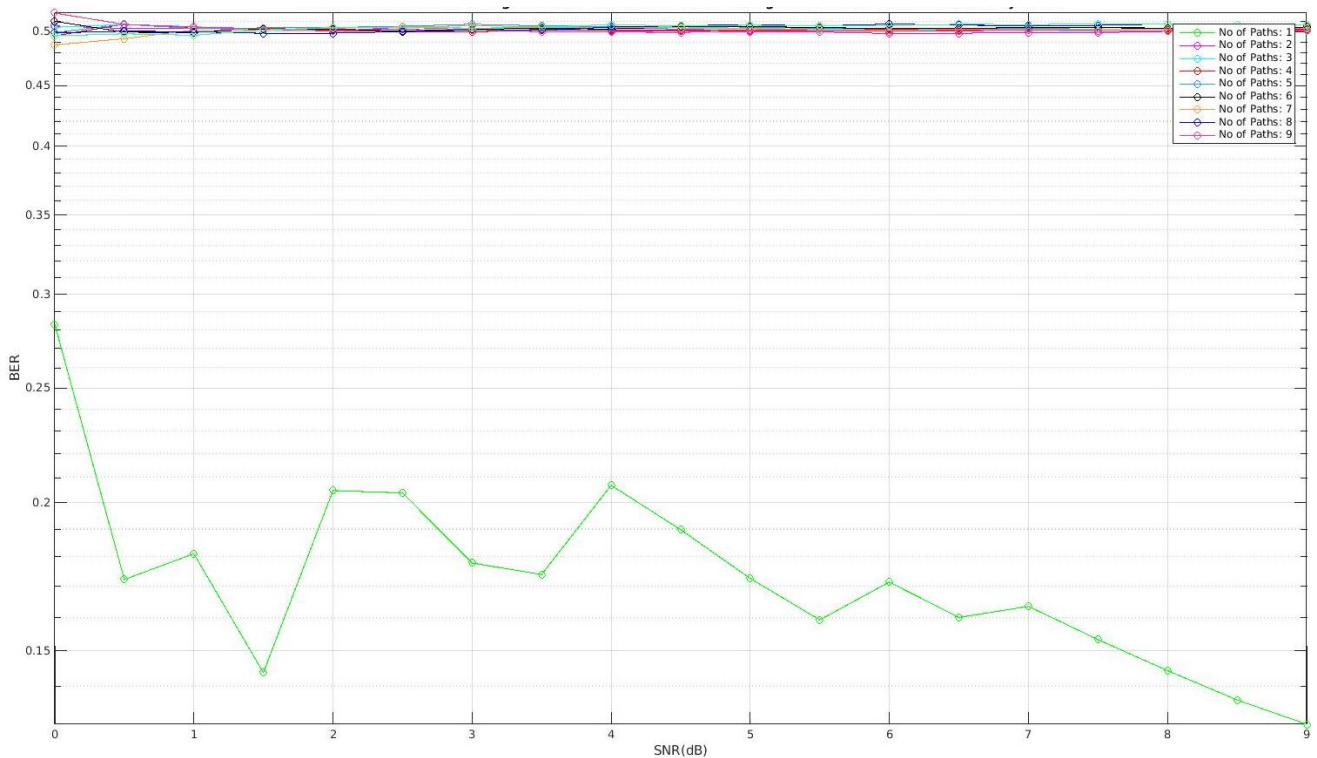
Σε αυτή την παράγραφο εξετάστηκε το σφάλμα μετάδοσης σε δορυφορικές επικοινωνίες για διαφορετικές τιμές του παράγοντα K της διάλειτουργίας Rician. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.4, ο παράγοντας K αλλάζει την απόδοση του συστήματος. Το συμπέρασμα που μπορεί εξαχθεί είναι ότι όσο μεγαλύτερη τιμή είναι η τιμή του παράγοντα K τόσο καλύτερη απόδοση, άρα και μικρότερο σφάλμα, φαίνεται να έχει η μετάδοση της πληροφορίας.



Εικόνα 5.4: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετικές τιμές για τον παράγοντα K του φαινομένου Rician πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.2.4 Αριθμός διαφορετικών μονοπατιών για την μετάδοση της πληροφορίας

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για το σφάλμα μετάδοσης ανάλογα με τον διαφορετικό αριθμό μονοπατιών που μπορεί να ακολουθήσει η πληροφορία από την πηγή έως τον παραλήπτη. Η μελέτη έγινε για αριθμό μονοπατιών από 1 έως 10 με τις αντίστοιχες μειώσεις στην ισχύ του σήματος. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 6.5, όταν υπάρχουν παραπάνω από ένα μονοπάτια για την μετάδοση της πληροφορίας, αυτό δημιουργεί μεγάλο σφάλμα στην μετάδοση. Γι' αυτό το λόγο είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται η μετάδοση πληροφορίας μέσω άμεσης "οπτικής" επαφής.



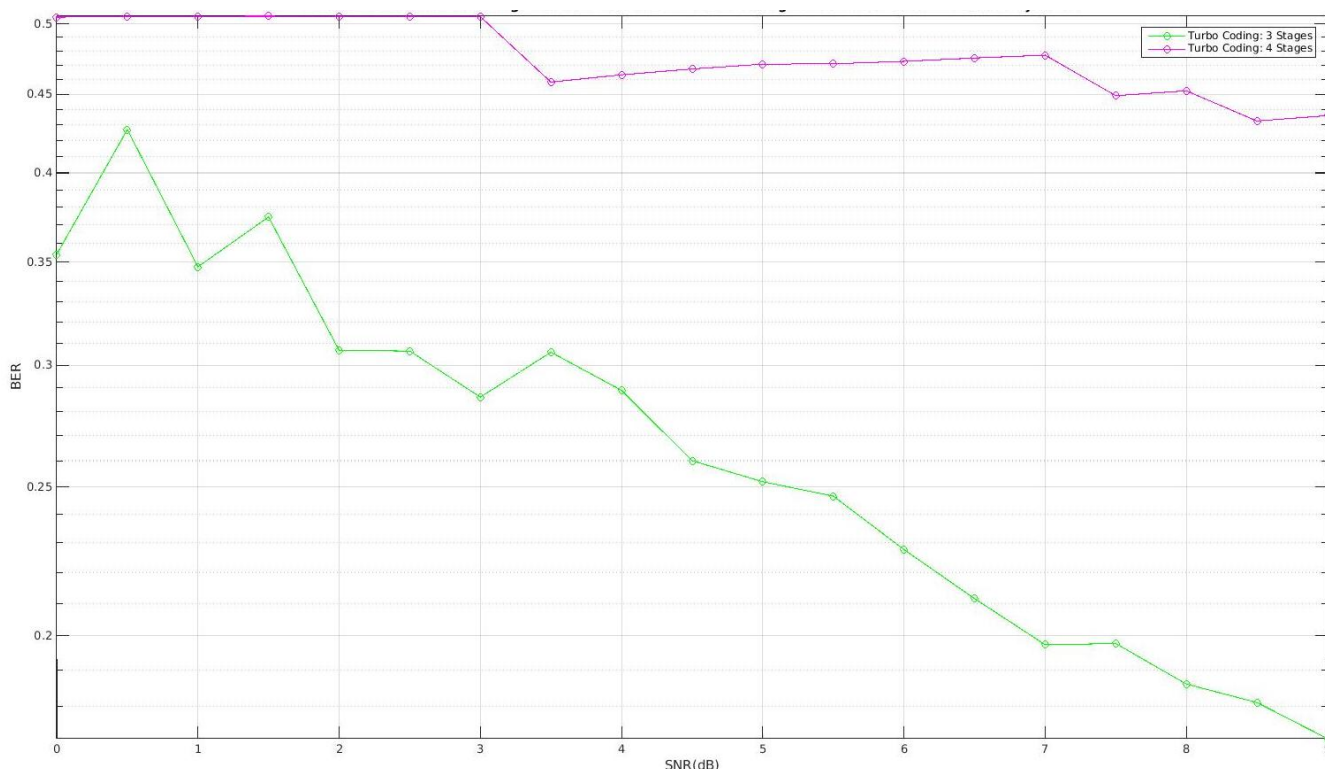
Εικόνα 5.5: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετικό αριθμό μονοπατιών για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.3 Πείραμα μετάδοσης κωδικοποιημένης πληροφορίας με την χρήση Turbo codes πάνω από κανάλι με AWGN και το φαινόμενο διάλειψης κατά Rician

Σε αυτή την παράγραφο μελετήθηκε η απόδοση του συστήματος μας με την χρήση των κωδικών Turbo. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν για το κατά πόσο η μεταβολή τους επηρεάζει το σφάλμα κατά την μετάδοση είναι οι εξής: η δομή των Turbo encoders και decoders, καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων για τους κώδικες Turbo. Παρακάτω περιγράφονται όλα τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

5.3.1 Δομή Turbo κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφηκαν οι δύο διαφορετικές δομές των Turbo κωδικοποιητών και αποκωδικοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα μας. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος με τις δύο διαφορετικές δομές. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η χρήση της δομής με 3 επίπεδα (Εικόνα 5.3) για τους κώδικες Turbo δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη χρήση δομής περισσότερων επιπέδων.

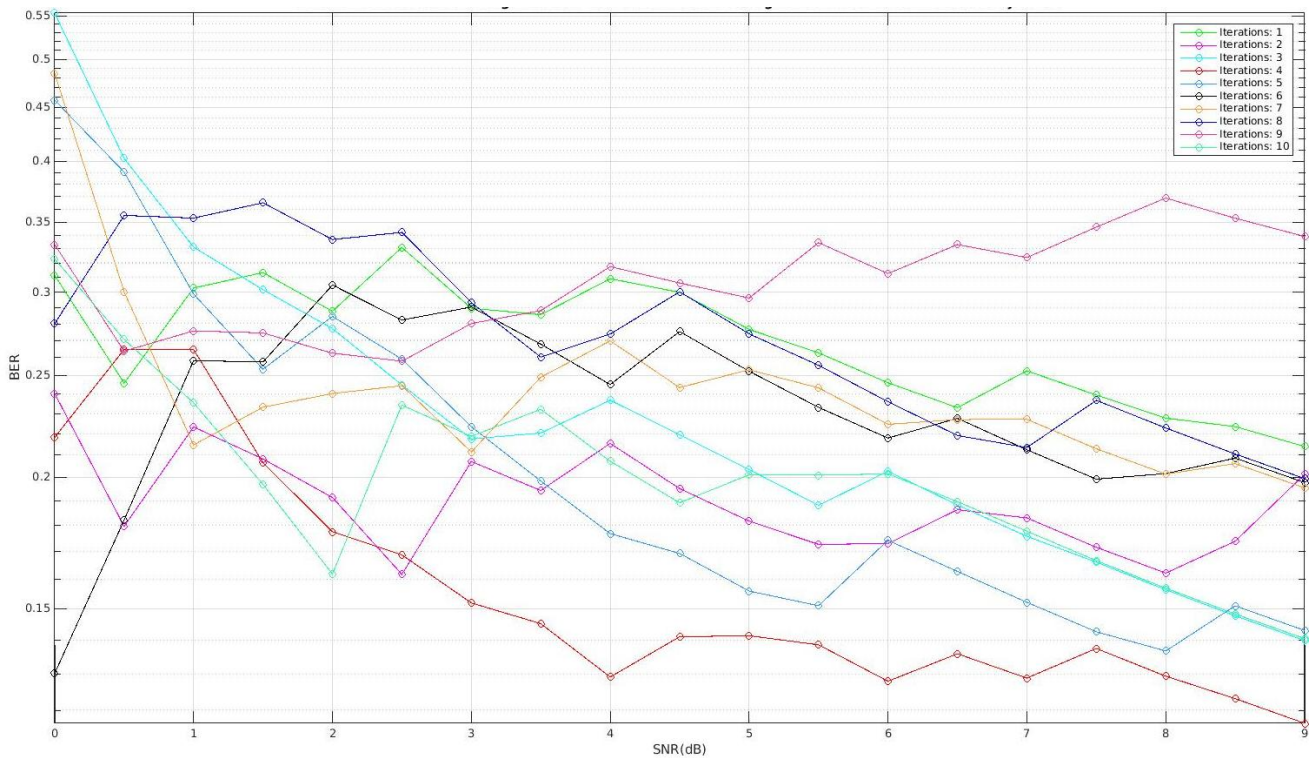


Εικόνα 5.6: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική δομή των Turbo κωδικοποιητή και αποκωδικοποιητή για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.3.2 Αριθμός επαναλήψεων κωδικοποίησης

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την μετάδοση πληροφορίας με διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων κατά την

αποκωδικοποίηση με τους κώδικες Turbo. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 6.7, η αποκωδικοποίηση με μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων φαίνεται να έχει ελάχιστα καλύτερα απόδοση από την αποκωδικοποίηση με μικρό αριθμό επαναλήψεων.



Εικόνα 5.7: Το σφάλμα για μετάδοση πληροφορίας με διαφορετική αριθμό επαναλήψεων κατά την αποκωδικοποίηση με χρήση Turbo codes για την απόστολή του σήματος πάνω από κανάλι με BPSK διαμόρφωση και θόρυβο συνδυασμό του AWGN και το φαινόμενο Rician

5.4 Συμπεράσματα

Σε αυτή την παράγραφο συνοψίζονται τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας έγιναν διάφορα πειράματα με διαφορετικές παραμέτρους και διαφορετικές τιμές των παραμέτρων αυτών. Συνοψίζοντας μπορούμε να βγάλουμε τα εξής συμπεράσματα για την επικοινωνία με δορυφορικές συνδέσεις και τη χρήση των Turbo codes.

- Σε κανάλι επικοινωνίας με AWGN, το BER μειώνεται με λογαριθμικό ρυθμό όσο αυξάνει το SNR.
- Η μετάδοση σημάτων με υψηλές συχνότητες δημιουργεί μεγαλύτερο σφάλμα από την μετάδοση της πληροφορίας με σήματα χαμηλών συχνοτήτων.
- Όσο μικρότερη είναι η αλλαγή στην συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος λόγω του φαινομένου Doppler τόσο μικρότερο είναι και το σφάλμα στη μετάδοσή μας.
- Όσο μεγαλύτερη τιμή είναι η τιμή του παράγοντα K για το φαινόμενο Rician τόσο μικρότερο σφάλμα φαίνεται να έχει η μετάδοση της πληροφορίας.
- Όσα περισσότερα μονοπάτια μετάδοσης της πληροφορίας μέχρι τον δέκτη υπάρχουν τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα μετάδοσης.
- Οι κωδικοποιητές και οι αποκωδικοποιητές για τους Turbo codes με περισσότερα επίπεδα εισάγουν μεγαλύτερο σφάλμα κατά την μετάδοση.
- Όσο αυξάνει ο αριθμός επαναλήψεων κατά την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση για τους Turbo codes τόσο λιγότερο σφάλμα παρουσιάζει η μετάδοση της πληροφορίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αγγελόπουλος Γ., (2009), «Ανάλυση, σχεδιασμός και υλοποίηση κωδίκων διόρθωσης λαθών για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Βικιπαίδεια, (2013), «Διαμόρφωση σήματος», 20 Οκτωβρίου, διαθέσιμο στο: https://el.wikipedia.org/wiki/Διαμόρφωση_σήματος, ανακτήθηκε την 05/06/2015.

Γιαννακός Α., (2013), «Θεωρία Πληροφορίας και Κωδικοποίηση Δεδομένων», 23 Δεκεμβρίου, διαθέσιμο στο: <http://masciences.blogspot.gr/2013/12/information-theory-and-data-encoding.html>, ανακτήθηκε την 05/06/2015.

Γκίκα Ζ., (2012), «Διόρθωση λαθών με τη χρήση κωδίκων RS-LDPC», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Γραβάνη Χ., Ευαγγελινού Τ., (2005), «Ανάλυση των Κωδικών Turbo Σε Συνθήκες Παλμικού Θορύβου», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Γρίβας Α., (2011), «Μελέτη και Υλοποίηση Αλγορίθμων Συμπίεσης», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Ζορκάδης Β., (2002), «Θεωρία πληροφορίας και κωδικοποίησης», τόμος Α, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Κανελλοπούλου Κ., (2009), «Προσομοίωση του συστήματος Bluetooth και μελέτη της επίδοσής του», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Λαμπρινάκος Χ.ΓΕ., (2007), «Μελέτη και Προσομοίωση Τεχνικών Κωδικοποίησης Καναλιού για Συστήματα Ασυρμάτων Επικοινωνιών Νέας Γενιάς», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μπαμπάνη Ε., (2014), «Ανάπτυξη εργαστηριακών ασκήσεων για το μάθημα Κώδικες και Θεωρία Πληροφορίας», Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε., ΤΕΙ Θεσσαλίας, Λάρισα.

Νομικός Ν., (2013), «Μελέτη παροχής υπηρεσιών ψηφιακής τηλεόρασης (DVB) από πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platforms-HAPs)», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Παναγόπουλος Δ.Α., (nd), «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες Ψηφιακές Διαμορφώσεις», Πανεπιστημιακές σημειώσεις Τηλεπικοινωνιών, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανολόγων και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Πετσέλης Ι., (2013), «Δορυφορικές επικοινωνίες», 26 Οκτωβρίου, διαθέσιμο στο: http://filiatranews.blogspot.gr/2013/10/blog-post_4332.html, ανακτήθηκε την 05/06/2015.

Σπουρλής Γ., (2012), «Αρχιτεκτονικές διόρθωσης λαθών βασισμένες σε κώδικες BCH», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.