

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**“ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ  
ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ”**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ**

**ΓΙΑΧΟ ΧΡΙΣΤΙΝΑ**

**A.M. 2006054**



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ**  
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

---

**“ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ  
ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ”**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ :**

**ΓΙΑΧΟ ΧΡΙΣΤΙΝΑ**

**A.M. 2006054**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΛΙΑΠΕΡΔΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΣΠΑΡΤΗ 2011**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΣΑ .....	12
1.2.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΤΑΙΝΙΑ .....	13
1.2.2 ΔΙΣΚΕΤΑ .....	13
1.2.3 ΣΚΗΡΟΣ ΔΙΣΚΟΣ .....	14
1.3 ΟΠΤΙΚΑ ΜΕΣΑ .....	14
1.3.1 LASERDISC .....	14
1.3.1.1 CD / CD-R / CD-RW .....	15
1.3.1.2 DVD .....	16
1.3.1.3 BLU-RAY DISC .....	17
1.4 ΑΛΛΕΣ ΜΝΗΜΕΣ .....	18
1.5 ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ .....	18
1.6 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΒΛΑΒΕΣ .....	19
1.7 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ .....	20

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	21
2.2	ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ – ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΗΜΑ .....	22
2.2.1	ΘΕΩΡΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ .....	22
2.3	ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	23
2.3.1	ΣΥΝΟΨΗ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ SHANNON .....	23
2.3.2	ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	24
2.3.3	ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ .....	27
2.4	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	27
2.4.1	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΠΗΓΗΣ .....	28
2.4.2	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ .....	29
2.4.3	Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	30
2.4.4	ΘΕΣΗ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗ / ΑΠΟΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΕ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	31
2.5	ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ .....	32
2.5.1	ΘΟΡΥΒΟΣ .....	32
2.5.1.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΑ .....	33
2.5.1.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ ΣΗΜΑ .....	35
2.5.2	ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ .....	37
2.5.3	ΚΒΑΝΤΙΣΗ .....	38

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	39
3.2	ΑΝΑΓΚΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	39
3.2.1	ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ Η/Υ .....	40
3.2.2	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	41
3.2.2.1	ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ .....	41
3.2.2.2	ΔΙΚΤΥΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤ ΚΑΝΑΛΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ .....	44
3.3	ΕΝΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ .....	45
3.3.1	ΣΥΝΕΣΤΡΑΜΜΕΝΑ ΖΕΥΓΗ ΧΑΛΚΙΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ .....	46
3.3.2	ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ .....	47
3.3.3	ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ .....	47
3.4	ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ .....	48
3.4.1	ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΑ .....	48
3.4.2	ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΑ .....	48
3.4.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ .....	49
3.5	ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ .....	50
3.6	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ – ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	51
3.6.1	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ .....	51
3.6.2	ΑΙΤΙΕΣ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ .....	51
3.6.3	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ .....	52
3.7	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	52
3.7.1	TCP / IP .....	53
3.7.2	ATM .....	54
3.7.3	POINT – TO – POINT PROTOCOL (PPP) .....	55

3.7.4	ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	55
3.8	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ OSI .....	56

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	59
4.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	62
4.2.1	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑ ΜΠΛΟΚ .....	63
4.2.2	ΣΥΝΕΛΙΚΤΙΚΗ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ .....	63
4.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ (ECC) .....	63
4.3	ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΠΛΟΚ .....	64
4.3.1	ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΜΠΛΟΚ ΚΩΔΙΚΕΣ .....	65
4.3.2	ΚΩΔΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	67
4.3.2.1	ΚΩΔΙΚΕΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	67
4.3.2.2	ΚΩΔΙΚΕΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΠΛΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ .....	67
4.3.3	ΚΩΔΙΚΑΣ HAMMING .....	68
4.3.4	ΚΩΔΙΚΑΣ ΙΣΟΤΙΜΙΑΣ .....	70
4.3.5	ΚΥΚΛΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΛΕΘΝΑΣΜΟΥ .....	72
4.3.6	ΚΩΔΙΚΑΣ BCH .....	75
4.3.7	ΚΩΔΙΚΑΣ REED - SOLOMON .....	75
4.3.8	ΚΩΔΙΚΕΣ LDPC .....	77
4.4	ΣΥΝΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ .....	77
4.4.1	ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ TCM .....	78
4.4.2	ΚΩΔΙΚΑΣ TURBO .....	79
4.5	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ .....	79

4.5.1	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ .....	79
4.5.2	ΓΕΝΕΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ FEC .....	80
4.6	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ .....	82
4.6.1	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΑΙΤΗΣΗ ΕΠΑΝΕΚΠΟΜΠΗΣ (ARQ) .....	82
4.6.2	ΠΡΟΩΘΗΜΕΝΗ Ή ΠΡΟΣΘΙΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΛΑΘΩΝ (FEC) .....	84
4.6.3	ΥΒΡΙΔΙΚΗ FEC / ARQ ΜΕΘΟΔΟΣ .....	84
4.7	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ .....	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		86

*Στην οικογένειά μου και όσους  
με άντεξαν καθ' όλη τη διάρκεια  
των σπουδών μου*



## **Ευχαριστίες**

*Για την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Λιαπέρδο για τη θερμή υποστήριξή του και τη βοήθειά του, αλλά κυρίως για την υπομονή και το ενδιαφέρον που έδειξε όλο αυτό το διάστημα.*

*Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρέχει όλα αυτά τα χρόνια.*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας υπήρξε η παρουσίαση των τεχνικών ανίχνευσης, διόρθωσης σφαλμάτων και η παρουσίαση των πρακτικών εφαρμογών τους. Επειδή το αντικείμενο είναι πολύ ευρύ και δεν μπορούσε να γίνει εκτενής παρουσίαση όλων των πτυχών του σε βάθος, θεώρησα σκόπιμο να το χωρίσω σε τέσσερα επιμέρους κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στα σφάλματα που μπορούν να συμβούν στα μέσα αποθήκευσης και γίνεται διαχωρισμός των σφαλμάτων.

Μία περιγραφή του συστήματος της ψηφιακής επικοινωνίας και ο έλεγχος της ορθής μετάδοσης της πληροφορίας, περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Αναφέρεται η έννοια της κωδικοποίησης καθώς και τα σφάλματα που δημιουργούνται κατά τη μετάδοση.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στα δίκτυα, είτε αυτά είναι ενσύρματα, είτε ασύρματα, είτε δορυφορικά. Γίνεται αναφορά στην αξιοπιστία μετάδοσης – απόδοσης του δικτύου και μία μικρή αναφορά στην ανίχνευση σφαλμάτων στα πρωτόκολλα δικτύου.

Τέλος, αναφέρονται οι μέθοδοι κωδικοποίησης ελέγχου σφάλματος. Σημαντικοί κώδικες και ο διαχωρισμός τους (σε μπλοκ και σε συνελικτικούς), καθώς και τεχνικές ελέγχου και διόρθωσης σφαλμάτων έρχονται για να ολοκληρώσουν το τέταρτο κεφάλαιο.

Η συμβολή του «ελέγχου σφαλμάτων» στη διαμόρφωση του σύγχρονου τεχνολογικού πολιτισμού είναι αποφασιστικής σημασίας.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τεχνολογικά επιτεύγματα του 21ου αιώνα συνέβαλαν σημαντικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου, καθώς διευκόλυναν την εξυπηρέτηση των καθημερινών αναγκών του. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες της καθημερινότητας είναι οι κάθε μορφής επικοινωνίες, οι οποίες έχουν παρουσιάσει εξαιρετική πρόοδο τις τελευταίες δεκαετίες. Έτσι λοιπόν, καθημερινά κάνουν την εμφάνισή τους ολοένα και νεότερες υπηρεσίες όσον αφορά τις επικοινωνίες, ενώ παράλληλα οι απαιτήσεις για γρήγορη, αδιάλειπτη και αξιόπιστη μετάδοση πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο συνεχίζουν να αυξάνονται. Αυτή η θεαματική και εξελισσόμενη πρόοδος στον τομέα των επικοινωνιών, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη συστηματική πρόοδο που παρουσιάζεται σχετικά με την απόδοση αλλά και στο χαμηλό κόστος των συσκευών και κυκλωμάτων γενικά που χρησιμοποιούνται. Αυτή η πρόοδος προκύπτει επίσης και από τις εξελίξεις που λαμβάνουν χώρα σε θεωρητικό επίπεδο. Ακρογωνιαίος λίθος των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υποδομών θεωρείται η συνέργια (συγχρονισμός) μεταξύ των διάφορων στοιχείων από τα οποία αποτελείται ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα και των τεχνικών επεξεργασίας σημάτων.

Αξιοσημείωτη επίδραση στην εξέλιξη και ανάπτυξη των επικοινωνιακών συστημάτων έχει παρουσιάσει η επιστήμη της Θεωρίας της Πληροφορίας της οποίας τα θεμέλια τοποθέτησε ο Claude Shannon με ένα άρθρο που δημοσίευσε το 1948. Η θεωρία του C. Shannon αποδεικνύει ότι υπάρχει κατάλληλος κώδικας διόρθωσης λαθών για αξιόπιστη μετάδοση της πληροφορίας μέσω ενός ενθόρυβου καναλιού. Η θεωρία του Shannon έδωσε το έναυσμα για την αναζήτηση τεχνικών κωδικοποίησης, δηλαδή κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων (Error Correction Codes), που να προσεγγίζουν τη μέγιστη χωρητικότητα του διαύλου.

Στην παρούσα πτυχιακή θα αναφερθούμε στους τομείς που δημιουργούνται σφάλματα, τον τρόπο ανίχνευσης και τους διάφορους τρόπους διόρθωσης αυτών. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να είναι είτε φυσικής προέλευσης είτε να δημιουργούνται, για παράδειγμα κατά την μετάδοση πληροφορίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΑ ΜΕΣΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

#### 1.1 Εισαγωγή

Τα μέσα αποθήκευσης δεδομένων είναι συσκευές χρήσιμες για την αποθήκευση δεδομένων και πληροφοριών. Στην επιστήμη υπολογιστών συνήθως θεωρούνται ως η δευτερεύουσα μνήμη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, κατ'αντιδιαστολή με την πρωτεύουσα κύρια μνήμη. Στις εφαρμογές του «ελέγχου σφαλμάτων» συγκαταλέγεται η αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων σε ένα κατάλληλο μέσο και η ανάκτησή τους στο μέλλον από αυτό (μνήμες RAM, εύκαμπτοι, σκληροί και συμπαγείς δίσκοι, μαγνητικές ταινίες, κ.λπ.). Σε μία τέτοια εφαρμογή, το μέσο αποθήκευσης των ψηφιακών δεδομένων μοντελοποιείται ακριβώς όπως ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι μετάδοσης. Παλιά μέσα αποθήκευσης είναι η λυχνία κενού, η διάτρητη κάρτα και η διάτρητη ταινία. Η λυχνία είναι ηλεκτρονικό εξάρτημα μέσα σε αεροστεγή γυάλινο σωλήνα όπου ουσιαστικά ελέγχει τη ροή του ρεύματος χρησιμοποιώντας μόνο ηλεκτρικές δυνάμεις. Η διάτρητη κάρτα είναι μία κάρτα 90 στηλών η οποία κυκλοφόρησε στις αρχές της δεκαετίας του '70. Επειδή η ποσότητα δεδομένων, η οποία μπορούσε να αποθηκευτεί στις διάτρητες κάρτες δεν ήταν αρκετή, η κύρια λειτουργία της κάρτας δεν ήταν η αποθήκευση μεγάλου αριθμού δεδομένων, αλλά η αποθήκευση ρυθμίσεων και εντολών για διάφορες μηχανές. Και τέλος η διάτρητη ταινία, όπου η πρώτη γνωστή απόπειρα χρησιμοποίησής της ήταν από τον Αλεξάντερ Μπένι εφευρέτη του φαξ και του ηλεκτρικού τηλέγραφου, κάθε γραμμή της ταινίας αντιπροσώπευε ένα χαρακτήρα. Καθώς υπήρχε η δυνατότητα αναδίπλωσης της ταινίας, η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων αυξήθηκε σημαντικά, συγκριτικά με τις διάτρητες κάρτες.

#### 1.2 Μαγνητικά Μέσα

Ένας από τους πιο συνηθισμένους τρόπους μεταφοράς δεδομένων από υπολογιστή σε υπολογιστή είναι η εγγραφή τους σε μαγνητική ταινία ή κάποια άλλα αφαιρούμενα μέσα (π.χ., εγγράψιμα DVD), η φυσική μεταφορά της ταινίας ή των δίσκων στη μηχανή προορισμού, και η ανάγνωσή τους εκεί. Αν και η μέθοδος αυτή δεν είναι τόσο περίπλοκη όσο η χρήση ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου επικοινωνιών, είναι συχνά πιο αποδοτική από πλευράς κόστους, ειδικά για εφαρμογές στις οποίες το βασικό ζητούμενο είναι το υψηλό εύρος ζώνης ή το χαμηλό κόστος ανά μεταδιδόμενο bit.

### 1.2.1 Μαγνητική Ταινία

Η μαγνητική ταινία δεν είναι παρά μία λεπτή κορδέλα πολύ μεγάλου μήκους, κατασκευασμένη από πολύ εύκαμπτο υλικό, το οποίο έχει τη δυνατότητα να μαγνητίζεται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, θεωρητικά μόνιμα. Η μαγνητική ταινία είναι τυλιγμένη σε έναν κύλινδρο και ενώνεται με το κέντρο δεύτερου κυλίνδρου, στο οποίο τυλίγεται και ξετυλίγεται κατά την ανάγνωση και εγγραφή της. Παλιότερα, οι κύλινδροι αυτοί ήταν ανεξάρτητοι και λόγω της μικρής πυκνότητας των μαγνητικών ταινιών σε δεδομένα, τεράστια. Με τη σταδιακή αύξηση της αναλογίας δεδομένων ανά τετραγωνικό εκατοστό, λόγω της χρήσης σύγχρονων υλικών και μεθόδων κατασκευής μαγνητικών ταινιών αλλά και ηλεκτρομηχανικών διατάξεων για την εγγραφή και ανάγνωσή τους, επήλθε και η δραματική μείωση του μεγέθους τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μαγνητικών ταινιών με τη συμπαγή μορφή της κασέτας, η οποία και απαντάται μέχρι και σήμερα σε διάφορους τύπους και μεγέθη.

### 1.2.2 Δισκέτα

Η αιτία της αντικατάστασης των μαγνητικών ταινιών από τους μαγνητικούς δίσκους, βρίσκεται στο τρόπο σειριακής αποθήκευσης των δεδομένων που επέβαλε η φιλοσοφία της αποθήκευσης σε ταινία. Ο χρήστης της δισκέτας είχε στη διάθεσή του οποιοδήποτε κομμάτι της αποθηκευμένης πληροφορίας σε 0,8 δευτερόλεπτα, σε αντίθεση με τα μερικά λεπτά που έπρεπε να περιμένει από μια συσκευή ανάγνωσης μαγνητικών ταινιών εκείνης της εποχής. Αυτή η αρχέγονη μορφή αποθηκευτικής συσκευής μαγνητικών δίσκων, αποτελείτο από 50 μεταλλικούς δίσκους με 24 ίντσες διάμετρο ο καθένας, οι οποίοι περιστρέφονταν με 1200 στροφές το λεπτό. Δύο μαγνητικές κεφαλές ήταν υπεύθυνες για την εγγραφή και ανάγνωση των δεδομένων και στις δύο πλευρές της επιφάνειας των 50 δίσκων και ήταν ικανές να μεταφέρουν δεδομένα με ρυθμό 12,5 Kilobytes ανά δευτερόλεπτο. Λόγω του υπερβολικού μεγέθους τους, οι πρώτες συσκευές αποθήκευσης σε μαγνητικούς δίσκους, ονομάστηκαν καθηλωμένοι δίσκοι.

### 1.2.3 Σκληρός Δίσκος

Όταν έκαναν την εμφάνισή τους οι πρώτοι μαλακοί δίσκοι (δισκέτες), οι ογκώδεις συσκευές με τους μεταλλικούς (καθλωμένους δίσκους) μετονομάστηκαν σε σκληρούς δίσκους. Η ονομασία αυτή χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα, για τη διαφοροποίηση μεταξύ των αναλώσιμων εύκαμπτων πλαστικών δίσκων, που γράφονται και διαβάζονται από τις ανάλογες συσκευές, και των άκαμπτων δίσκων, κατασκευασμένοι από μέταλλο ή γυαλί, που λειτουργούν σαν αυτόνομες αποθηκευτικές συσκευές. Οι σκληροί δίσκοι είναι συσκευές που περιέχουν έναν ή πολλούς άκαμπτους δίσκους, σφραγισμένους μαζί με όλη την ηλεκτρομηχανική υποδομή για την ανάγνωση και εγγραφή τους, μέσα σε αεροστεγή μεταλλικά κουτιά. Από τότε μέχρι σήμερα, η κυριότερη εφαρμογή του σκληρού δίσκου συναντάται στη μόνιμη αποθήκευση των δεδομένων της ασταθούς μνήμης του ηλεκτρονικού υπολογιστή (RAM - Random Access Memory), όπως επίσης και για την αποθήκευση λοιπών πληροφοριών και προγραμμάτων, που χρησιμοποιούνται συχνά και δε πρέπει να χαθούν μετά τη διακοπή τροφοδοσίας του υπολογιστή με ηλεκτρικό ρεύμα.

## 1.3 Οπτικά Μέσα

Σήμερα η έννοια της οπτικής αποθήκευσης παραπέμπει σε συστήματα αποθήκευσης δεδομένων που χρησιμοποιούν το φως για την αποθήκευση και ανάκτηση της πληροφορίας. Η φωτογραφία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως η πρώτη μορφή οπτικής αποθήκευσης πληροφορίας. Ωστόσο, η αναλογική αποτύπωση της πληροφορίας που μας προσφέρει η κλασική φωτογραφία έχει περιορισμένες εφαρμογές αποθήκευσης δεδομένων. Από τότε που ανακαλύφθηκε το λέιζερ και εμφανίστηκαν οι πρώτοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, η αποτύπωση ψηφιακής πληροφορίας με τη βοήθεια του φωτός κατέστη πλέον εφικτή.

### 1.3.1 Laserdisc

Η ηλεκτρονική οπτική αποθήκευση πληροφορίας έγινε γνωστή στο ευρύτερο κοινό μετά το 1973 με την εμφάνιση του οπτικού δίσκου VLP (Video Long Play - δίσκος αναπαραγωγής βίντεο μεγάλης χρονικής διάρκειας). Οι VLP δίσκοι συνήθως χρησιμοποιούνταν για την αναλογική αποθήκευση εικόνων και βίντεο. Ο τελικός χρήστης του VLP δίσκου ήταν σε θέση να παρακολουθήσει τα δεδομένα του δίσκου μέσω της συσκευής αναπαραγωγής. Η οπτική αποθήκευση ψηφιακής πληροφορίας βρήκε εμπορική εφαρμογή και κοινοποιήθηκε το 1982 με τη μορφή του οπτικού δίσκου μουσικής CD-DA (Compact Disk – Digital Audio,

Συμπαγής Δίσκος – Ψηφιακού Ήχου) από δυο μεγάλες εταιρείες, τη Sony και τη Philips.

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων οπτικής αποθήκευσης και ανάγνωσης ψηφιακών δεδομένων, βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο αντανακλάται μια τεχνητή ακτίνα φωτός από την επιφάνεια του μέσου αποθήκευσης. Ως πηγή φωτός χρησιμοποιούνται δίοδοι λέιζερ. Η ακτινοβολία λέιζερ είναι η πλέον κατάλληλη για την οπτική αναγνώριση και εγγραφή δεδομένων, για το λόγο ότι παρουσιάζει χαρακτηριστικά τα οποία ακτινοβολίες από φυσικές ή άλλου τύπου τεχνικές πηγές εκπομπής στερούνται. Η ακτινοβολία λέιζερ είναι μια δέσμη φωτός μονοχρωματική, δηλαδή εκπέμπεται σε σταθερό μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το οποίο μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την τεχνολογία της πηγής εκπομπής, από 300 μέχρι 2000 νανόμετρα και συντονισμένη, γεγονός που δικαιολογεί την υψηλή ενέργεια που φέρει η ακτίνα λέιζερ.

#### 1.3.1.1 CD / CD-R / CD-RW

Ο χρήστης ενός εγγράψιμου οπτικού δίσκου CD R (Compact Disk Recordable – Συμπαγής Δίσκος Εγγράψιμος) έχει στη διάθεσή του μια συσκευή οπτικής αποθήκευσης και ανάγνωσης δεδομένων σε αφαιρούμενους οπτικούς δίσκους, οι οποίοι έχουν πάχους 1,2mm και διάμετρο 12 cm με χωρητική ικανότητα δεδομένων 650 με 700 Megabytes. Στο εμπόριο εκτός των δίσκων διαμέτρου 12 cm κυκλοφορούν δίσκοι διαμέτρου 8 cm με χωρητικότητα 185 Megabytes, όπως επίσης και δίσκοι σε σχήμα και μέγεθος πιστωτικής κάρτας με χωρητικότητα 50 Megabytes. Η πληροφορία γράφεται στο μέσο με τη βοήθεια υπέρυθρης (μήκος κύματος 780 νανόμετρα nm) ακτινοβολίας λέιζερ. Η αποθηκευμένη πληροφορία δεν είναι δυνατό να διαγραφεί από την επιφάνεια του αποθηκευτικού μέσου, με την προϋπόθεση αυτό να επαναχρησιμοποιηθεί όπως ένας κοινός μαγνητικός δίσκος. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα στρώμα μόνο στη μια πλευρά του δίσκου, αυτή της ετικέτας και ανάλογα με τις συνθήκες αποθήκευσης και τη μεταχείριση του μέσου, αυτά μπορούν να διατηρηθούν από 5 μέχρι και 100 χρόνια.

Ο δίσκος CD RW ( Compact Disk ReWritable – Συμπαγής Δίσκος Επανεγγράψιμος) είναι εξέλιξη του CD R με τη διαφορά πως προσφέρει τη δυνατότητα διαγραφής της αποθηκευμένης πληροφορίας και της επανεγγραφής του μέσου. Αυτό είναι εφικτό με τη χρήση ιδιικού μεταλλικού κράματος στο στρώμα αποθήκευσης

δεδομένων, το οποίο όταν θερμανθεί από την ακτίνα λέιζερ αλλάζει την κατάστασή του (φάση), με αποτέλεσμα να αλλάζουν και οι οπτικές του ιδιότητες. Θερμαίνοντας το στρώμα αυτό πάνω από το σημείο τήξης του, αυτό χάνει την κρυσταλλική του δομή με αποτέλεσμα να γίνεται αδιαφανές στο σημείο εκείνο και έτσι η ακτίνα λέιζερ να το διαπερνά και να ανακλάται από το επόμενο στρώμα πίσω στον αισθητήρα ανάγνωσης των δεδομένων. Κατά τη διαγραφή των δεδομένων, η ακτίνα λέιζερ λειτουργεί σε μικρότερο ενεργειακό επίπεδο από αυτό της εγγραφής, καταφέροντας έτσι να θερμάνει το στρώμα αποθήκευσης σε θερμοκρασία ελαφρώς μικρότερη από το σημείο τήξης του και να το υποβάλλει σε ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, δηλαδή να επανασχηματιστούν οι κρυσταλλικές δομές του υλικού αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό η επιφάνεια του υλικού του στρώματος αποθήκευσης αποκτά την αρχική της μορφή, η οποία εμποδίζει την ακτίνα λέιζερ να ανακλαστεί από το στρώμα ανάκλασης, και έτσι το μέσο είναι ξανά έτοιμο για την εγγραφή δεδομένων.

### 1.3.1.2 DVD

Ο δίσκος DVD (Digital Versatile Disc Recordable – Εγγράψιμος Ψηφιακός Δίσκος Πολλαπλών Εφαρμογών) είναι ο διάδοχος του CD. Η μεγάλη χωρητική του ικανότητα και η συμβατότητα των συσκευών εγγραφής και ανάγνωσης DVD με τους δίσκους CD, κατέστησε τα DVD ως την καλύτερη και οικονομικότερη λύση σποραδικής αποθήκευσης δεδομένων για ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η τεχνολογία των συσκευών ανάγνωσης και εγγραφής δίσκων DVD είναι παρόμοια με αυτή των συσκευών οδήγησης CD. Επίσης, το μέγεθος του δίσκου DVD είναι ίδιο με το μέγεθος του CD, κατά συνέπεια, μια συσκευή εγγραφής και ανάγνωσης DVD έχει την ικανότητα να διαβάσει και να γράψει δίσκους CD το ίδιο εύκολα με τους δίσκους DVD. Οι αλλαγές που ευθύνονται για τη διαφοροποίηση του DVD από το CD έγκεινται στα μικρότερα ίχνη δεδομένων, που αποτυπώνονται στην επιφάνεια του μέσου κατά την εγγραφή, λόγω της χρήσης ακτινοβολίας λέιζερ με μικρότερο μήκος κύματος από αυτό των CD και των καλύτερων οπτικών συστημάτων για την εστίασή της, τεχνική που συντέλεσε στην αύξηση της επιφανειακής πυκνότητας του δίσκου. Με τον τρόπο αυτό, στον δίσκο DVD είναι εφικτό να αποθηκευτούν 7 φορές περισσότερα δεδομένα απ' ό τι σε ένα δίσκο CD της ίδιας διαμέτρου.



### 1.3.1.3 Blu-Ray

Η νέα γενιά συσκευών και μέσων οπτικής αποθήκευσης σε δίσκο, η οποία θα αντικαταστήσει τους δίσκους DVD, είναι οι συσκευές εγγραφής και ανάγνωσης οπτικών δίσκων με χρήση ακτίνας λέιζερ μπλε χρώματος, δηλαδή με μήκος κύματος από 370 έως 520 νανόμετρα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η τεχνολογία αυτή είναι η φυσική εξέλιξη του DVD, η οποία επηρεάστηκε ευεργετικά από την εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών εκπομπής λέιζερ. Η χρήση ακτίνας λέιζερ μικρότερου μήκους κύματος επιτρέπει τη συρρίκνωση του ίχνους που καταλαμβάνουν τα δεδομένα πάνω στην επιφάνεια του μέσου και συνεπώς συντελεί στην αύξηση της χωρητικής ικανότητας σε δεδομένα του μέσου. Μειώνοντας το μήκος κύματος της δέσμης λέιζερ από τα 650 στα 405 νανόμετρα είναι δυνατό να αυξηθεί η χωρητική ικανότητα του συμβατικού οπτικού δίσκου κατά 2,6 φορές. Σε συνδυασμό με ισχυρότερους φακούς για την εστίαση του λέιζερ πάνω στην επιφάνεια του μέσου, οι συσκευές εγγραφής και ανάγνωσης σε οπτικούς δίσκους με διάμετρο 12 cm και χωρητική ικανότητα άνω των 20 Gigabytes είναι πλέον πραγματικότητα.



Εικόνα 1.1 : Η εξέλιξη των οπτικών δίσκων και η αύξηση της χωρητικής τους ικανότητας (σηματική αναπαράσταση της επιφανειακής πυκνότητας σε ίχνη δεδομένων, που επιτυγχάνεται με τη χρήση ακτίνας λέιζερ μικρότερου μήκους κύματος και καλύτερων οπτικών για την εστίασή της).

## 1.4 Άλλες Μνήμες

Η μνήμη φλας αποτελεί σήμερα το πιο διαδεδομένο αποθηκευτικό μέσο στερεής κατάστασης και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Από κοινές ηλεκτρονικές συσκευές όπως, οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, οι προσωπικοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι παιχνιδομηχανές, τα PDA (Personal Digital Assistant – Προσωπικός Ψηφιακός Βοηθός) κλπ., μέχρι και σε ειδικό εξειδικευμένο εξοπλισμό για την καταγραφή δεδομένων για επιστημονικές και στρατιωτικές εφαρμογές.

Στο εμπόριο οι μνήμες φλας είναι διαθέσιμες σε διάφορα πακέτα, από διάφορες εταιρίες και το καθένα με τα ανάλογα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Παρά τις ομοιότητες στον τρόπο λειτουργίας τους και τα ίδια δομικά τους στοιχεία, οι διάφορες μορφές μνήμης φλας που κυκλοφορούν στο εμπόριο διαφέρουν στον τρόπο διασύνδεσης και επικοινωνίας με τη συσκευή που έχει ανάγκη τον αποθηκευτικό τους χώρο, όπως επίσης και στις επιδόσεις, το μέγεθος και τη χωρητικότητα τους. Τα πιο διαδεδομένα μέσα μη ασταθούς μνήμης είναι: Compact Flash, DiskOnChip, Flash Disk, Memory Stick, Multimedia Card (MMC).

Η σιδηροηλεκτρική μνήμη FeRAM (Ferro-electric Random Access Memory – Σιδηροηλεκτρική μνήμη τυχαίας προσπέλασης) πιθανότατα να αποτελέσει τον αντικαταστάτη της μνήμης φλας στο πολύ κοντινό μέλλον. Είναι μη ασταθής μνήμη, η οποία σε σχέση με τη μνήμη τύπου φλας είναι πολύ πιο γρήγορη και πολύ πιο ενεργειακά οικονομική. Οι ιδιότητές της αυτές την καθιστούν ιδανική λύση αποθήκευσης για φορητές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες.

Η μνήμη OUM είναι μια διαφορετική προσέγγιση στη δημιουργία μη ασταθούς μνήμης υψηλής ταχύτητας, η οποία βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των επανεγγράψιμων οπτικών δίσκων. Παρά το ότι ακόμα βρίσκεται σε θεωρητικό επίπεδο και δεν έχει κατασκευαστεί κάποιο πρωτότυπο, τα χαρακτηριστικά της αναμένονται αρκετά ελκυστικά. Τα βασικότερα από αυτά είναι: η μεγάλη ταχύτητα πρόσβασης και ανάκτησης των δεδομένων, το μικρό κόστος κατασκευής, η μεγάλη αντοχή στη συνεχόμενη χρήση, το μικρό τους μέγεθος και πολλά άλλα που αναμένετε να δούμε στο κοντινό μέλλον.

## 1.5 Το Μέλλον

Στα ερευνητικά κέντρα μεγάλων εταιριών και πανεπιστημίων, το μέλλον της αποθήκευσης ψηφιακών δεδομένων διαγράφεται κυριολεκτικά λαμπρό. Καθώς η μαγνητική αποθήκευση απειλείται από το υπερ-παραμαγνητικό φαινόμενο, η οπτική αποθήκευση δεδομένων φαίνεται να αποτελεί τη λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης και διατήρησης του ολοένα αυξανόμενου όγκου πληροφορίας που παράγεται ανά την υφήλιο. Τεχνολογίες οπτικής αποθήκευσης όπως η ολογραφική, η ογκομετρική με φθορισμό, η κοντινού πεδίου, η σιδηροηλεκτρική μοριακή, είναι μερικές από τις τεχνολογίες που θα παραλάβουν τη σκυτάλη της

οπτικής αποθήκευσης από τη σημερινή συμβατική τεχνολογία της επιφανειακής αποθήκευσης σε προ-χαραγμένους οπτικούς δίσκους.

Στόχος των νέων τεχνολογιών οπτικής αποθήκευσης είναι η όσο το δυνατό μεγαλύτερη συρρίκνωση των bits, αλλά και η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση του φυσικού όγκου του αποθηκευτικού μέσου.

## 1.6 Προβλήματα Και Βλάβες

Στα ψηφιακά και υπολογιστικά συστήματα η επίτευξη υψηλής αξιοπιστίας υπήρξε ο στόχος των σχεδιαστών από τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξής τους. Η επιθυμητή υψηλή αξιοπιστία στα συστήματα αυτά μπορεί να επιδιωχτεί με δύο βασικές μεθοδολογίες, που είναι γνωστές σαν αποφυγή βλαβών (fault avoidance) και ανεκτικότητα βλαβών (fault tolerance). Στην πράξη, η υιοθέτηση και των δύο μεθοδολογιών κατά το ένα ποσοστό ή το άλλο γίνεται απαραίτητη, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της σχεδίασης για υψηλή αξιοπιστία.

Η σχεδίαση με βάση την ιδέα της αποφυγής βλαβών στηρίζεται στην ανάπτυξη και χρησιμοποίηση εξαρτημάτων πολύ υψηλής αξιοπιστίας, στον προσεκτικό έλεγχο αυτών των εξαρτημάτων πριν και μετά τη συνδεσμολογία τους καθώς επίσης και σε υλοποιήσεις (σχεδιάσεις), που χαρακτηρίζονται από υψηλή ενσωματωμένη αξιοπιστία (built-in reliability). Όμως, οι βλάβες σε ένα σύστημα είναι αναπόφευκτες και επομένως αργά ή γρήγορα οι συνέπειες τους θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Επίσης, η επίτευξη πολύ υψηλής αξιοπιστίας στα εξαρτήματα δεν είναι πάντοτε εφικτή και οπωσδήποτε περιορίζεται από παράγοντες, που υπεισέρχονται στην κατασκευαστική διαδικασία. Ειδικότερα, στα υπολογιστικά συστήματα ο σκοπός της ανεκτικότητας βλαβών είναι να τα καταστήσει ικανά να λειτουργούν σωστά, ακόμη και όταν έχουν συμβεί βλάβες. Αυτό, γενικά μπορεί να επιτευχθεί με πλεονασμό, που μπορεί να είναι χρονικός (temporal redundancy), όταν επαναλαμβάνονται στο χρόνο ορισμένες διαδικασίες, ή συνηθέστερα υπό μορφή πρόσθετων κυκλωμάτων. Η συστηματική αντιμετώπιση της σχεδίασης για ανεκτικότητα βλαβών των υπολογιστικών συστημάτων απαιτεί ειδικούς τρόπους αντιμετώπισης που συνοψίζονται παρακάτω:

- Αρχιτεκτονικές ανεκτικότητας βλαβών, ικανές να αντιμετωπίσουν βλάβες εξαρτημάτων (π.χ. τετραπλασιασμός λογικής)
- Κώδικες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.
- Ανάνηψη (recovery) της λειτουργίας του συστήματος λόγω σφαλμάτων στο λογισμικό. Στην ανάνηψη περιλαμβάνονται οι λειτουργίες της ανίχνευσης σφάλματος, του εντοπισμού του σφάλματος και της αναδιοργάνωσης του συστήματος για την αντιμετώπιση (εξάλειψη) των αποτελεσμάτων που προκαλούνται από τα σφάλματα.

- Διαγνωστική βλαβών (fault diagnosis) και σχεδίαση για δυνατότητα ελέγχου και αυτοελέγχου (testing, self-testing) κυκλωμάτων ή συστημάτων.

*Τα πιο συνηθισμένα προβλήματα φυσικής προέλευσης μαγνητικών ταινιών είναι :*

- Σπασμένη ή χαλασμένη κασέτα
- Χαραγμένο CD / DVD
- Κατεστραμμένη ταινία ή "μασημένη" από την μονάδα

*Ενώ προβλήματα μαγνητικής προέλευσης είναι :*

- Κασέτα που δημιουργήθηκε από μονάδα με μη ευθυγραμμισμένες κεφαλές ή με φθαρμένες κεφαλές που δεν λειτουργούν καλά
- Σημάδια αργής αναπαραγωγής ή πολυχρησιμοποιημένη κασέτα όπου έχουμε φθορά της μαγνητικής ταινίας
- Φθαρμένη ή κακές συνθήκες εγγραφής (θερμότητα, υγρασία, σκόνη στον αέρα)

## 1.7 Μοντέλα Σφαλμάτων

- Το μοντέλο των τυχαίων σφαλμάτων προϋποθέτει: α) ότι η πιθανότητα εμφάνισης κάθε σφάλματος ενός bit είναι σταθερή και ανεξάρτητη από σφάλματα σε άλλα bits, β) τα πιο πιθανά σφάλματα είναι εκείνα, τα οποία αναφέρονται σε ένα bit, τα αμέσως επόμενα εκείνα που επιδρούν σε δύο bits, κ.ο.κ. Η πιθανότητα ελαττώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των bits που έχουν σφάλμα.
- Το μοντέλο των καταϊσχυριστικών σφαλμάτων (ή σφαλμάτων κατά ομάδες) προϋποθέτει: α) ότι σε περίπτωση αντικανονικής λειτουργίας της μνήμης, το πιθανότερο είναι η βλάβη να έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση σφάλματος σε μία ομάδα από διαδοχικά bits (ή σε μία φυσική περιοχή όπου τα bits είναι αποθηκευμένα σε διπλάνες θέσεις), β) εκτός της περιοχής εμφάνισης του σφάλματος αυτού, τα δεδομένα δεν έχουν κανένα άλλο σφάλμα, γ) μέσα στην περιοχή σφάλματος, η πιθανότητα για κάθε bit να είναι με ή χωρίς σφάλμα είναι ίδια, δ) η εμφάνιση του σφάλματος αυτού, είναι πιο πιθανή για μικρό αριθμό bits, παρά για μεγάλο.

Το μοντέλο των τυχαίων σφαλμάτων, αναφέρεται σε μνήμες από ημιαγωγούς, ενώ το μοντέλο των σφαλμάτων κατά ομάδες αναφέρεται σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης (ταινίες, δίσκους).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 2.1 Εισαγωγή

Στόχος των επικοινωνιών γενικά, είναι η αποστολή ενός μηνύματος από ένα σημείο σε ένα άλλο καθώς και η επιβεβαίωση της πλήρους, ορθής και κατανοητής λήψης του από έναν παραλήπτη.

Η χαρακτηριστικότερη ίσως εφαρμογή των ηλεκτρονικών στην πληροφορική είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Οι σύγχρονοι υπολογιστές αποτελούν πολύπλοκα συστήματα τα οποία δομούνται από ψηφιακά αλλά και αναλογικά κυκλώματα. Μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit – CPU), για παράδειγμα, αποτελείται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό λογικών πυλών (logical gates), οι οποίες είναι απλά ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία εκτελούν πράξεις της άλγεβρας Boole. Από την άλλη μεριά, μια κάρτα ήχου (sound card) διαθέτει αναλογικές εισόδους ή/και εξόδους μέσω των οποίων διακινούνται αναλογικά σήματα (π.χ. το σήμα που παράγεται από ένα μικρόφωνο, ή το σήμα που οδηγεί ένα ηχείο). Καθώς η επεξεργασία των αναλογικών αυτών σημάτων γίνεται με ψηφιακές τεχνικές (ψηφιακή επεξεργασία σήματος [Digital Signal Processing – DSP]), είναι απαραίτητη η μετατροπή τους από αναλογική σε ψηφιακή μορφή ή αντίστροφα, με τη βοήθεια εξειδικευμένων κυκλωμάτων που ονομάζονται μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to Digital Converters – A/D) ή μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (Digital to Analog Converters – D/A), αντίστοιχα.

Μπορούμε, επομένως, να πούμε πως τα ψηφιακά δεδομένα τα οποία επεξεργάζεται ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορούν να είναι είτε το αποτέλεσμα της επεξεργασίας άλλων δεδομένων της ίδιας (ψηφιακής) μορφής, είτε δεδομένα που προέκυψαν από τη μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά.

Η ψηφιακή μετάδοση των σημάτων, η ψηφιακή μεταγωγή και επεξεργασία είναι κάποιες από τις νέες τεχνολογίες που εισήλθαν στις τηλεπικοινωνίες, και με αυτό τον τρόπο οι αναλογικές τεχνολογίες, στις οποίες στηρίχθηκαν η κλασική τηλεφωνία, το ραδιόφωνο και η τηλεόραση, αντικαθίστανται σταδιακά από την ψηφιακή τεχνολογία, που αναπτύχθηκε κυρίως από τις επικοινωνίες data. Παράλληλα ήρθε η βελτίωση των μέσων μετάδοσης, της υποδομής (οπτικές ίνες, δορυφορικές ζεύξεις) και των τεχνικών μετάδοσης (multiplexing, compression, κωδικοποιήσεις, διαμορφώσεις). Σήμερα βρισκόμαστε στο αναπτυξιακό στάδιο ενός νέου επιστημονικού κλάδου που καλείται Τηλεπληροφορική (από τους όρους

Τηλεπικοινωνίες και Πληροφορική). Με τη βοήθεια αυτού του κλάδου της τεχνολογίας, έχουμε πλέον ευρύτερες δυνατότητες επικοινωνιών στην εξυπηρέτηση φωνής αλλά και άλλων μορφών πληροφορίας, όπως είναι το κείμενο, τα δεδομένα (data), η εικόνα, που η ολοκλήρωσή τους βοηθείται από τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας.

## 2.2 Αναλογικό - Ψηφιακό Σήμα

Τα σήματα πληροφορίας διακρίνονται σε αναλογικά και ψηφιακά. Η μετάδοση της πληροφορίας γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το σήμα που εκπέμπεται μπορεί να είναι αναλογικό, δηλαδή να μεταβάλλεται με το χρόνο παίρνοντας συνεχείς τιμές, ή ψηφιακό, δηλαδή παίρνει τις συγκεκριμένες διακριτές τιμές 0 και 1.

Οποιοδήποτε σήμα δεν είναι δυνατόν να διαδοθεί από οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας γιατί πρέπει το μέσο να είναι προσαρμοσμένο, στις χρονικές μεταβολές του. Έτσι, το σήμα πρέπει να αλλάξει χαρακτηριστικά (είδος, πλάτος, συχνότητα, κ.λ.π.), κάθε φορά που θα μεταδοθεί από διαφορετικό μέσο. Η διαδικασία επεξεργασίας του σήματος της πληροφορίας που το καθιστά ικανό να μεταδοθεί ονομάζεται διαμόρφωση. Το διαμορφωμένο σήμα είναι αυτό που τελικά μεταδίδεται και έχει αναλογική ή ψηφιακή μορφή.

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

### 2.2.1 Θεώρημα Δειγματοληψίας

Το ερώτημα με την δειγματοληψία είναι: Κάτω από ποιες συνθήκες μπορούμε να ανακατασκευάσουμε (πλήρως) το δειγματοληπτημένο σήμα; Μέρος της απάντησης αυτής δίνεται από το θεώρημα Nyquist-Shannon. Το θεώρημα δειγματοληψίας εγγυάται ότι σήματα περιορισμένου φάσματος (π.χ. σήματα τα οποία στο πεδίο της συχνότητας έχουν τιμές μέχρι μια μέγιστη συχνότητα) μπορούν να ανακατασκευαστούν πλήρως από την δειγματοληπτημένη μορφή τους εάν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι περισσότερη ή ίση από 2 φορές της μέγιστη συχνότητά τους.

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

$S(t)$ . Έτσι κάθε αναλογικό σήμα μετατρέπεται σε ψηφιακό και με κατάλληλη επεξεργασία των δειγμάτων ξαναδημιουργείται το αρχικό σήμα.

## 2.3 Σύστημα Ψηφιακής Επικοινωνίας

Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί μία αυξανόμενη απαίτηση για αποδοτικά και αξιόπιστα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών και αποθήκευσης δεδομένων. Η απαίτηση αυτή έχει ενισχυθεί από τη χρήση μεγάλων και ταχύτατων δικτύων δεδομένων, για την ανταλλαγή, την επεξεργασία και την αποθήκευση της ψηφιακής πληροφορίας. Ένα μεγάλο ζήτημα που αφορά στη σχεδίαση τέτοιων συστημάτων είναι ο έλεγχος των λαθών, ώστε να εξασφαλίζεται η επικοινωνία χωρίς λάθη.

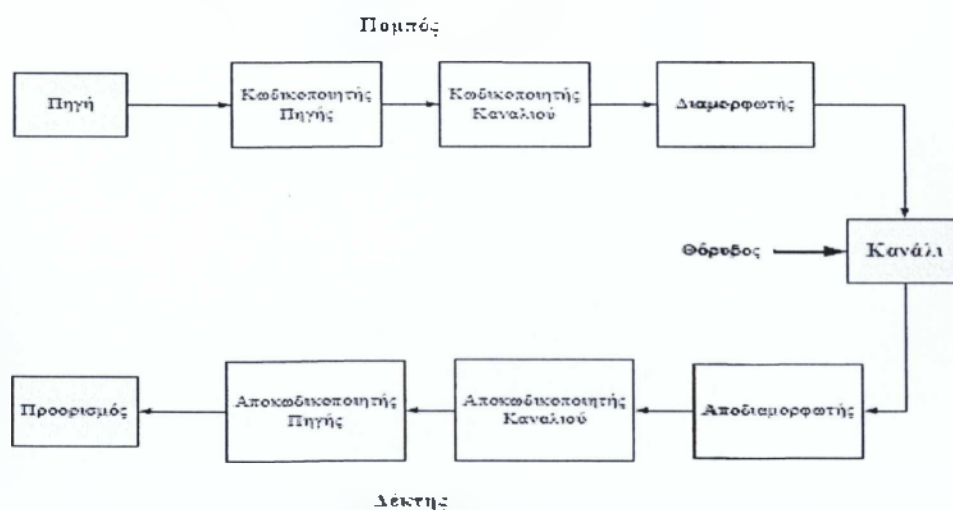
### 2.3.1 Σύνοψη Θεωρήματος Shannon

Το 1948 ο Shannon απέδειξε πως η πιθανότητα λανθασμένης μετάδοσης δεδομένων μέσω ενός ενθόρυβου τηλεπικοινωνιακού καναλιού μπορεί να περιοριστεί οσοδήποτε επιθυμούμε, υπό την προϋπόθεση ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων πληροφορίας δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο. Το όριο αυτό χαρακτηρίζει το κανάλι και το ονόμασε χωρητικότητα του καναλιού. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη κωδικοποίηση της πληροφορίας, τα λάθη που εισάγονται από ένα κανάλι με θόρυβο, μπορούν να μειωθούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό επίπεδο, χωρίς να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Όσο μικρότερη είναι η επιθυμητή πιθανότητα σφάλματος, τόσο πολυπλοκότερη και η απαιτούμενη κωδικοποίηση.

Ειδικότερα, απέδειξε ότι για κάθε κανάλι με θόρυβο υπάρχει ένας οριακός ρυθμός εκπομπής (Shannon limit), κάτω από τον οποίο η αξιοπιστία της λήψης γίνεται αυθαίρετα υψηλή, αν τα μηνύματα κωδικοποιηθούν κατάλληλα. Ο οριακός αυτός ρυθμός ονομάζεται «χωρητικότητα πληροφορίας του καναλιού» (channel capacity) και έχει μονάδες bits/second. Στο ίδιο άρθρο, ο Shannon όρισε για πρώτη φορά την «εντροπία» (entropy) ως θεμελιώδες μέτρο της πληροφορίας και καθιέρωσε το όνομα «bit» για το ποσό της πληροφορίας ενός και μόνου δυαδικού ψηφίου. Η απόδειξη του Shannon στο θεώρημα της χωρητικότητας βασίστηκε όμως σε ένα μαθηματικό κόλπο: έδειξε ότι όταν ο ρυθμός εκπομπής είναι χαμηλότερος από τη χωρητικότητα του καναλιού, τότε η μέση τιμή της πιθανότητας σφάλματος επί ενός τυχαία επιλεγμένου συνόλου κωδίκων ελέγχου σφαλμάτων, μπορεί να γίνει αυθαίρετα μικρή. Αν και αυτό αποδεικνύει την ύπαρξη κατάλληλων κωδίκων, εντούτοις αφήνει ανοικτά τα προβλήματα της εύρεσης και υλοποίησης αυτών των κωδίκων.

### 2.3.2 Βασικά Στοιχεία Ενός Συστήματος Ψηφιακής Επικοινωνίας

Στο Σχήμα 2.1. απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα και τα βασικά στοιχεία ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας. Η μετάδοση ξεκινά από την πηγή πληροφορίας και καταλήγει στον τελικό προορισμό. Τόσο η πηγή πληροφορίας όσο και ο τελικός προορισμός ενδέχεται να είναι κάποιο πρόσωπο (όπως ένας συνομιλητής μίας τηλεφωνικής συνδιάλεξης) ή κάποια μηχανή (π.χ. ένας ψηφιακός υπολογιστής συνδεδεμένος σε κάποιο δίκτυο) και δεν αποτελούν κύριο μέρος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος αλλά εξυπηρετούνται από αυτό. Σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνίας τα μηνύματα που παράγονται από την πηγή μετατρέπονται συνήθως σε μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων. Το τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον **πομπό**, το **κανάλι επικοινωνίας** και το **δέκτη**.



Σχήμα 2.1 : Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ψηφιακής επικοινωνίας.

- **Ο πομπός**

Ο πομπός αναλαμβάνει να μετατρέψει την έξοδο της πηγής σε μια μορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσα από το φυσικό κανάλι ή το μέσο διάδοσης. Τον πομπό συνθέτουν ο κωδικοποιητής πηγής, ο κωδικοποιητής καναλιού και ο διαμορφωτής. Η έξοδος της πηγής μπορεί να είναι μία συνεχής κυματομορφή ή μία ακολουθία διακριτών συμβόλων. Δεδομένου ότι στις ψηφιακές επικοινωνίες επεξεργαζόμαστε και μεταδίδουμε ψηφιακά σύμβολα προκύπτει η ανάγκη μετατροπής της εξόδου της πηγής σε δυαδικά ψηφία. Αυτή τη μετατροπή



πραγματοποιεί ο κωδικοποιητής πηγής. Ιδανικά, θα θέλαμε να αναπαραστήσουμε την έξοδο της πηγής με όσο λιγότερα δυαδικά ψηφία γίνεται. Ο Shannon ανέδειξε την σημασία αυτής της διαδικασίας ορίζοντας την έννοια της πληροφορίας και θέτοντας το όριο του ελάχιστου μέσου αριθμού δυαδικών ψηφίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση της εξόδου μίας πηγής, ώστε να είναι εφικτή η δίχως σφάλμα ανακατασκευή της. Αποδοτικότερη κωδικοποίηση πηγής μεταφράζεται, πρακτικά, σε μικρότερο όγκο των προς μετάδοση δεδομένων. Σκοπός ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η μετάδοση της πληροφορίας από την πηγή στον προορισμό στο ακέραιο. Το κανάλι προσθέτει θόρυβο στην μεταδιδόμενη πληροφορία με αποτέλεσμα να μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος. Σε πολλές εφαρμογές μάλιστα ο περιορισμός της αξιοπιστία του συστήματος καθιστά πρακτικά ανέφικτη τη μετάδοση. Προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία του συστήματος και να προστατευθεί αυτό από το θόρυβο του καναλιού, προστίθεται στην προς μετάδοση πληροφορία επιπλέον (πλεονάζουσα) πληροφορία. Με την ευθύνη της προσθήκης πληροφορίας έχει επιφορτιστεί ο κωδικοποιητής καναλιού. Τα ψηφιακά δεδομένα δεν είναι κατάλληλα για μετάδοση μέσω ενός καναλιού. Η ακολουθία ψηφιακών δεδομένων (ή αλλιώς διακριτών συμβόλων), που εξέρχεται από τον κωδικοποιητή καναλιού, θα πρέπει να μετατραπεί σε μία συνεχή κυματομορφή. Τα χαρακτηριστικά της απαιτούμενης κυματομορφής καθορίζονται από το είδος του καναλιού, το παρεχόμενο εύρος ζώνης και τα μεταδιδόμενα σύμβολα. Η διαδικασία της παραγωγής αυτής της κυματομορφής αποκαλείται διαμόρφωση του σήματος. Ο διαμορφωτής αναλαμβάνει την διεκπεραίωση της διαμόρφωσης και παραδίδει, εν συνεχεία, στο κανάλι επικοινωνίας την προκύπτουσα κυματομορφή.

- **Το κανάλι επικοινωνίας**

Το κανάλι επικοινωνίας είναι το φυσικό μέσο που χρησιμεύει για να στέλνεται το σήμα από τον πομπό στο δέκτη. Για την ασύρματη μετάδοση το κανάλι είναι συνήθως η ατμόσφαιρα. Από την άλλη πλευρά, τα τηλεφωνικά κανάλια χρησιμοποιούν ποικιλία φυσικών μέσων, όπως είναι οι ενσύρματες γραμμές και τα καλώδια οπτικών ινών. Το κανάλι επιδρά στο μεταδιδόμενο σήμα με δύο τρόπους. Αφενός, εξασθενώντας το και, αφετέρου, εισάγοντας θόρυβο. Η εξασθένιση του σήματος σχετίζεται με τη μείωση της ισχύος του κατά τη διέλευσή του μέσα από το κανάλι. Στην περίπτωση των ασύρματων επικοινωνιών η εξασθένιση είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που καλύπτει το σήμα και είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στις ενσύρματες. Στην επικοινωνία με

οπτικές ίνες η εξασθένηση του σήματος περιορίζεται σε εντυπωσιακό βαθμό. Αντίστοιχες είναι και επιπτώσεις του θορύβου σε κάθε περίπτωση καναλιού. Γενικότερα, στις τηλεπικοινωνίες, και πολύ περισσότερο στις ασύρματες, τόσο το κανάλι όσο και ο θόρυβος που προστίθεται από αυτό μοντελοποιούνται. Από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα είναι εκείνα του καναλιού δίχως μνήμη, του οποίου η έξοδος θεωρείται πως εξαρτάται μόνο από την τιμή της εισόδου του εκείνη τη στιγμή, και του λευκού gaussian προσθετικού θορύβου - Additive White Gaussian Noise (AWGN).

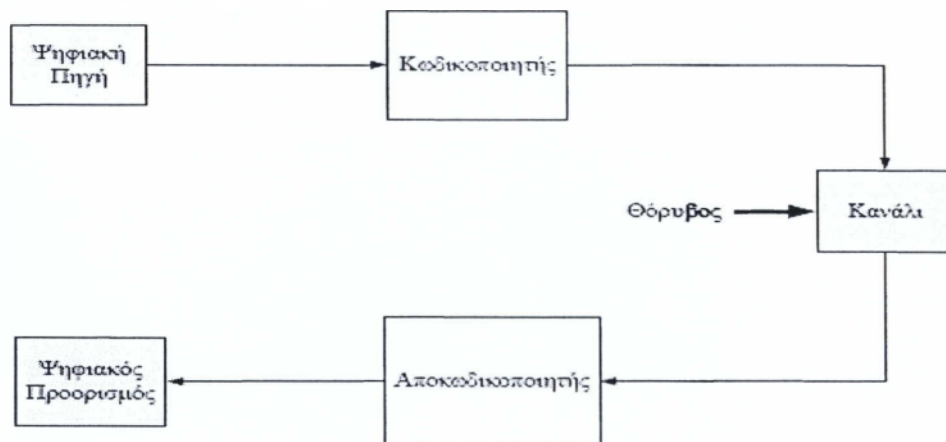
- **Ο δέκτης**

Η λειτουργία του δέκτη αποσκοπεί στην ανάκτηση του σήματος μηνύματος που περιέχεται στο λαμβανόμενο σήμα. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 2.1, ο δέκτης αποτελείται από αντίστοιχα τμήματα με εκείνα του πομπού. Σκοπός του είναι να παραλάβει τα δεδομένα από την έξοδο του καναλιού και να τα μετατρέψει σε μορφή καταληπτή από τον προορισμό, επιτελώντας την αντίστροφη λειτουργία από εκείνη του πομπού. Ο αποδιαμορφωτής λαμβάνει στην είσοδό του την έξοδο του καναλιού, μία κυματομορφή, δηλαδή, αντίστοιχη εκείνης την οποία παράγει ο διαμορφωτής στον πομπό. Την κυματομορφή αυτή την επεξεργάζεται και παράγει μία ακολουθία εξόδου που αποκαλείται ληφθείσα ακολουθία και ενδέχεται να είναι διακριτή ή συνεχής. Αντιστοιχεί στην έξοδο του κωδικοποιητή καναλιού του πομπού και μεταβιβάζεται στον αποκωδικοποιητή καναλιού. Αυτός αναλαμβάνει, αφενός να αφαιρέσει την πλεονάζουσα πληροφορία την οποία εισήγαγε ο κωδικοποιητής καναλιού, και αφετέρου, να μετατρέψει την ληφθείσα ακολουθία σε δυαδική, αξιοποιώντας την πλεονάζουσα πληροφορία. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποκωδικοποίηση καναλιού. Η στρατηγική αποκωδικοποίησης βασίζεται στους κανόνες της κωδικοποίησης καναλιού καθώς και στα χαρακτηριστικά του θορύβου που προσθέτει το κανάλι. Στην ιδανική περίπτωση, η αποκωδικοποιημένη δυαδική ακολουθία θα είναι πανομοιότυπη με την αντίστοιχη που παρήγαγε ο κωδικοποιητής πηγής του πομπού. Ωστόσο, ο κίνδυνος να μην συμβεί κάτι τέτοιο είναι υπαρκτός και οφείλεται στην παρουσία του θορύβου στο κανάλι μετάδοσης. Αποτυχημένη αποκωδικοποίηση της ληφθείσας ακολουθίας συνεπάγεται λανθασμένη μετάδοση πληροφορίας, και κατά συνέπεια περιορισμό της αξιοπιστίας του συστήματος επικοινωνίας. Η δυαδική ακολουθία που εξέρχεται από τον αποκωδικοποιητή καναλιού αποτελεί την είσοδο του αποκωδικοποιητή πηγής, ο οποίος, γνωρίζοντας τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση της πηγής, προσπαθεί να ανακατασκευάσει όσο γίνεται

πιστότερα το αρχικό αναλογικό σήμα της πηγής. Λόγω, όμως, των σφαλμάτων του κωδικοποιητή καναλιού και της πιθανής παραμόρφωσης που προκάλεσε ο κωδικοποιητής πηγής (και ίσως και ο αποκωδικοποιητής πηγής), το αναλογικό σήμα στην έξοδο του είναι μια προσέγγιση του αρχικού σήματος. Η διαφορά, ή κάποια συνάρτηση της διαφοράς, μεταξύ του αρχικού και του ανακατασκευασμένου σήματος είναι ένα μέτρο της παραμόρφωσης που προκάλεσε το σύστημα ψηφιακής μετάδοσης δεδομένων.

### 2.3.3 Απλοποιημένο Μοντέλο Ψηφιακής Επικοινωνίας

Ένα απλοποιημένο ψηφιακό τηλεπικοινωνιακό σύστημα, φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα, ο κωδικοποιητής πηγής έχει ενσωματωθεί στην πηγή σχηματίζοντας την ψηφιακή πηγή και ο αποκωδικοποιητής πηγής στον προορισμό συγκροτώντας τον ψηφιακό προορισμό. Επιπλέον, στο κανάλι επικοινωνίας έχουν ενσωματωθεί ο διαμορφωτής και ο αποδιαμορφωτής.



Σχήμα 2.2 : Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ψηφιακής επικοινωνίας.

## 2.4 Η Έννοια Της Κωδικοποίησης

Στα υπολογιστικά συστήματα, εκτός από τους αριθμούς, υπάρχει η ανάγκη για την παράσταση διαφόρων συμβόλων, όπως οι αλφαβητικοί χαρακτήρες και ειδικά σύμβολα (π.χ. τα \*, \$, κ.λ.π.). Η παράσταση των συμβόλων γίνεται με τον καθορισμό μιας αντιστοιχίας μεταξύ αυτών των συμβόλων και ορισμένων δυαδικών ψηφίων. Η αντιστοιχία αυτή ονομάζεται κωδικοποίηση (coding) ενώ ο πίνακας αντιστοιχίας ονομάζεται κώδικας (code). Η κωδικοποίηση είναι μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες, προκειμένου αναλογικά σήματα να μετατραπούν σε ψηφιακά και τα ψηφιακά να μετατραπούν σε κατάλληλη μορφή

μετάδοσης μέσα από τα διάφορα φυσικά μέσα. Έχουμε δύο βασικά είδη κωδικοποίησης, την κωδικοποίηση πηγής και την κωδικοποίηση καναλιού.

### 2.4.1 Κωδικοποίηση Πηγής

Οι Η/Υ αναγνωρίζουν μόνο ψηφιακά σήματα και για να διαχειριστούν τα αναλογικά σήματα πρέπει να αναπαρασταθούν με ψηφιακό τρόπο. Κωδικοποίηση πηγής είναι η διαδικασία κατά την οποία σε κάθε σύμβολο, γράμμα ή αριθμό αντιστοιχίζεται κατά μοναδικό τρόπο μία συγκεκριμένη δυαδική λέξη και επιτυγχάνεται με τη χρήση πινάκων αντιστοιχίας των διαφόρων χαρακτήρων με σειρές από bit που περιγράφουν τους κώδικες. Βασικό χαρακτηριστικό κάθε κώδικα είναι ο αριθμός των bits που χρησιμοποιεί για να παραστήσει το κάθε σύμβολο. Αν ένας κώδικας χρησιμοποιεί  $\mu$  αριθμό bits, ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών δηλαδή των συμβόλων που μπορεί να περιγράψει με αυτά θα είναι ίσος με  $2^\mu$ . Αν ένας κώδικας έχει ως στόχο την κωδικοποίηση  $N$  διαφορετικών συμβόλων, τότε ο αριθμός  $\mu$  των bits που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει θα δίνεται από τη σχέση:

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

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

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

## 2.4.2 Κωδικοποίηση Καναλιού

Σκοπός της κωδικοποίησης καναλιού είναι να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα λανθασμένης μετάδοσης. Όποια και αν είναι η πιθανότητα λάθους κατά την μετάδοση δεδομένων, υπάρχει τρόπος κατασκευής κωδικών διόρθωσης λαθών, οι οποίοι έχουν πολύ μικρή πιθανότητα αποτυχίας. Με το θεώρημα της κωδικοποίησης ενθόρυβου καναλιού, ο Shannon απέδειξε πως είναι εφικτό να μειωθεί η πιθανότητα λάθους κατά τη μετάδοση, αρκεί ο ρυθμός της μεταδιδόμενης πληροφορίας να μην υπερβαίνει την χωρητικότητα του καναλιού. Συγκεκριμένα, για κανάλι με εύρος ζώνης  $B$ , και για λόγο ισχύος του σήματος ως προς την ισχύ του θορύβου SNR (Signal-to-noise-ratio), η χωρητικότητα του καναλιού  $C$ , δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (σε bits per second - bps) χωρίς σφάλμα, δίδεται από τον τύπο :

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR})$$

Επομένως, αν  $R$  ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και  $C$  η χωρητικότητα του καναλιού, μπορούμε να έχουμε αξιόπιστη μετάδοση εφ' όσον:

$$R < C$$

Από την παραπάνω σχέση, γίνεται σαφές πως η χωρητικότητα του καναλιού εξαρτάται από το εύρος ζώνης και την ισχύ του θορύβου. Σκοπός του σχεδιαστή του τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι να μεταδώσει με ρυθμό ο οποίος να προσεγγίζει όσο γίνεται περισσότερο το όριο του Shannon, περιορίζοντας κατά το δυνατό την πιθανότητα σφάλματος. Αν επιθυμούμε να μειώσουμε την πιθανότητα σφάλματος χωρίς να μειωθεί ο θόρυβος ή να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης θα πρέπει να αυξήσουμε την υπολογιστική πολυπλοκότητα της κωδικοποίησης καναλιού. Προκύπτει έτσι ένα trade-off ανάμεσα στην υπολογιστική πολυπλοκότητα και την αξιοπιστία του συστήματος μετάδοσης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα και η ισχύς του μεταδιδόμενου σήματος είναι παράγοντες, οι οποίοι αυξανόμενοι βελτιώνουν την αξιοπιστία του συστήματος όμως, αυξάνουν και το κόστος της μετάδοσης. Η αναζήτηση ενός σχήματος το οποίο θα προσφέρει την αποδοτικότερη κωδικοποίηση με το μικρότερο υπολογιστικό κόστος είναι διαρκής, όσο το όριο του Shannon δεν επιτυγχάνεται.

*Οι λόγοι που κάνουν απαραίτητη την ύπαρξη των κωδικών καναλιού είναι οι παρακάτω:*

- Είναι απαραίτητο να αφαιρείται από το αποστελλόμενο σήμα η συνεχής συνιστώσα τάσης που μπορεί αυτό να έχει, λόγω του ότι το μέσο μετάδοσης δεν μπορεί να τη μεταδώσει.

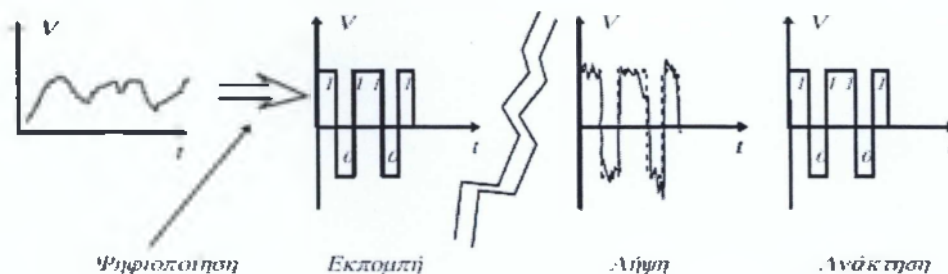
- Η ανάγκη να είναι ενήμερος ο δέκτης για τη χρονική στιγμή που ξεκινάει η μετάδοση και τη διάρκειά της.
- Η ανάγκη βέλτιστης χρήσης του εύρους ζώνης του συγκεκριμένου καναλιού επικοινωνίας.
- Η ανάγκη ύπαρξης τρόπου εντοπισμού και διόρθωσης λαθών (error detection and error correction) που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση της πληροφορίας.
- Η ανάγκη μείωσης της παραμόρφωσης και
- Η μείωση της πιθανότητας παρουσίασης διαφωνίας (crosstalk).

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

### 2.4.3 Η Ανάγκη Για Κωδικοποίηση Ελέγχου Σφάλματος (Error Control Coding – ECC)

Από την εποχή της αναλογικής μετάδοσης πληροφορίας, εχθρός των αξιόπιστων επικοινωνιών υπήρξε ο θόρυβος. Ως θόρυβος χαρακτηρίζεται κάθε ανεπιθύμητη αλλοίωση του σήματος η οποία μπορεί να οφείλεται σε διάφορα αίτια, τυχαία (όπως π.χ. η πτώση κεραυνού κατά τη διάρκεια μιας ραδιοφωνικής μετάδοσης) ή μη τυχαία.

Η ψηφιακή μετάδοση ήρθε να καταπολεμήσει σε σημαντικό βαθμό το θόρυβο, στοιχείο που υπήρξε και ένας από τους βασικότερους λόγους επικράτησής της. Αυτό επιτυγχάνεται με την αναπαράσταση του αναλογικού σήματος από μία ακολουθία ψηφίων με τιμή "0" ή "1" τα οποία εκπέμπονται με χαρακτηριστικά που διαφέρουν σημαντικά (όπως υψηλή/χαμηλή τάση ή συχνότητα εκπομπής), ώστε να είναι μεταξύ τους ευδιάκριτα ακόμα και κάτω από την επίδραση του θορύβου. Με τον τρόπο αυτό η ακολουθία εκπομπής ανακτάται με μεγάλη αξιοπιστία στο δέκτη και ο θόρυβος παρακάμπτεται σε μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 2.3 : Ψηφιακή Τεχνική: Αντιμετώπιση Θορύβου.

Παρόλα αυτά, ο θόρυβος δεν είναι δυνατόν να εξουδετερωθεί πλήρως και όταν είναι αρκετά ισχυρός μπορεί να προκαλέσει την εσφαλμένη ανάγνωση ψηφίου στη λήψη (αντί για "0", "1" και αντίστροφα, οπότε μιλάμε για σφάλμα).

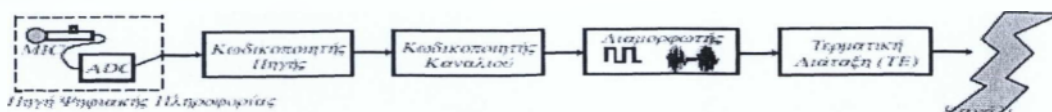
Εδώ έρχεται να δώσει λύση η Κωδικοποίηση Ελέγχου Σφάλματος. Πρόκειται για τεχνική με την οποία ανιχνεύονται, ή και διορθώνονται ψηφιακά σφάλματα με την τροποποίηση, με κατάλληλο τρόπο, της ψηφιακής ακολουθίας εκπομπής (κωδικοποίηση) και την αντίστοιχη επεξεργασία της ψηφιοσειράς στη λήψη.

Η βελτίωση στην επικοινωνία από την εισαγωγή και χρήση ενός κώδικα ελέγχου σφαλμάτων μετράται κατά κοινή σύμβαση ως «κέρδος κωδικοποίησης» (coding-gain). «Κέρδος» μίας κωδικοποιημένης ψηφιακής μετάδοσης, η οποία έχει ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) ίσο με  $P_b$  είναι η απαιτούμενη αύξηση της ισχύος λήψης χωρίς κωδικοποίηση, ώστε να επιτευχθεί ρυθμός σφαλμάτων  $P_b$ . Το κέρδος αυτό προσφέρεται όμως με κόστος την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στο κανάλι (εύρος ζώνης), της πολυπλοκότητας στην υλοποίηση και της καθυστέρησης, ώσπου τα δεδομένα να γίνουν διαθέσιμα στην έξοδο του δέκτη. Επομένως, μία μέθοδος ελέγχου σφαλμάτων αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ του εύρους ζώνης, του κέρδους κωδικοποίησης, της καθυστέρησης και της πολυπλοκότητας.

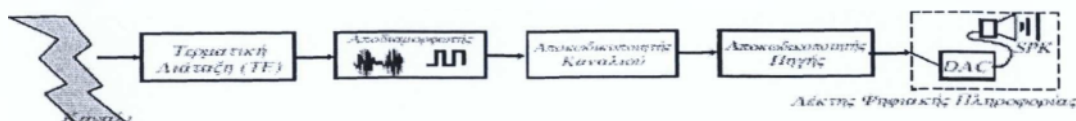
#### 2.4.4 Θέση Κωδικοποιητή / Αποκωδικοποιητή Ελέγχου Σφάλματος Σε Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται, τηλεπικοινωνιακό σύστημα με δυνατότητα ελέγχου σφάλματος. Ο Κωδικοποιητής/Αποκωδικοποιητής ECC σημειώνεται ως Κωδικοποιητής/Αποκωδικοποιητής Καναλιού επειδή αποτελεί την τελευταία βαθμίδα Κωδικοποίησης/Αποκωδικοποίησης πριν το κανάλι μεταφοράς της πληροφορίας.

**ΠΟΜΠΟΣ**



**ΔΕΚΤΗΣ**



**ΥΠΟΜΝΗΜΑ**

<b>ΜΙΚ:</b> Μικρόφωνο	<b>SPK:</b> Μεγάφωνο
<b>ADC:</b> Μετατροπέας Αναλογικού σε Ψηφιακό (Analog to Digital Converter)	<b>DAC:</b> Μετατροπέας Ψηφιακού σε Αναλογικό (Digital to Analog Converter)
<b>Κωδικοποιητής Πηγής:</b> π.χ Huffman για αφαίρεση του πλεονασμού της πηγής.	<b>Αποκωδικοποιητής Πηγής:</b> π.χ Huffman για αποκατάσταση του αφαιρεθέντος πλεονασμού της πηγής.
<b>ΤΕ:</b> Κεραία ή Laser κ.λπ.	<b>ΤΕ:</b> Κεραία ή φωτοδιόδος κ.λπ.

Σχήμα 2.4 : Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα με δυνατότητα ECC.

## 2.5 Ψηφιακά Σφάλματα

### 2.5.1 Θόρυβος

Ο θόρυβος (noise), που υπεισέρχεται αναπόφευκτα σε κάθε ηλεκτρονικό κύκλωμα, αποτελεί κάθε τυχαία (και συνήθως ανεπιθύμητη) διακύμανση του σήματος λόγω εξωτερικών αλλά και εσωτερικών αιτιών. Στην πρώτη περίπτωση ο θόρυβος χαρακτηρίζεται ως εξωγενής, (συμπεριλαμβάνονται ο ατμοσφαιρικός, ο βιομηχανικός και ο εξωγήινος) στη δε δεύτερη ως ενδογενής (συμπεριλαμβάνονται ο θερμικός, ο shot θόρυβος, ο θόρυβος μεταβλητού χρόνου, ο ετερογενής ή ανάμεικτος θόρυβος). Τα αίτια του θορύβου μπορεί να έχουν φυσική προέλευση (π.χ. ο θερμικός θόρυβος οφείλεται στη θερμική κίνηση των ηλεκτρικών φορέων) ή να εξαρτώνται από την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής διάταξης (λόγω π.χ. ατελειών στους ημιαγωγούς).

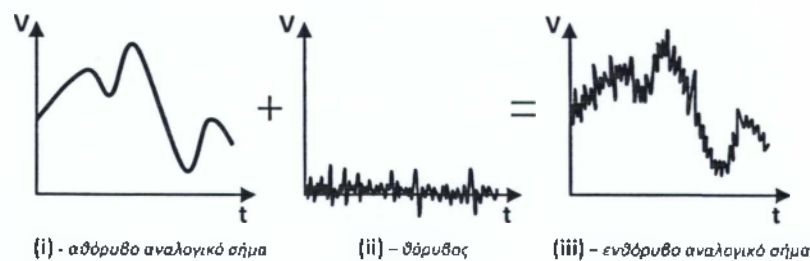
Ο όρος «θόρυβος» προέρχεται από την εποχή της αναλογικής μετάδοσης φωνής, όπου ανεπιθύμητες μεταβολές του σήματος γίνονταν αντιληπτές ως θόρυβος στο δέκτη. Πολλές διαταραχές που προκαλούνται στη φύση μπορούν να εμφανίσουν θόρυβο στους δέκτες, τροποποιώντας ανεπιθύμητα το σήμα. Στους ραδιοφωνικούς δέκτες για παράδειγμα, ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει το χαρακτηριστικό hiss στα ηχεία του ραδιοφώνου, ενώ στους δέκτες της τηλεόρασης απεικονίζεται χιόνι ή κομφετί (χρωματιστό χιόνι). Στα παλμικά επικοινωνιακά συστήματα, ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητους παλμούς ή ακόμα και να εξαφανίσει τους σωστούς προκαλώντας σοβαρά προβλήματα με αυτόν τον τρόπο.



Διάκριση των σημάτων θορύβου μπορεί να γίνει και με βάση το φασματικό τους περιεχόμενο. Ένας θόρυβος που έχει την ίδια ισχύ σε όλες τις συχνότητες ονομάζεται λευκός θόρυβος (white noise), κατ' αναλογία με το λευκό φως που περιέχει όλα τα μήκη κύματος (χρώματα). Αν θεωρηθεί ως μια σειρά δειγμάτων, η κυματομορφή ενός λευκού θορύβου στο πεδίο του χρόνου ακολουθεί την κανονική κατανομή (Gaussian distribution) και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε για τον λευκό θόρυβο το συνώνυμο Gaussian. Ο λευκός θόρυβος αποτελεί τυπική περίπτωση θορύβου, ωστόσο υπάρχουν και άλλες μορφές θορύβου με διαφορετικό (μη ομοιόμορφο) φασματικό περιεχόμενο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο θόρυβος  $1/f$  (ή θόρυβος flicker, ή θόρυβος αναλαμπής [οι συγγραφείς διστάζουν να μεταφράσουν την αγγλική λέξη flicker {=τρεμούλιασμα} με την συνώνυμη ελληνική λέξη «τρόμος», για ευνόητους λόγους]) η φασματική κατανομή του οποίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας.

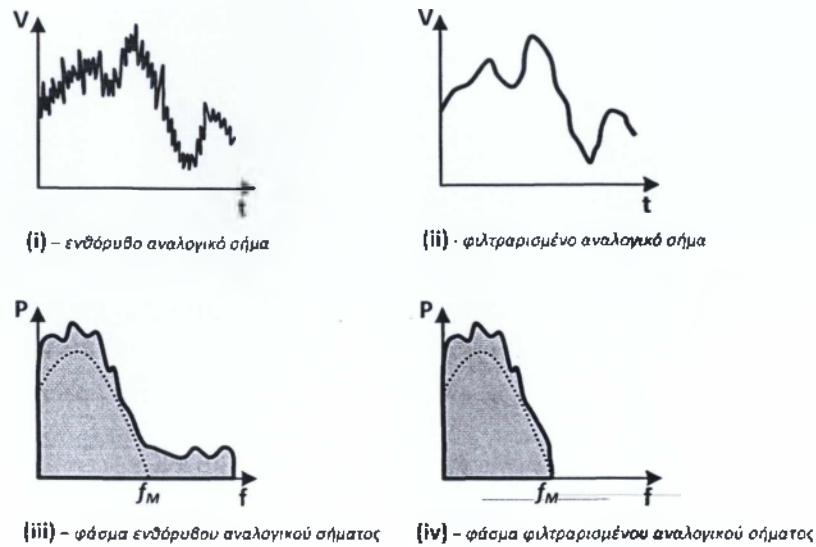
### 2.5.1.1 Επίδραση Θορύβου Σε Αναλογικό Σήμα

Ας θεωρήσουμε αναλογικό σήμα το οποίο στο πεδίο του χρόνου έχει τη μορφή του Σχήματος 2.5-i, στο οποίο επικάθεται προσθετικά θόρυβος (Σχήμα 2.5-ii). (Αν και τα είδη θορύβου που δρουν προσθετικά [προσθετικοί θόρυβοι] είναι τα συνηθέστερα, υπάρχουν και είδη που δρουν πολλαπλασιαστικά [πολλαπλασιαστικοί θόρυβοι]). Ως αποτέλεσμα της επίδρασης του θορύβου το αναλογικό σήμα θα αλλοιωθεί κατά τον τρόπο που υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.5-iii.



Σχήμα 2.5 : Επίδραση προσθετικού θορύβου σε αναλογικό σήμα

Το ερώτημα που προκύπτει είναι το εξής: Μπορούμε να απαλλαγούμε από το θόρυβο και σε ποιο βαθμό; Η απάντηση είναι πως μπορούμε, αλλά όχι απόλυτα. Ας δούμε το γιατί :



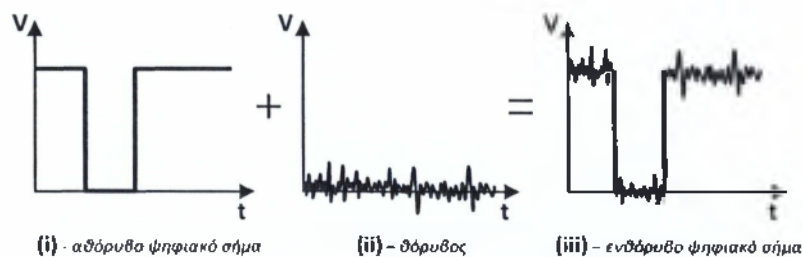
Σχήμα 2.6 : Περιορισμός του θορύβου σε αναλογικό σήμα

Ας υποθέσουμε πως το φάσμα του αναλογικού σήματος που εξετάζουμε είναι γνωστό και πως εκτείνεται από τη συχνότητα 0 έως τη συχνότητα  $f_M$ , που είναι η μέγιστη συχνότητα του σήματος. Όσον αφορά το φάσμα του ενθόρυβου σήματος (Σχήμα 2.6-iii), είναι φανερό πως οποιαδήποτε συχνότητα μεγαλύτερη της  $f_M$  θα είναι προϊόν του θορύβου. Με τη χρήση κατάλληλου φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (LPF) θα μπορούσαμε να αποκόψουμε τις ανεπιθύμητες συχνότητες (εκείνες με τιμή μεγαλύτερη της μέγιστης συχνότητας του σήματος) προκειμένου να εξουδετερώσουμε τον αντίστοιχο θόρυβο. Το φάσμα του αναλογικού σήματος μετά τη διέλευσή του από το φίλτρο θα έχει τη μορφή του Σχήματος 2.6-iv και στο πεδίο του χρόνου το αντίστοιχο σήμα θα έχει τη μορφή του Σχήματος 2.6-ii. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το τελευταίο, αν και το προσεγγίζει αρκετά, δεν ταυτίζεται απόλυτα με το αρχικό (αθόρυβο) αναλογικό σήμα, για το λόγο ότι ένα μέρος του φάσματος του θορύβου παραμένει και συγκεκριμένα το τμήμα εκείνο που ταυτίζεται φασματικά με το εύρος ζώνης του σήματος. Φυσικά, δεν θα θέλαμε να επεκτείνουμε τη δράση του φίλτρου στην περιοχή συχνοτήτων του ωφέλιμου σήματος, γιατί κάτι τέτοιο θα οδηγούσε στην παραμόρφωσή του.

Το συμπέρασμα που συνάγουμε είναι πως στην περίπτωση του θορύβου στην αναλογική μετάδοση σημάτων η πλήρης απαλλαγή μας από τον θόρυβο δεν είναι, γενικά, δυνατή.

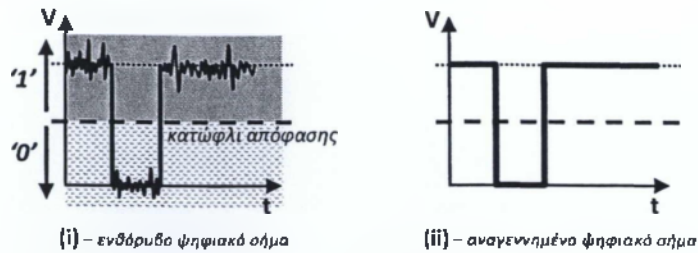
### 2.5.1.2 Επίδραση Θορύβου Σε Ψηφιακό Σήμα

Ας εξετάσουμε, τώρα, την περίπτωση ενός ψηφιακού σήματος. Έστω το ψηφιακό σήμα του Σχήματος 2.7-i. Όπως και στην περίπτωση ενός αναλογικού σήματος, το σήμα θα υποστεί την επίδραση του θορύβου (Σχήμα 2.7-ii) οδηγώντας σε ένα σήμα που διαφέρει από το αρχικό (Σχήμα 2.7-iii). (Ο θόρυβος επηρεάζει αδιάκριτα όλα τα σήματα. Άλλωστε, ο χαρακτηρισμός ενός σήματος ως ψηφιακού είναι περισσότερο λογικός παρά πραγματικός.)



Σχήμα 2.7 : Επίδραση προσθετικού θορύβου σε ψηφιακό σήμα

Το μεγάλο πλεονέκτημα στο χειρισμό των ενθόρυβων ψηφιακών σημάτων είναι πως αυτά μπορούν εύκολα να επανέλθουν στην αρχική μορφή τους με μια διαδικασία που ονομάζεται αναγέννηση (regeneration). Σε ένα ψηφιακό σήμα, είναι γνωστό πως οι λογικές στάθμες είναι δύο. Επομένως, οποιαδήποτε τιμή στάθμης τάσης ενός ενθόρυβου ψηφιακού σήματος διαφορετική των λογικών σταθμών υποδεικνύει αλλοίωση εξαιτίας του θορύβου (ή και άλλων αιτίων). Η επαναφορά της αλλοιωμένης τιμής της στάθμης τάσης στην αναμενόμενη λογική στάθμη μπορεί να γίνει με τη χρήση μιας στάθμης κατωφλίου ή κατωφλίου απόφασης (decision threshold), η τιμή της οποίας αντιστοιχεί τυπικά στο μέσο των λογικών σταθμών κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.8-i.

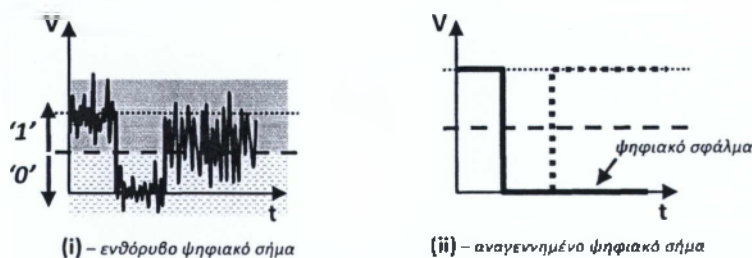


Σχήμα 2.8 : Αναγέννηση ενθόρυβου ψηφιακού σήματος

Για οποιαδήποτε τιμή τάσης μεγαλύτερη της τάσης κατωφλίου (ο έλεγχος μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός απλού αναλογικού συγκριτή στην περίπτωση ενός ψηφιακού δέκτη, ή γίνεται «εκ κατασκευής» στην περίπτωση ενός λογικού κυκλώματος) αναγεννάται η στάθμη που αντιστοιχεί στη λογική μονάδα, ενώ για τιμή τάσης μικρότερη της τάσης κατωφλίου αναγεννάται η στάθμη του λογικού μηδενός ( Σχήμα 2.8-ii).

Άρα, μπορούμε σε πρώτη προσέγγιση να πούμε πως στην περίπτωση ψηφιακών σημάτων η απομάκρυνση του θορύβου είναι πλήρης.

Παρόλα αυτά, κακή εκτίμηση της στάθμης του θορύβου ή κακή επιλογή των λογικών σταθμών ή της στάθμης απόφασης μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη αναγέννηση του ψηφιακού σήματος, οδηγώντας σε ψηφιακά σφάλματα. Παράδειγμα τέτοιου σφάλματος φαίνεται στο Σχήμα 2.9 και συνίσταται στην εσφαλμένη αναγνώριση της λογικής μονάδας ως λογικού μηδενός. Ο έλεγχος, ωστόσο, των ψηφιακών σφαλμάτων είναι δυνατός τόσο με προσεκτική σχεδίαση των συστημάτων όσο και με τη χρήση τεχνικών ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων (Error Detection and Correction).



Σχήμα 2.9 : Η έννοια του ψηφιακού σφάλματος

Η μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ενέχει αναπόφευκτα και το σφάλμα κβάντισης (quantization error), το οποίο ουσιαστικά ισοδυναμεί με θόρυβο (θόρυβος κβάντισης).

Το πλεονέκτημα των ψηφιακών συστημάτων έναντι των αναλογικών είναι πως οι τεχνικές ελέγχου και περιορισμού του θορύβου στα πρώτα είναι πολύ πιο ευέλικτες και πολύ πιο αποδοτικές.

### 2.5.2 Εξασθένηση

Με τον όρο εξασθένηση (fading) εννοούμε τη διακύμανση στην ισχύ ενός σήματος στο δέκτη. Η εξασθένηση (fading) μπορεί να είναι γρήγορη (fast fading) ή αργή (slow fading), γενική ή επιλεκτική-συχνοτήτων (frequency selective fading). Σε κάθε περίπτωση οφείλεται στην παρεμβολή μεταξύ δύο κυμάτων που φεύγουν από την ίδια πηγή αλλά φτάνουν στον προορισμό τους από διαφορετικά μονοπάτια. Επειδή το σήμα που λαμβάνεται κάθε χρονική στιγμή είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των κυμάτων που λαμβάνονται, εξουδετερώσεις και ενισχύσεις θα λάβουν χώρα μεταξύ των κυμάτων (κάθε χρονική στιγμή) των οποίων η διαφορά των διαδρομών από τον πομπό στον δέκτη θα είναι μεγαλύτερη από μισό μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένηση είναι πιο πιθανή με μικρότερα μήκη κύματος δηλαδή σε υψηλότερες συχνότητες.

Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου δείχνει ότι η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με άλλα λόγια τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν καθώς απομακρύνονται από την πηγή και η εξασθένηση είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που διένυσαν. Η εξασθένηση μετριέται σε dB και συμβαίνει να είναι ίδια αριθμητικά τόσο για την ένταση του πεδίου όσο και για την πυκνότητα ισχύος. Η εξασθένηση της πυκνότητας ισχύος είναι ίση με την εξασθένηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι σε απόσταση  $2r$  από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όσο και η πυκνότητα ισχύος του μαγνητικού πεδίου είναι κατά 6dB μικρότερες από την τιμή τους σε απόσταση  $r$  από την πηγή.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι εξασθένησης, όπως :

- Εξασθένηση λόγω των ατμοσφαιρικών αερίων
- Εξασθένηση λόγω περίθλασης που οφείλεται σε εμπόδια ή μερική παρεμπόδιση στη διεύθυνση διάδοσης

- Εξασθένηση λόγω της πολλαπλών οδεύσεων, διασποράς της δέσμης και σπινθηρισμού
- Εξασθένηση λόγω της μεταβολής της γωνίας εκπομπής / λήψης
- Εξασθένηση λόγω συμύκνωσης υδρατμών(υγρασίας)
- Εξασθένηση λόγω των θυελλών άμμου και σκόνης.

Ένας από τους πιο πετυχημένους τρόπους αντιμετώπισης της εξασθένησης είναι τεχνική space or frequency diversity.

### 2.5.3 Κβάντιση

Μετά τη δειγματοληψία ενός σήματος, το πλάτος του - αν και διακριτό - μπορεί να πάρει αυθαίρετες τιμές. Η διαδικασία της κβάντισης (quantization) συνίσταται στην στρογγυλοποίηση των αυθαίρετων αυτών τιμών πλάτους στην πλησιέστερη (συνήθως προς τα πάνω) στάθμη κβάντισης. Οι στάθμες κβάντισης (ο αριθμός των οποίων είναι δύναμη του 2, ώστε να μπορούν να κωδικοποιηθούν στο δυαδικό σύστημα με τον ελάχιστο αριθμό ψηφίων) αποτελούν ένα σύνολο διακριτών τιμών τάσης, η πυκνότητα των οποίων επιλέγεται κυρίως με βάση τα χαρακτηριστικά του σήματος. Η κβάντιση (η στρογγυλοποίηση) των δειγμάτων του αναλογικού σήματος οδηγεί αναπόφευκτα στην εισαγωγή ενός σφάλματος κβάντισης (quantization error) το οποίο αναφέρεται και ως θόρυβος κβάντισης (quantization noise). Πρόκειται για την απόκλιση μεταξύ της στάθμης προς την οποία γίνεται η κβάντιση και της πραγματικής τιμής του δείγματος. Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των σταθμών κβάντισης ο θόρυβος κβάντισης μπορεί να περιοριστεί, όχι όμως και να εξαλειφθεί πλήρως.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

#### 3.1 Εισαγωγή

Δίκτυο στο τομέα των επικοινωνιών είναι ένα σύστημα που συνδέει κυρίως τερματικές συσκευές κάθε είδους, είτε αυτές είναι απλές ("κουτά" τερματικά) είτε πρόκειται για κανονικούς υπολογιστές, ενώ διαθέτει δομή τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η όποια μεταξύ τους επικοινωνία. Ένα δίκτυο αποτελείται επίσης από κόμβους, συσκευές τηλεπικοινωνιών και μέσα σύνδεσης / διέλευσης πληροφοριών. Κύριος σκοπός του είναι να αποκτήσουν οι χρήστες του κοινή χρήση στους υπάρχοντες πόρους, δηλαδή πρόσβαση σε συσκευές υλικού, λογισμικό και δεδομένα.

Σύμφωνα με το μοντέλο αρχιτεκτονικής συστημάτων OSI του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO), ο έλεγχος σφαλμάτων, εμπίπτει στο 2ο επίπεδο διάρθρωσης των δικτύων, που ονομάζεται επίπεδο σύνδεσης δεδομένων (data link layer). Αυτό όμως δεν είναι δεσμευτικό, στις περίπλοκες μορφές του, ο έλεγχος σφαλμάτων διενεργείται ταυτόχρονα σε δύο ή περισσότερα επίπεδα του δικτύου – σε άλλα υλοποιείται με υλικό (hardware) και σε άλλα με λογισμικό (software).

Η δικτύωση των υπολογιστών προσφέρει τη δυνατότητα ανάμιξης της πληροφορίας, των επικοινωνιών και της διασκέδασης.

#### 3.2 Ανάγκη Των Δικτύων

Όταν άρχισε η πρακτική εφαρμογή του τηλεφώνου ήταν απαραίτητα δυο τηλεφωνικές συσκευές και μια γραμμή. Στην περίπτωση που κάποιος ήθελε να επικοινωνεί με δύο διαφορετικά μέρη, έπρεπε να έχει δύο τηλέφωνα και δυο τηλεφωνικές γραμμές και αν ήθελε και με έναν τρίτο χρειαζόταν επιπλέον τηλεφωνική συσκευή και γραμμή σύνδεσης. Δηλαδή κάποιος θα έπρεπε να είχε στο σπίτι του τόσες συσκευές όσες και οι συνδέσεις. Όσο ο αριθμός των χρηστών μεγάλωνε τόσο μεγάλωνε και ο αριθμός των συσκευών και των γραμμών. Η αύξηση ήταν τέτοια ώστε σε λίγο χρονικό διάστημα η κατάσταση αυτή δεν μπορούσε να συνεχιστεί γιατί το πρόβλημα της πληθώρας ήταν άλυτο. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε  $n$  σημεία που θέλουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, τότε χρειαζόμαστε  $n(n-1)/2$  συνδέσεις και ο κάθε συνδρομητής πρέπει να έχει  $n-1$  συσκευές. Σε περίπτωση που έχουμε 100 τέτοια σημεία, χρειαζόμαστε 4950 γραμμές και 9900 τηλεφωνικές συσκευές που σημαίνει ότι κάθε συνδρομητής θα πρέπει να διαθέτει 99 συσκευές. Τότε προέκυψε η

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

### 3.2.1 Δομικά Στοιχεία Ενός Δικτύου Η/Υ

Τα δομικά στοιχεία ενός δικτύου ηλεκτρονικών υπολογιστών, περιλαμβάνουν τόσο το υλικό (hardware) που συμμετέχει στο δίκτυο (και πιο συγκεκριμένα τους κόμβους επικοινωνίας, τα μέσα μετάδοσης και τις συσκευές διασύνδεσης), όσο και το λογισμικό (software) που επιτρέπει τη λειτουργία του δικτύου, και που συνήθως περιλαμβάνει το λειτουργικό σύστημα δικτύου (Network Operating System, NOS) εφοδιασμένο με τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας (communication protocols) καθώς και τις εφαρμογές εκείνες οι οποίες στηρίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση του δικτύου.

Οι κόμβοι επικοινωνίας (hosts) είναι ηλεκτρονικά συστήματα που διαθέτουν τουλάχιστον επεξεργαστή και μνήμη. Ο βασικός τους ρόλος είναι να στέλνουν σωστά τα δεδομένα στο δίκτυο, να ελέγχουν την κυκλοφορία του δικτύου, να διορθώνουν σφάλματα που ενδέχεται να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, και να ενισχύουν το σήμα εάν αυτό παρουσιάσει εξασθένηση λόγω της μετάδοσης.



Τα μέσα μετάδοσης είναι κατά τα γνωστά υπεύθυνα για τη μεταφορά των δεδομένων μέσα στο δίκτυο, και μπορεί να είναι τόσο ενσύρματα (wire) όσο και ασύρματα (wireless), ενώ τέλος οι διατάξεις διασύνδεσης, χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των συσκευών και τη μεταφορά των πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου. Τυπικές λειτουργίες που εκτελούν αυτού του είδους οι διατάξεις, είναι η διαμόρφωση (modulation) και η αποδιαμόρφωση (demodulation), καθώς και ο έλεγχος της ορθότητας των μεταφερόμενων δεδομένων.

Από την άλλη πλευρά το λογισμικό που χρησιμοποιείται σε ένα δίκτυο υπολογιστών, περιλαμβάνει τόσο το λογισμικό δικτύου όσο και το λογισμικό εφαρμογών. Το λογισμικό δικτύου είναι υπεύθυνο για την αποκατάσταση της σύνδεσης και για τον έλεγχο και την εκχώρηση δικαιωμάτων πρόσβασης στους χρήστες του δικτύου. Τέλος το λογισμικό εφαρμογών είναι ένα σύνολο δικτυακών εφαρμογών των οποίων η λειτουργία στηρίζεται αποκλειστικά στη χρήση του δικτύου, όπως είναι για παράδειγμα το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (electronic mail).

### 3.2.2 Τεχνικές Δικτύων

Με βάση τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση των δεδομένων σε ένα δίκτυο, τα δίκτυα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Δίκτυα μεταγωγής
- Δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης

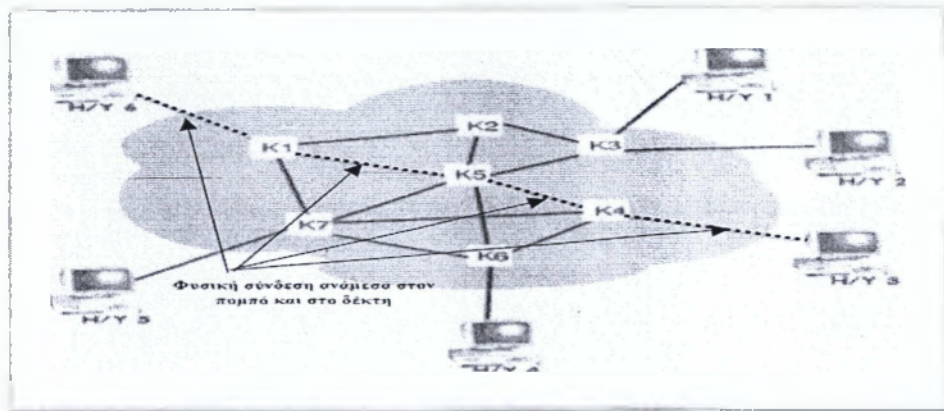
#### 3.2.2.1 Δίκτυα Μεταγωγής

Στα δίκτυα μεταγωγής, τα δεδομένα που εισέρχονται στο δίκτυο από κάποια πηγή πληροφορίας (τερματική διάταξη), μεταφέρονται μέσω ενδιάμεσων κόμβων στον προκαθορισμένο δέκτη. Οι κόμβοι διακινούν τα δεδομένα προς τον προορισμό τους αποφασίζοντας ή όχι για την αποτελεσματική διακίνησή τους. Για την αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου, οι κόμβοι συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει εναλλακτικός δρόμος μεταξύ των τερματικών σημείων. Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων στα δίκτυα μεταγωγής είναι οι εξής:

- Μεταγωγή κυκλώματος (Circuit switching)

- Μεταγωγή πακέτων (Packet switching)
- Μεταγωγή μηνύματος (Message switching)

Στη μεταγωγή κυκλώματος ένα φυσικό κανάλι προσφέρεται στους συνδρομητές αποκλειστικά σε όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας τους και καταργείται μόνο με τον τερματισμό της επικοινωνίας αυτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της τεχνικής μεταγωγής κυκλώματος αποτελεί το τηλεφωνικό δίκτυο.

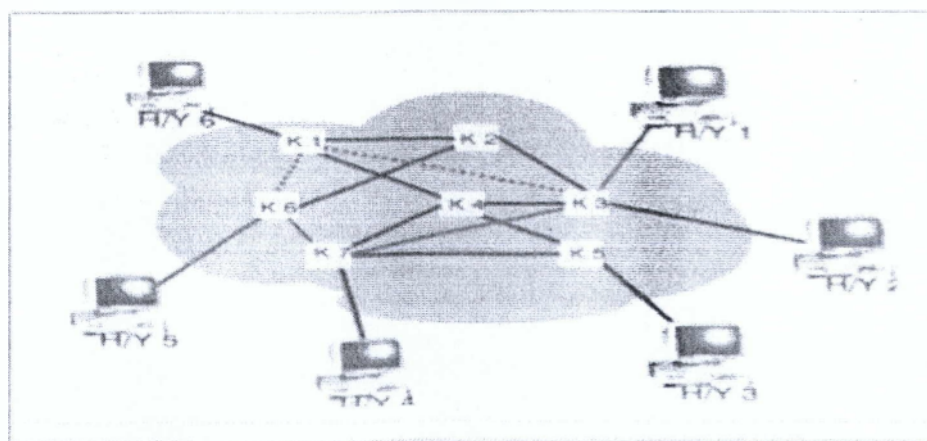


Σχήμα 3.1 : Παράδειγμα Δικτύου Μεταγωγής Κυκλώματος.

Στη μεταγωγή πακέτων τα δεδομένα που πρόκειται να μεταφερθούν τεμαχίζονται σε πακέτα ομοίου μήκους. Στην τεχνική αυτή δεν υπάρχει εκ των προτέρων σχηματιζόμενο φυσικό κανάλι για τη συγκεκριμένη επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι του δικτύου αποφασίζουν για τη διαδρομή που θα διανύσει το κάθε πακέτο ώστε να φτάσει στον προορισμό του με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Συνεπώς οι κόμβοι του δικτύου θα πρέπει να έχουν επεξεργαστική ικανότητα για την προώθηση των πακέτων. Δύο διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την προώθηση των πακέτων: α) τα αυτοδύναμα πακέτα (datagram) και β) τα εικονικά κυκλώματα (virtual circuits). Με τη μέθοδο datagram, κάθε πακέτο αντιμετωπίζεται από τους κόμβους του δικτύου σαν ένα ολοκληρωμένο μήνυμα. Κάθε κόμβος που παραλαμβάνει το πακέτο επιλέγει ποιος θα είναι ο επόμενος έτσι ώστε το δίκτυο να λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Για τον λόγο αυτόν οι κόμβοι οφείλουν να διαθέτουν αρκετές πληροφορίες για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Τα πακέτα πληροφορίας ενώ έχουν τον ίδιο προορισμό δεν ακολουθούν όλα τον ίδιο δρόμο γι' αυτό υπάρχει πιθανότητα να φτάσουν με διαφορετική σειρά από αυτήν που στάλθηκαν. Έτσι θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη διάταξη που να τα τοποθετεί στην αρχική τους σειρά. Στη

μέθοδο εικονικού κυκλώματος (virtual circuit), πριν αρχίσει η αποστολή των πακέτων αποκαθίσταται μία σταθερή νοητή σύνδεση μεταξύ των δύο συνδρομητών από όπου στη συνέχεια θα περάσουν όλα τα πακέτα του μηνύματος. Δηλαδή ο δρόμος που θα ακολουθήσουν τα πακέτα καθορίζεται μια φορά στην αρχή και παραμένει ο ίδιος μέχρι να διακοπεί η επικοινωνία των δύο συνδρομητών. Η εξασφάλιση της ύπαρξης ελεύθερου δρόμου γίνεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των δύο συνδρομητών που πρόκειται να επικοινωνήσουν. Στην τεχνική αυτή οι ενδιάμεσοι κόμβοι δεν απαιτείται να έχουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου, γιατί δεν αποφασίζουν για τη δρομολόγηση των μηνυμάτων αλλά απλά τα διακινούν στον προορισμό τους.

Στη μεταγωγή μηνύματος τα δεδομένα αποστέλλονται με τη μορφή μηνύματος που μεταδίδεται ολόκληρο ανεξάρτητα από το μέγεθός του. Το δίκτυο προωθεί το μήνυμα από κόμβο σε κόμβο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του. Κάθε κόμβος αποφασίζει ποιος θα είναι ο επόμενος που θα παραλάβει το μήνυμα, δηλαδή οι κόμβοι αποφασίζουν για τη δρομολόγηση του μηνύματος. Για τον λόγο αυτόν θα πρέπει στους κόμβους να υπάρχει αρκετή πληροφορία για τη δομή και την κατάσταση του δικτύου κάθε χρονική στιγμή. Παρά τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής, στην πράξη η μεταγωγή μηνύματος έχει αντικατασταθεί από τη μεταγωγή πακέτων.



Σχήμα 3.2 : Παράδειγμα Σύνδεσης Με Μεταγωγή Μηνύματος. Η μετάδοση γίνεται μέσω της διαδρομής H/Y 1 – K3 – K7 – K5 – H/Y 5 και εναλλακτικά αν ο κόμβος K7 δεν λειτουργούσε, μέσω της διαδρομής H/Y 1 – K3 – K1 – K6 – H/Y 5.

### Σύγκριση των μεθόδων μεταγωγής

Κάνοντας σύγκριση των μεθόδων που αναφέραμε προηγουμένως προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεταγωγή κυκλώματος είναι ιδανική μέθοδος για μετάδοση συνεχών σημάτων μεγάλης διάρκειας, π.χ. για μετάδοση φωνής (τηλεφωνικό δίκτυο) και εικόνας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται καμιά επεξεργασία των σημάτων από τη στιγμή που εγκαθίσταται το κύκλωμα (φυσικό κανάλι). Τέτοιες επεξεργασίες καθυστερούν τη μετάδοση, πράγμα που δεν είναι επιθυμητό για μεγάλα και συνεχή μηνύματα.
- Η μεταγωγή κυκλώματος δεν είναι αποδοτική για μετάδοση μηνυμάτων μικρής διάρκειας και σποραδικής φύσεως. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος που απαιτείται για να συνδεθούν οι χρήστες για κάθε σύντομη μετάδοση θα ήταν σημαντική επιβάρυνση, ενώ η διατήρηση της σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών μεταδόσεων θα σήμαινε σπατάλη ενός μεγάλου ποσοστού της χωρητικότητας της γραμμής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδείκνυται η μεταγωγή πακέτων.
- Η τεχνική εικονικού κυκλώματος συνδυάζει χαρακτηριστικά και των δύο προαναφερθέντων τύπων μεταγωγών.
- Όσον αφορά την αξιοπιστία του συστήματος η τεχνική datagram είναι πολύ καλύτερη γιατί σε περίπτωση βλάβης (π.χ. καταστροφής ενός κόμβου) το μήνυμα θα φτάσει στον προορισμό του μέσω άλλων εναλλακτικών δρόμων. Αντίθετα στη μεταγωγή κυκλώματος, καταστροφή του διαθέσιμου καναλιού θα έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια του μηνύματος. Στη μεταγωγή εικονικού κυκλώματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα απώλειας του μηνύματος ή ανάγκη επαναμετάδοσής του, αφού σε περίπτωση που χαλάσει κάποιος κόμβος όλα τα μηνύματα που διέρχονται από τον κόμβο αυτόν θα χαθούν.

#### 3.2.2.2 Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης Στο Κανάλι Διάδοσης

Τα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης στο κανάλι διάδοσης έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα δίκτυα μεταγωγής που μελετήσαμε παραπάνω. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των δικτύων είναι τα εξής:

- Δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι κόμβοι μεταγωγής μεταξύ πομπού και δέκτη.
- Το μέσο επικοινωνίας είναι κοινό για όλους τους συνδρομητές.
- Σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μέσου επικοινωνίας μόνο ένας συνδρομητής μπορεί κάθε στιγμή να εκπέμπει.
- Το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να λαμβάνεται από όλους τους συνδρομητές αρκεί να έχουν την κατάλληλη συσκευή πρόσβασης.
- Μπορεί να υπάρχουν πολλοί πομποί που μοιράζονται χρονικά το ίδιο μέσο μετάδοσης.

Οι πιο γνωστοί τύποι τεύτοιων δικτύων είναι:

- Τα επίγεια ραδιοδίκτυα.
- Τα δορυφορικά δίκτυα.
- Τα τοπικά δίκτυα (LAN).

Οι δύο πρώτοι τύποι δικτύων αποτελούν αντικείμενο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Στα δίκτυα αυτά κάθε σταθμός πρέπει να διαθέτει κεραιές εκπομπής και λήψεως και να βρίσκεται μέσα στην εμβέλεια των υπολοίπων. Τα τοπικά δίκτυα LAN είναι εντελώς διαφορετικά από τους άλλους τύπους δικτύων αλλά και εδώ το βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη κοινού μέσου επικοινωνίας για όλους τους συνδρομητές, το οποίο είναι ένα καλώδιο ή μία οπτική ίνα.

### 3.3 Ενσύρματα Δίκτυα

Τα ενσύρματα δίκτυα υπολογιστών, εδώ και πολλά χρόνια έχουν ίσως το μεγαλύτερο μερίδιο στη "πίτα" των δικτύων. Από το πρώτο μεγάλο δίκτυο – το τηλεφωνικό – μέχρι και στις μέρες μας, η σύνδεση υπολογιστών με χρήση καλωδίων είναι η πιο διαδεδομένη. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους οι μηχανικοί δικτύων χρησιμοποιούν τα ενσύρματα δίκτυα. Ο πιο σημαντικός λόγος είναι φυσικά το κόστος. Για μικρής και μεσαίας κλίμακας δίκτυα, το καλώδιο είναι η πιο ελκυστική λύση. Το κόστος κατασκευής, προμήθειας, εγκατάστασης και συντήρησης είναι πολύ μικρό, ενώ είναι αρκετά αξιόπιστο, γρήγορο και ασφαλές.

Στα ενσύρματα μέσα ανήκει μία ποικιλία από υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα, το καθένα για τις ιδιαίτερες ιδιότητές του.

Διακρίνονται στα : συνεστραμμένα ζεύγη χάλκινων καλωδίων, στα ομοαξονικά καλώδια και στις οπτικές ίνες.

Αρχικά, όταν ξεκίνησαν να αναπτύσσονται τα δίκτυα υπολογιστών, και κυρίως για μικρές αποστάσεις, χρησιμοποιούσαμε αρκετά το ομοαξονικό καλώδιο. Γρήγορα όμως παρατήθηκε διότι δεν προσέφερε μεγάλες ταχύτητες και μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις. Πλέον χρησιμοποιείται επί το πλείστον το καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους. Για καθημερινή χρήση (απλά δίκτυα), χρησιμοποιούμε το UTP, το οποίο είναι φθηνό, και αρκετά αξιόπιστο, ενώ για μεγαλύτερες απαιτήσεις χρησιμοποιείται το STP, το οποίο είναι μεν αρκετά ακριβότερο, αλλά παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Σ' αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η θωράκιση στην καλωδίωση είναι απαραίτητη προκειμένου να προστατέψουμε τα δεδομένα που μεταφέρουμε μέσα από το καλώδιο από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, είτε αυτές προέρχονται από το ίδιο το καλώδιο, είτε από το περιβάλλον (κρουστικός θόρυβος για παράδειγμα). Το γεγονός ότι τα καλώδια του UTP/STP είναι συνεστραμμένα, είναι ένα πρώτο βήμα για την προστασία από ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (κάθε καλώδιο από κάθε ζεύγος δημιουργεί αντίστροφο μαγνητικό πεδίο από το τέρι του, με σκοπό να ακυρώνει το ένα το πεδίο του άλλου), αλλά σε μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης (για παράδειγμα στο Cat5e ή στο Cat6) όπου οι ρυθμοί μετάδοσης είναι της τάξης των Gbps, αυτή η προστασία δεν είναι αρκετή. Οι οπτικές ίνες έχουν πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το χαλκό και είναι πολύ λιγότερο ευάλωτες σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και σε άλλες ανεπιθύμητες επιδράσεις κατά τη μετάδοση πληροφορίας και γι' αυτούς τους λόγους, τα οπτικά δίκτυα προτιμούνται έναντι του χαλκού ως μέσο μετάδοσης, όταν πρόκειται για μετάδοση δεδομένων με ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερο από μερικές δεκάδες Mb/s και σε αποστάσεις πάνω από 1 km.

### 3.3.1 Συνεστραμμένα Ζεύγη Χάλκινων Καλωδίων

Τα χάλκινα συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων είναι το παλαιότερο σύστημα επίτευξης επικοινωνιακών ζεύξεων αλλά και το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο λόγω χαμηλού κόστους. Αποτελείται από δύο μεμονωμένα χάλκινα σύρματα τα οποία συστρέφονται σε ελικοειδή μορφή, όπως η έλικα του DNA. Ο σκοπός της στρέψης είναι η μείωση της ηλεκτρονικής παρεμβολής. Δεν υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Είναι κατάλληλα για διέλευση και ψηφιακών και αναλογικών σημάτων και χρησιμοποιούνται ευρέως στο τηλεφωνικό δίκτυο. Η χρήση τους στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μικρής ωμικής αντίστασης του χαλκού που σημαίνει μικρή εξασθένιση του σήματος.

### 3.3.2 Ομοαξονικά Καλώδια

Ένα ομοαξονικό καλώδιο σχηματίζεται από δύο αγωγούς με κυλινδρικό σχήμα. Ο εσωτερικός αγωγός είναι μέσα στον εξωτερικό κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο δεύτερος να περιβάλλει πλήρως τον πρώτο. Ακριβώς επειδή οι δύο αγωγοί έχουν κοινό άξονα, τα καλώδια αυτά ονομάζονται ομοαξονικά. Οι δύο αγωγοί διαχωρίζονται πλήρως μεταξύ τους με τη χρήση ενός μονωτικού υλικού το οποίο από τη μία αποτρέπει την αγωγή επαφή μεταξύ τους και από την άλλη επιτρέπει τη διάδοση του σήματος. Είναι παλαιός τύπος καλωδίου, που θεωρείται ξεπερασμένο, αλλά ακόμη χρησιμοποιείται. Διαθέτουν εύρος ζώνης μέχρι 1 GHz και μεταφέρουν πληροφορία σε αποστάσεις μέχρι και 1000 km.

### 3.3.3 Οπτικές Ίνες

Σε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης η πηγή πληροφορίας μετατρέπεται πρώτα σε ηλεκτρικούς παλμούς, οι οποίοι διεγείρουν μία οπτική πηγή που παράγει φως και το οποίο διαμορφώνει ένα φέρον οπτικό κύμα. Η οπτική πηγή μπορεί να είναι ένα ημιαγωγικό laser ή μία δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diode – LED). Εδώ το μέσο μετάδοσης αποτελείται από ένα καλώδιο οπτικής ίνας το οποίο μεταφέρει φως, ενώ ο δέκτης αποτελείται από έναν οπτικό ανιχνευτή που αποδιαμορφώνει το οπτικό σήμα και μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικούς παλμούς. Για την ανίχνευση του οπτικού σήματος χρησιμοποιούνται φωτοδιόδοι ή φωτοτρανζίστορ.

Το καλώδιο οπτικής ίνας κατασκευάζεται συνήθως από γυαλί ή πολυμερές πλαστικό και η συχνότητα στην οποία λειτουργεί είναι περίπου  $10^{14}$  Hz (το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι από 1,7  $\mu\text{m}$  έως 0,8  $\mu\text{m}$ ). Το γεγονός αυτό την καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτική σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, θόρυβο, παρεμβολές από σήματα ραδιοσυχνότητας και κεραυνούς. Επομένως, οι οπτικές ίνες δεν χρειάζονται καμία θωράκιση. Επιπλέον, για δύο ή περισσότερες ίνες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, η συνακρόαση είναι αμελητέα. Η ανάπτυξη των οπτικών ινών τα τελευταία 25 χρόνια έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή καλωδίων οπτικών ινών, τα οποία παρουσιάζουν πολύ χαμηλές απώλειες κατά τη μετάδοση (δηλαδή πολύ χαμηλή εξασθένιση), σε σύγκριση με τα καλύτερα καλώδια χαλκού και τα ομοαξονικά καλώδια. Οι σύγχρονες οπτικές ίνες παρουσιάζουν εξασθένιση μόλις 0,2 dB/km με αποτέλεσμα οι επαναλήπτες σε συστήματα επικοινωνίας με οπτικές ίνες, να τοποθετούνται σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι οπτικές ίνες να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.

### 3.4 Ασύρματα Δίκτυα

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο.

#### 3.4.1 Ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα αποτελούν μια ειδική κατηγορία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που καλύπτουν μία πολύ μεγάλη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Για τη μετάδοση αυτών των σημάτων χρησιμοποιείται μία κεραία, το κύκλωμα της οποίας διαρρέει εναλλασσόμενο ρεύμα, απελευθερώνοντας με το τρόπο αυτό τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά αυτά κύματα συλλέγονται από τη κεραία λήψης, η οποία δεν είναι ανάγκη να βρίσκεται σε οπτική επαφή με τη κεραία εκπομπής της ακτινοβολίας. Τα ραδιοκύματα έχουν χαμηλότερες συχνότητες από τα μικροκύματα, διανύουν εκατοντάδες χιλιόμετρα, αλλά είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στις παρεμβολές. Ανάλογα με την τιμή της συχνότητάς τους, υποδιαιρούνται σε πέντε κατηγορίες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα για τη μετάδοση τηλεοπτικών σημάτων (η κατηγορία VHF, (Very High Frequency)).

#### 3.4.2 Μικροκύματα

Τα μικροκύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος που κυμαίνεται από 1 έως 30 cm, δηλαδή είναι μεγαλύτερο του ορατού φωτός και μικρότερο των ραδιοκυμάτων.

Ανάλογα με το μήκος κύματος που τα χαρακτηρίζει κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Τα δεκατομετρικά, (με μήκος κύματος από 10 cm έως 1 m και συχνότητα από 300 MHz έως 3 GHz),
- Τα εκατοστομετρικά, (με μήκος κύματος από 1 cm έως 10 cm και συχνότητα από 3 έως 30 GHz),
- Τα χιλιοστομετρικά, (με μήκος κύματος από 1 mm έως 1 cm και συχνότητα από 30 έως 300 GHz).



Το κύριο χαρακτηριστικό της μετάδοσης των μικροκυμάτων, είναι πως αυτά δεν ανακλώνται στην ιονόσφαιρα, και επομένως μεταδίδονται σαν επιφανειακά κύματα, δηλαδή ακολουθούν την καμπυλότητα της γης, και κινούνται κατά μήκος της επιφάνειας της. Επιπλέον μεταδίδονται ευθύγραμμα, και στις πιο πολλές περιπτώσεις απαιτείται η χρήση αναμεταδοτών οι οποίοι ενισχύουν το σήμα και το προωθούν προς τον τελικό του προορισμό. Προκειμένου η μετάδοση των ραδιοκυμάτων να μη διακόπτεται από φυσικά και τεχνητά εμπόδια, όπως είναι για παράδειγμα τα βουνά και τα υψηλά κτίρια, ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται τοποθετημένοι σε υψηλούς πύργους οι οποίοι έχουν οπτική επαφή και βρίσκονται σε απόσταση της τάξεως των δεκάδων χιλιομέτρων.

### 3.4.3 Τεχνικές Διαφορικής Λήψης

Ανάλογα με το περιβάλλον που λειτουργεί ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (σήμα) φτάνει στο δέκτη διαμέσου πολλών διαδρομών. Αυτές οι πολλαπλές διαδρομές που είναι δυνατόν να ακολουθήσει το σήμα μας μέχρι να φτάσει από τον πομπό στον δέκτη, δημιουργούν μικρής κλίμακας διακυμάνσεις στη στάθμη ισχύος του σήματος, ένα φαινόμενο που περιγράφεται με τον όρο διαλείψεις (fading). Το αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, είναι η ποιότητα της επικοινωνίας να υποβαθμίζεται ανάλογα με το πόσο έντονα λαμβάνει χώρα στο κανάλι μας το φαινόμενο. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, εφαρμόζεται η τεχνική του διαφορισμού (diversity). Η τεχνική του διαφορισμού βασίζεται στο γεγονός, πως η πιθανότητα, όλα τα λαμβανόμενα αντίγραφα να έχουν χαμηλή στάθμη ισχύος, είναι πολύ μικρή. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν το γεγονός, ότι ένα τουλάχιστον αντίγραφο θα είναι ισχυρό, υιοθετούμε κανόνες επιλογής με βάση τους οποίους επιλέγουμε το βέλτιστο αντίγραφο του λαμβανόμενου σήματος. Ακόμα η τεχνική διαφορίσης αποσκοπεί στην καταπολέμηση του φαινομένου των διαλείψεων λόγω των πολλαπλών διαδρομών (multipath) που μπορεί να ακολουθήσει το σήμα. Τα είδη τεχνικών διαφορικής λήψης είναι : η Διαφορική Λήψη Θέσης (Site Diversity, SD), η Διαφορική Λήψη Τροχιάς (Orbital Diversity, OD), η Διαφορική Λήψη Συχνότητας (Frequency Diversity, FD) και, τέλος, η Διαφορική Λήψη Χρόνου (Time Diversity, TD).

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες τους οποίους πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά τη μετάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσω ενός ασύρματου καναλιού. Αυτοί οι παράγοντες αποτελούν και χαρακτηριστικά συγχρόνως, τα οποία βοηθούν ώστε να σχεδιαστεί όσο το δυνατό αρτιότερα, το όλο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Τέτοιοι παράγοντες είναι τα κύρια χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος μεταξύ του πομπού και του δέκτη, ο καιρός που επικρατεί, τυχόν

εμπόδια που μπορεί να παρεμβάλλονται μεταξύ των δύο κεραιών και γενικά οτιδήποτε μπορεί να θεωρηθεί ότι επηρεάζει το όλο σύστημα, από τη στιγμή που το κύμα τα εκπεμφθεί από την κεραία εκπομπής.

### 3.5 Δορυφορικά Δίκτυα

Η δορυφορική επικοινωνία πραγματοποιείται διά της χρήσης ειδικών δορυφόρων που βρίσκονται στο διάστημα και εκτελούν ομαλή κυκλική κίνηση γύρω από τη γη, και επίγειων σταθμών, με τους οποίους οι δορυφόροι διατηρούν συνεχώς οπτική επαφή.

Η βασική λειτουργία του δορυφόρου, είναι να συλλαμβάνει με τις κεραιές του σήματα μικροκυμάτων σε συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων, τα οποία εκπέμπονται από τους επίγειους σταθμούς εκπομπής. Τα σήματα αυτά ενισχύονται και αναμεταδίδονται σε διαφορετική συχνότητα, προς τους επίγειους σταθμούς λήψης. Η διάταξη που πραγματοποιεί όλη αυτή τη διαδικασία ονομάζεται δορυφορικός αναμεταδότης και κάθε δορυφόρος περιλαμβάνει περίπου 20 τέτοιες διατάξεις, οι οποίοι γενικά έχουν διαφορετικό εύρος ζώνης, και λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Λόγω της μεγάλης απόστασης που διανύουν τα σήματα προς μετάδοση, παρατηρείται σημαντική καθυστέρηση στη μετάδοση του σήματος και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Η δυνατότητα απόκτησης του σήματος βασικής ζώνης στο δορυφόρο δίνει την ευκαιρία επεξεργασίας του πριν από την αναμετάδοσή του. Με τον τρόπο αυτό, εξαφανίζεται ο περιορισμός της άμεσης δρομολόγησης του σήματος στην κάτω ζεύξη, ενώ, παράλληλα, προσφέρονται μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως η δυνατότητα κωδικοποίησης στην κάτω ζεύξη, η μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης, καθώς και η εφαρμογή τεχνικών σάρωσης γεωγραφικών περιοχών με χρήση κεραιών λεπτής δέσμης.

Κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Για την κάτω ζεύξη, ο κωδικοποιητής βρίσκεται στο δορυφόρο και ενεργοποιείται από τον επίγειο σταθμό. Έτσι, η ζεύξη επωφελείται από το κέρδος κωδικοποίησης, με αντίτιμο την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης κατά παράγοντα ίσο με τον αντίστροφο του λόγου κωδικοποίησης.

Ο ρόλος των δορυφόρων στη παροχή υπηρεσιών αλλάζει. Πλέον δεν προσφέρει μόνο τηλεφωνικές συνδέσεις και τηλεοπτικό σήμα αλλά δίνει τη δυνατότητα σε εκατομμύρια χρήστες όπου και αν βρίσκονται να έχουν πρόσβαση σε κανάλια πληροφοριών και δεδομένων.

## 3.6 Αξιοπιστία Μετάδοσης - Απόδοση Δικτύου

### 3.6.1 Αξιοπιστία Μετάδοσης

Το δίκτυο θα πρέπει να μεταφέρει χωρίς σφάλματα την πληροφορία από τον ένα άκρο στο άλλο. Όμως τα σφάλματα είναι αναπόφευκτα και το δίκτυο θα πρέπει να ναι εξοπλισμένο με μηχανισμούς εντοπισμού και αντιμετώπισης των σφαλμάτων μετάδοσης.

### 3.6.2 Αιτίες Των Σφαλμάτων Μετάδοσης

Τα σφάλματα μεταφοράς προκύπτουν από διάφορες αιτίες. Συχνά πρόκειται για σφάλματα κατά τη μετάδοση των δεδομένων από το φυσικό μέσο μεταφοράς (πχ. χάλκινο καλώδιο, οπτική ίνα ή ασύρματη ζεύξη). Σε αυτή την περίπτωση αντιστρέφεται η τιμή σε ένα δυαδικό ψηφίο ή σε μια ομάδα από συνεχόμενα δυαδικά ψηφία (από 0 γίνεται 1 και το αντίστροφο). Αιτίες εμφάνισης τέτοιων σφαλμάτων είναι η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, ο εξωτερικός θόρυβος και ο θόρυβος από τα κυκλώματα πομπού και δέκτη.

Μια άλλη συχνή αιτία εμφάνισης σφαλμάτων μετάδοσης στα δίκτυα δεδομένων είναι η απόρριψη πακέτων στους κόμβους. Είναι συνηθισμένο φαινόμενο τα πακέτα να αποθηκεύονται προσωρινά στους αποταμιευτές των κόμβων. Επειδή όμως οι αποταμιευτές είναι συγκεκριμένης χωρητικότητας. Ένα πακέτο είναι πιθανό να βρει τον αποταμιευτή γεμάτο κατά την άφιξη του στον κόμβο. Σε αυτή την περίπτωση το πακέτο απορρίπτεται από τον κόμβο.

Τέλος, οι βλάβες ή οι δυσλειτουργίες του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, όπως επίσης και η εσφαλμένη διαμόρφωση και παραμετροποίηση του δικτυακού λογισμικού, είναι επίσης πιθανές αιτίες εμφάνισης σφαλμάτων μετάδοσης (πχ μια λανθασμένη ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης ενός κόμβου μπορεί να ανακατευθύνει όλα τα πακέτα μιας ροής δεδομένων προς έναν ανύπαρκτο προορισμό). Σ αυτή την περίπτωση ο παραλήπτης – κόμβος μπορεί να μην λάβει δεδομένα που του είχαν αποσταλεί ή και μπορεί και να λάβει δεδομένα που δεν προορίζονταν για αυτόν.

### 3.6.3 Μηχανισμοί Εντοπισμού Και Αντιμετώπισης Των Σφαλμάτων Μετάδοσης

Το δίκτυο θα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει τα εσφαλμένα πακέτα, πριν τα παραδώσει στον προορισμό τους. Για το λόγο αυτό το δίκτυο προσθέτει σε κάθε πακέτο μια επιπλέον πληροφορία πριν από την μεταφορά του. Έτσι ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μηχανισμό εντοπισμού και την επέκταση της επιπλέον πληροφορίας, το δίκτυο εντοπίζει αλλοιώσεις σε ένα, δυο ή και περισσότερα δυαδικά ψηφία ταυτόχρονα. Αυτή η πρόσθετη πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την διόρθωση των εσφαλμένων δυαδικών ψηφίων. Εάν ένα δυαδικό ψηφίο αναγνωριστεί ως λανθασμένο, τότε η διόρθωση του απαιτεί απλώς την αντιστροφή του σε 0 ή 1.

Μια άλλη τεχνική αντιμετώπισης των σφαλμάτων μετάδοσης είναι η επαναμετάδοση των εσφαλμένων ή των απολεσθέντων πακέτων, στην οποία ο παραλήπτης ζητά την επανεκπομπή του συγκεκριμένου πακέτου από τον αποστολέα.

Τέλος, αρκετές σύγχρονες εφαρμογές παρουσιάζουν μια μικρή ανοιχτή ανοχή στην εμφάνιση σφαλμάτων. Για παράδειγμα κατά την μετάδοση κινούμενης εικόνας ένα πακέτο αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό τμήμα της εικόνας (πχ 8 x 8 κουκκίδες). Σε περίπτωση απώλειας του πακέτου ενεργοποιούνται διάφορες τεχνικές αναδημιουργίας του τμήματος της εικόνας από τα γειτονικά του, αντίστοιχα, τμήματα. Έτσι η απώλεια ενός πακέτου γίνεται αντιληπτή στον τελικό χρήστη με μια μικρή ποιοτική υποβάθμιση της λαμβανόμενης εικόνας, η οποία ως συνήθως είναι μέσα στα αποδεκτά όρια.

## 3.7 Ανίχνευση Σφαλμάτων Στα Πρωτόκολλα Δικτύων

Ένα πρωτόκολλο χρησιμοποιείται για την απικοινωνία μεταξύ οντοτήτων που βρίσκονται σε διαφορετικά συστήματα π.χ. πρόγραμμα μεταφοράς αρχείων σε δύο διαφορετικούς υπολογιστές.

Κύρια σημεία ενός πρωτοκόλλου είναι :

- Σύνταξη, όπου περιλαμβάνει σημεία όπως η μορφή των δεδομένων και τα επίπεδα του σήματος
- Σημασιολογία, όπου περιλαμβάνει πληροφορίες ελέγχου για το χειρισμό των σφαλμάτων

- Συγχρονισμός, όπου περιλαμβάνει τον εναρμονισμό της ταχύτητας και της ακολουθίας των πακέτων

Κάθε PDU (Protocol Data Unit) δεν περιέχει μόνο δεδομένα αλλά και πληροφορία ελέγχου. Στην πραγματικότητα μερικά PDU αποτελούνται αποκλειστικά από πληροφορία ελέγχου που μπορεί να είναι:

- Διεύθυνση αποστολέα ή/και παραλήπτη
- Κώδικα ανίχνευσης σφαλμάτων
- Έλεγχο του πρωτοκόλλου (πρόσθετες πληροφορίες για την υλοποίηση λειτουργιών).

### 3.7.1 TCP / IP

Το TCP/IP περιέχει πρωτόκολλα τα οποία καθορίζουν πως το router θα βρει διαδρομή για να κατευθύνει τα πακέτα στον προορισμό τους. Αυτά είναι : a) Routing Information Protocol (RIP) το οποίο είναι το παλαιότερο routing protocol. Με απλά λόγια τα router στέλνουν πληροφορίες γι' αυτούς και επίσης αποστέλλουν το λεγόμενο hop count δηλαδή πληροφορία σχετικά με το πόσο απομακρισμένοι είναι. Με αυτόν τον τρόπο τα router μεταξύ τους γνωρίζουν ποιοι απ' αυτούς είναι διαθέσιμοι και να εκτιμήσουν την συντομότερη διαδρομή για να αποστείλουν το πακέτο στον προορισμό τους b) Open Shortest Path First (OSPF) είναι νεότερο πρωτόκολλο το οποίο σταδιακά πέρνει την θέση του RIP. Η μεγάλη διαφορά του από το RIP είναι ότι εδώ οι Routers δεν χρειάζεται να κάνουν υπολογισμό του hop απλά αποστέλλουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση τους στους routers που βρίσκονται απ' ευθείας συνδεδεμένοι μαζί τους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το συνολικό bandwidth που θα πρέπει να δεσμευθεί για την αποστολή πληροφοριών. Ως αποτέλεσμα το OSPF μπορεί να υποστηρίξει δίκτυα μεγάλα σε όγκο και ανάγκες.

Κατά την μεταφορά αρχείων είναι λογικό ότι δεν πάνε πάντα τα πράγματα όπως τα θέλουμε. Λάθη κατά την μεταφορά ή πακέτα δεδομένων που για κάποιο λόγο δεν παρελήφθησαν ακέραια είναι συχνό φαινόμενο. Γι αυτόν τον λόγο οι σχεδιαστές του TCP/IP φρόντισαν να του ενσωματώσουν διαδικασίες οι οποίες ελέγχουν την χωρίς λάθη παραλαβή ενός πακέτου και την αποστολή του στον σωστό παραλήπτη. Οι διαδικασίες αυτές ενσωματώνονται στο ονομαζόμενο Transport Layer του TCP/IP.

### 3.7.2 ATM

Ο ασύγχρονος τρόπος μετάδοσης (Asynchronous Transfer Mode – ATM) θεωρείται σήμερα ως ο κυρίαρχος τρόπος μεταγωγής και διασύνδεσης για τα επερχόμενα ευρυζωνικά δημόσια δίκτυα. Το ATM παρέχει μεγάλη και ευέλικτη χωρητικότητα, εξυπηρέτηση διαφόρων υπηρεσιών από ένα ενοποιημένο δίκτυο και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου, με την εκμετάλλευση της στατιστικής φύσεως της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Για τον χρήστη ιδιαίτερα, το ATM εξασφαλίζει μεγάλη οικονομικότητα, αφού του επιτρέπει να δεσμεύει το δίκτυο μόνο για τον χρόνο που το χρησιμοποιεί και όχι σε μόνιμη βάση.

Τα χαρακτηριστικά των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών που επηρεάζουν την απόφαση για υποστήριξή τους από ένα δίκτυο ATM είναι τα εξής:

- Απαιτούμενο εύρος ζώνης.
- Μετάδοση κατά ριπές (burstness).
- Όγκος διακινούμενης πληροφορίας.
- Απαιτούμενη ευελιξία.

Το μοντέλο αναφοράς πρωτοκόλλων (Protocol Reference Model) του δικτύου ATM είναι τρισδιάστατο, αποτελείται από το Επίπεδο Διαχείρισης (Management Plane), το Επίπεδο Ελέγχου (Control Plane) και το Επίπεδο του Χρήστη (User Plane).

Οι χρήσεις τους είναι οι εξής:

- Το επίπεδο του χρήστη είναι αναγκαίο για τη μεταφορά πληροφοριών του χρήστη μέσω του δικτύου, καθώς και λειτουργίες ελέγχου, όπως έλεγχος ροής και διόρθωση σφαλμάτων.
- Το επίπεδο του ελέγχου είναι αναγκαίο για τη μεταφορά πληροφοριών σηματοδοσίας, δηλαδή παρέχει λειτουργίες αποκατάστασης της κλήσης και ελέγχου της σύνδεσης (επίβλεψη της κλήσης και απόλυσή της). Αυτό ονομάζεται και «σηματοδοσία εκτός του εύρους ζώνης» (out-of-band signalling).
- Το επίπεδο της διαχείρισης είναι αναγκαίο για τη διατήρηση των λειτουργιών του δικτύου. Ειδικότερα αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των άλλων επιπέδων. Το επίπεδο διαχείρισης υποδιαιρείται επιπλέον στη διαχείριση των επιπέδων (Plane Management) και στη διαχείριση των στρωμάτων (Layer Management).

### 3.7.3 POINT-TO-POINT PROTOCOL (PPP)

Το PPP είναι ένα στάνταρ πρωτόκολλο ζεύξης δεδομένων από σημείο προς σημείο το οποίο

- παρέχει κατάλληλη πλαισίωση, δηλαδή η αρχή και το τέλος ενός πλαισίου μπορούν αναμφισβήτητα να ξεχωριστούν,
- αποτελεί ξεχωριστό πρωτόκολλο (LCP (link control protocol)) για τον έλεγχο της γραμμής (ρύθμιση, έλεγχος, συζητήσιμες επιλογές, τερματισμό),
- διαπραγματεύεται και υποστηρίζει διάφορα πρωτόκολλα (π.χ. IP, IPX) του στρώματος δικτύου και το πρωτόκολλο αυτό ονομάζεται NCP (network control protocol). Το πρωτόκολλο NCP χρησιμοποιείται για την εκχώρηση δυναμικών IP διευθύνσεων από τον παροχέα του Internet.

Ας υποθέσουμε πως θέλουμε να συνδεθούμε στο Internet με τον υπολογιστή μας.

1. Όταν κάνουμε click connect το modem καλεί τον αριθμό του παροχέα Internet για να αποκαταστήσει μια φυσική σύνδεση με τον δρομολογητή.
2. Ο υπολογιστής αρχίζει να στέλνει LCP πακέτα για να διαπραγματευθεί τα χαρακτηριστικά της σημείου προς σημείο σύνδεσης. Αυτά τα πακέτα στέλνονται μέσα σε PPP πλαίσια και διαπραγματεύονται στοιχεία όπως το μέγιστο μέγεθος του *payload* σε ένα πλαίσιο μεταφοράς πληροφορίας χρήστη, την αυθεντικοποίηση (π.χ. ζήτα password), να επιβλέψει τη ποιότητα της γραμμής (π.χ. πόσα πακέτα χάθηκαν), να συμπίεσει τις επικεφαλίδες (χρήσιμο για αργές συνδέσεις μεταξύ γρήγορων μηχανών).
3. Κατόπιν ο υπολογιστής διαπραγματεύεται χαρακτηριστικά που αφορούν το στρώμα δικτύου, π.χ. καταχώριση της IP διεύθυνσης για την ανταλλαγή πακέτων.

### 3.7.4 Πρωτόκολλο Ζεύξης Δεδομένων

Πρωτόκολλο ζεύξης δεδομένων ονομάζεται ένα κατανεμημένο σχέδιο δράσης, αποτελούμενο από ειδικές διαδικασίες, που ακολουθούνται από τους κόμβους του δικτύου, ώστε να μεταδίδουν με αξιόπιστο τρόπο πακέτα ακόμα και μέσα από αναξιόπιστους σωλήνες. Οι διαδικασίες αυτές εξηγούν πώς τα λάθη μετάδοσης μπορούν να ανιχνευθούν και να διορθωθούν με αναμεταδόσεις.

Ο αποστολέας κρατάει ένα αντίγραφο κάθε πακέτου στον καταχωρητή του μέχρι να μάθει ότι το πακέτο (το οποίο περιλαμβάνει ένα κώδικα ανίχνευσης

σφαλμάτων) ελήφθη σωστά από τον παραλήπτη. Ο παραλήπτης μεταδίδει ένα ACK (acknowledgment, επιβεβαίωση) προς τον αποστολέα. Οι ACKs είναι πακέτα τα οποία επίσης περιλαμβάνουν κώδικα ανίχνευσης σφαλμάτων. Αν το πακέτο ή το ACK φθαρούν από ένα λάθος μετάδοσης, τότε ο αποστολέας δεν λαμβάνει σωστή ACK. Ο αποστολέας χρησιμοποιεί ένα χρονόμετρο για να αποφασίσει αν έγινε λάθος στη μετάδοση, ενεργοποιεί το χρονόμετρο όταν στέλνει ένα πακέτο, και αν δεν λάβει επιβεβαίωση μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ονομάζεται χρόνος προθεσμίας (timeout), τότε θεωρεί ότι συνέβη λάθος είτε στη μετάδοση του πακέτου είτε της επιβεβαίωσης και ξαναστέλνει ένα αντίγραφο του πακέτου. Η τιμή της προθεσμίας επιλέγεται ώστε να υπάρχει αρκετός χρόνος για την μετάδοση και του πακέτου και της επιβεβαίωσης. Τα πακέτα και οι ACKs πρέπει να είναι αριθμημένα ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε σύγχυση.

### 3.8 Ανίχνευση Και Διόρθωση Σφαλμάτων Στα Πλαίσια Του Προτύπου OSI

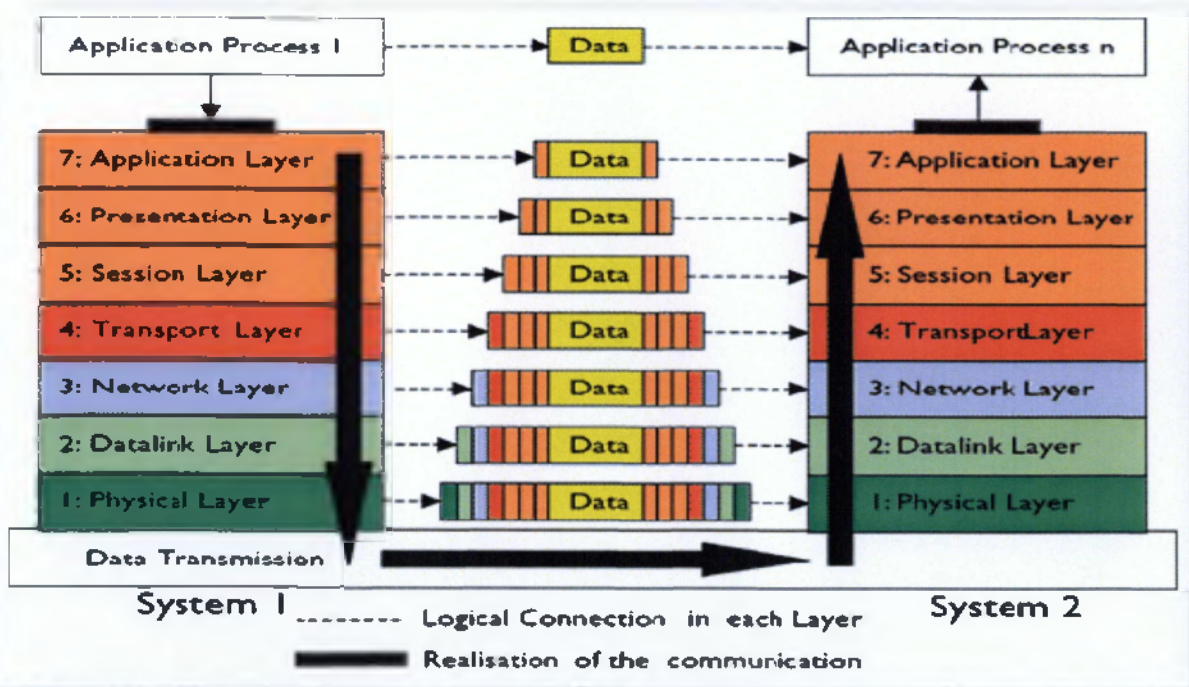
Κάθε σύγχρονο δίκτυο βασίζει την λειτουργία του στο πρότυπο ISO/OSI. Το πρότυπο OSI αναπτύχθηκε από τον ISO (International Standards Organization) το 1984. Η βασική αρχή του μοντέλου OSI είναι ότι τα δεδομένα καθώς ταξιδεύουν μέσα σε ένα δίκτυο από την μια συσκευή στην άλλη, περνάνε από 7 διαφορετικές χρονικές φάσεις ή αλλιώς 7 επίπεδα (layers).

Σε κάθε επίπεδο γίνονται ξεχωριστές εργασίες πάνω στα δεδομένα που τα προετοιμάζουν για το επόμενο κατά σειρά επίπεδο όπως επίσης και κάθε επίπεδο δέχεται τις υπηρεσίες του κατώτερου επιπέδου και προσφέρει με την σειρά του τις υπηρεσίες του στο ανώτερο επίπεδο.

Επίπεδο 7 Εφαρμογής	Περιέχει τις εφαρμογές που υπηρετούν το χρήστη π.χ. email, ftp, web, printing, database
Επίπεδο 6 Παρουσίασης	Διαχειρίζεται θέματα συμπίεσης δεδομένων και κρυπτογράφησης. Ελέγχει την γνησιότητα της λαμβανόμενης πληροφορίας.
Επίπεδο 5 Συνόδου	Χειρίζεται θέματα ασφαλείας και αναγνώρισης εισόδου στο σύστημα. Διαθέτει μηχανισμούς συγχρονισμού της μετάδοσης. Διαθέτει μηχανισμούς αποκατάστασης της σύνδεσης αν διακοπεί.



Επίπεδο 4 Μεταφοράς	Παίρνει από το επίπεδο συνόδου τα data, τα σπάει σε τμήματα και εξασφαλίζει ότι θα φτάσουν στον προορισμό τους.
Επίπεδο 3 Δικτύου	Ασχολείται με την δρομολόγηση των data. Κάνει έλεγχο της εισόδου νέων πακέτων (αποφυγή συμφόρησης).
Επίπεδο 2 Σύνδεσης Δεδομένων	Ελέγχει την ροή δεδομένων του φυσικού επιπέδου. Δημιουργεί πακέτα δεδομένων που μαζί με τα data περιέχουν ένα bit αρχής και ένα bit τέλους.
Επίπεδο 1 Φυσικό	Ασχολείται με τον τρόπο μετάδοσης των bits στο δίαυλο π.χ. πόσα volt παριστάνουν το bit 1 και πόσα το bit 0 και πόσο διαρκεί η μετάδοση ενός bit.



Σχήμα 3.4 : Τα 7 Επίπεδα Του Προτύπου OSI.

**Επίπεδο Εφαρμογής :** Παρέχει στον χρήστη έναν τρόπο να προσπελάσει μέσω μιας εφαρμογής τις πληροφορίες ενός δικτύου. Αυτό το επίπεδο είναι η κύρια διασύνδεση του χρήστη με την εφαρμογή και συνεπώς με το δίκτυο. Στο επίπεδο αυτό γίνεται η διαχείριση των καταναμημένων εφαρμογών όπως η αποστολή του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

**Επίπεδο Παρουσίασης :** Μετασχηματίζει τα δεδομένα σε τυπική μορφή που την αναμένει το επίπεδο εφαρμογών. Στο επίπεδο αυτό τα δεδομένα υφίστανται κρυπτογράφηση, συμπίεση,

κωδικοποίηση MIME και όποια άλλη διαμόρφωση απαιτεί η μορφή δεδομένων ή ο σχεδιαστής του πρωτοκόλλου.

**Επίπεδο Συνόδου :** Ελέγχει τις συνόδους (δηλαδή τις ανταλλαγές δεδομένων) μεταξύ δύο υπολογιστών. Ξεκινά, διαχειρίζεται και τερματίζει τη σύνδεση μεταξύ μιας τοπικής και μιας απομακρυσμένης εφαρμογής. Αντιμετωπίζει λειτουργίες full duplex ή half duplex ενώ υποστηρίζει διαδικασίες αποθήκευσης κατάστασης, αναβολής, τερματισμού και επανεκκίνησης. Το επίπεδο είναι υπεύθυνο για το ομαλό κλείσιμο της συνόδου (που είναι ιδιότητα του TCP) και επίσης για την αποθήκευση και ανάκτηση κατάστασης.

**Επίπεδο Μεταφοράς :** Διεκπεραιώνει τη μεταφορά των δεδομένων από χρήστη σε χρήστη, απαλλάσσοντας έτσι τα ανώτερα επίπεδα από αυτή τη φροντίδα. Ελέγχει την αξιοπιστία ενός χρησιμοποιούμενου καναλιού με έλεγχο ροής, κατάτμηση και αποτμηματοποίηση, καθώς και έλεγχο-σφαλμάτων. Ορισμένα πρωτόκολλα καταγράφουν καταστάσεις και συνδέσεις, οπότε κρατούν λογαριασμό των πακέτων και επανεκπέμπουν αυτά που δεν παρελήφθησαν σωστά.

**Επίπεδο Δικτύου :** Παρέχει τα λειτουργικά και διαδικαστικά μέσα για τη μεταφορά στοιχειοσειρών δεδομένων μεταβλητού μήκους από μία προέλευση σε ένα προορισμό, μέσα από ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα δίκτυα. Το επίπεδο δικτύου εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης και αναφέρει σφάλματα σχετικά με την παράδοση των πακέτων.

**Επίπεδο Σύνδεσης Δεδομένων :** Παρέχει τα λειτουργικά και διαδικαστικά μέσα για τη μεταφορά δεδομένων από μία συσκευή ενός τοπικού δικτύου σε άλλη, αλλά και για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο.

**Επίπεδο Φυσικό :** Ορίζει όλες τις ηλεκτρικές και φυσικές προδιαγραφές της επικοινωνίας. Οι κυριότερες λειτουργίες και υπηρεσίες του φυσικού επιπέδου είναι η έναρξη και ο τερματισμός της ηλεκτρικής σύνδεσης μιας επικοινωνιακής συσκευής, η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των ψηφιακών δεδομένων κατά την μετάδοση από συσκευή σε συσκευή και οι διαδικασίες όπου οι επικοινωνιακές συσκευές εξυπηρετούν αποτελεσματικά πολλούς χρήστες.

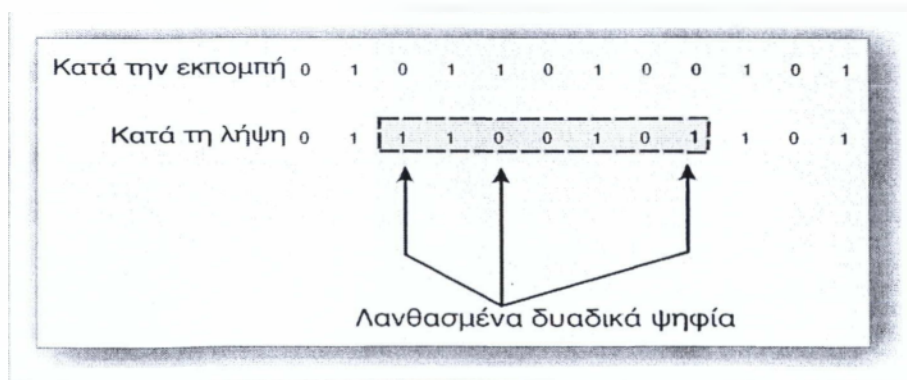
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

#### 4.1 Εισαγωγή

Κατά τη μετάδοση δεδομένων μέσω των γραμμών επικοινωνίας συμβαίνουν σφάλματα. Λέμε ότι δημιουργήθηκε κάποιο σφάλμα (error), όταν διαπιστωθεί ότι τα δεδομένα που έφτασαν στο σταθμό προορισμού διαφέρουν από αυτά που στάλθηκαν από το σταθμό αποστολής. Επειδή ο προφανής στόχος είναι η εκμηδένιση κάθε αιτίας σφάλματος, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων, οι σπουδαιότερες από τις οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Τα σφάλματα που δημιουργούνται μπορεί να είναι είτε μεμονωμένα είτε υπό μορφή δέσμης. Μεμονωμένα ή ανεξάρτητα λέγονται εκείνα τα σφάλματα των οποίων η παρουσία δεν επηρεάζει το σύνολο της πληροφορίας που μεταδίδεται. Για παράδειγμα, ένα λανθασμένο δυαδικό ψηφίο σε οποιαδήποτε θέση ενός μηνύματος δεν επηρεάζει όλο το μήνυμα. Όμως, πρακτικά, τα σφάλματα που εντοπίζονται σε μια μετάδοση δεδομένων είναι συνήθως συγκεντρωμένα, είναι δηλαδή, υπό μορφή δέσμης, σχήμα 4.1.

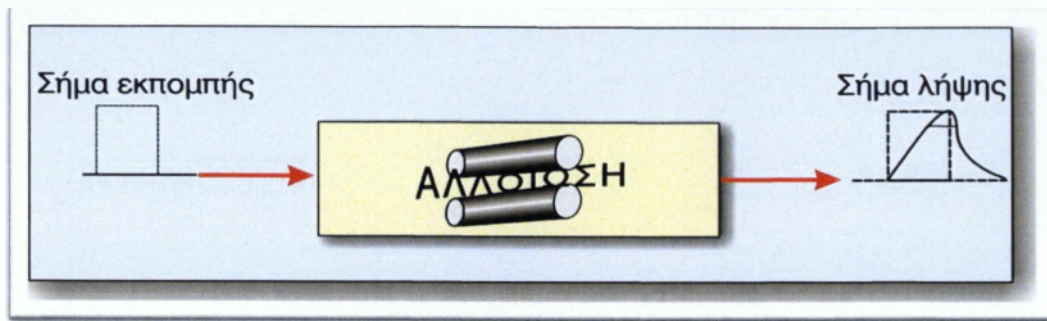


Σχήμα 4.1 : Σφάλματα υπό μορφή δέσμης κατά τη μετάδοση.

Σε μια μετάδοση δεδομένων ενδιαφέρει το ποσοστό σφαλμάτων, δηλαδή η αναλογία των λανθασμένων δυαδικών ψηφίων που ελήφθησαν ως προς το συνολικό αριθμό των δυαδικών ψηφίων που εστάλησαν. Για παράδειγμα, σε μια τηλεφωνική σύνδεση το ποσοστό σφαλμάτων είναι συνήθως της τάξης του  $10^{-6}$ .

Οι πιο συνηθισμένες αιτίες προβλημάτων που οδηγούν σε λήψη εσφαλμένων δεδομένων ή σε απώλεια πληροφορίας είναι οι ακόλουθες :

- Κανένα φυσικό μέσο μετάδοσης δεν είναι τέλειο. Αυτό σημαίνει ότι το μεταδιδόμενο σήμα που τα διαπερνά αλλοιώνεται με τον έναν ή τον άλλο τρόπο. Η αλλοίωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα μετάδοσης ενός σήματος ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητά του, σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : Αλλοίωση Σήματος.

- Το σήμα εξασθενεί καθώς διαπερνά το φυσικό μέσο μετάδοσης. Η εξασθένιση οφείλεται στη μείωση του πλάτους του σήματος και στη διανυόμενη απόσταση, σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 : Εξασθένηση Σήματος.

- Η ύπαρξη θορύβου στο μέσο μετάδοσης αλλοιώνει το σήμα.
- Τα συνήθη μέσα μετάδοσης, όπως είναι οι τηλεφωνικές γραμμές, είναι σχεδιασμένα για μεταφορά φωνής (αναλογική μετάδοση) και όχι δεδομένων (ψηφιακή μετάδοση).

Στην ψηφιακή μετάδοση το αποτέλεσμα κάποιου σφάλματος είναι στη χειρότερη των περιπτώσεων, η καταστροφή των δυαδικών ψηφίων ή η αλλαγή της τιμής ενός ψηφίου από 1 σε 0 και αντίστροφα. Επομένως, αντίθετα με την τηλεφωνική επικοινωνία, στην οποία υπάρχουν όρια ανοχής, στην επικοινωνία δεδομένων τα σφάλματα και η απώλεια της πληροφορίας οδηγούν τη μετάδοση σε διακοπή. Έτσι προκύπτει η αναγκαιότητα της

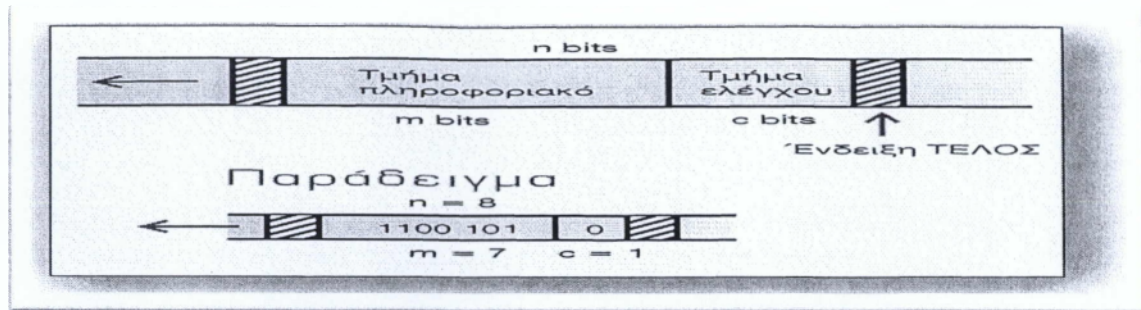
καθιέρωσης μηχανισμών που να επιτρέπουν, αν όχι τη διόρθωση, τουλάχιστον τον εντοπισμό των σφαλμάτων.

Η αντιμετώπιση των σφαλμάτων γίνεται στην πράξη με τους ακόλουθους γενικούς μηχανισμούς :

- Αγνόηση των σφαλμάτων. Αυτή η λύση γίνεται δεκτή, όταν η παρουσία σφαλμάτων δε δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στην πράξη. Τέτοια περίπτωση αποτελεί η μετάδοση τηλεγραφικών κειμένων, όπου ένα λάθος, (π.χ. παράλειψη άρθρου) δε δυσκολεύει την ανάγνωση του κειμένου.
- Ανίχνευση των σφαλμάτων. Η λύση αυτή προτείνεται, όταν τα σφάλματα εντοπίζονται στο σταθμό προορισμού. Σε αυτή την περίπτωση δίνεται συνήθως κάποια αναφορά προς το σταθμό αποστολής ότι η πληροφορία έφτασε λανθασμένη, προκειμένου να επαναμεταδοθεί.
- Ανίχνευση και διόρθωση των σφαλμάτων. Η λύση αυτή προτείνεται, όταν τα σφάλματα εντοπίζονται στο σταθμό προορισμού. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται ανίχνευση των σφαλμάτων και προσπάθεια διόρθωσή τους, χωρίς να απαιτείται επαναμετάδοση.

Η ανίχνευση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα προειδοποιητικό σήμα που εκπέμπεται από το σταθμό προορισμού μόλις εντοπιστεί το σφάλμα. Όσο για τη διόρθωση, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αποκωδικοποιητή, που διορθώνει αυτόματα κάποια από τα παραγόμενα σφάλματα (άμεση διόρθωση σφαλμάτων), είτε με επαναμετάδοση, όταν ο αποκωδικοποιητής δεν μπορεί να εντοπίσει τα λάθη.

Στην περίπτωση της ανίχνευσης ή της ανίχνευσης και διόρθωσης των σφαλμάτων, μεταβιβάζονται τόσο η ωφέλιμη ή καθαρή πληροφορία, δηλαδή οι απαιτούμενοι κώδικες της πληροφορίας, όσο και οι πρόσθετες ή πλεοναστικές πληροφορίες, που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων. Οι πρόσθετες αυτές πληροφορίες καλούνται και δυαδικά ψηφία ελέγχου. Η ακολουθία των  $n$  δυαδικών ψηφίων που μεταβιβάζονται αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο είναι το πληροφοριακό τμήμα, που αποτελείται από  $m$  δυαδικά ψηφία, στο οποίο περιέχεται η πληροφορία που μεταβιβάζεται, ενώ το δεύτερο είναι το τμήμα ελέγχου, που αποτελείται από  $c$  δυαδικά ψηφία, έτσι ώστε  $n = m + c$ . Συνήθως το τμήμα ελέγχου αποτελεί και το τέλος της ακολουθίας των δυαδικών ψηφίων που μεταβιβάζονται, σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 : Πληροφοριακό Τμήμα και Τμήμα Ελέγχου.

Το τμήμα έλεγχου δημιουργείται στο σταθμό αποστολής, πάντα με βάση το πληροφοριακό τμήμα και σύμφωνα με κάποιον προκαθορισμένο αλγόριθμο κωδικοποίησης, που ονομάζεται κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος. Η κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος :

- Έχει σκοπό τον περιορισμό της πιθανότητας να συμβεί σφάλμα κατά τη μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας,
- βασίζεται σε μία καλά υπολογισμένη χρήση πρόσθετης (πλεοναστικής) πληροφορίας και
- πραγματοποιείται από τον κωδικοποιητή και τον αποκωδικοποιητή του μέσου μετάδοσης.

Όταν η πληροφορία φτάσει στον σταθμό προορισμού αναδημιουργείται το τμήμα ελέγχου, σύμφωνα με τον ίδιο αλγόριθμο και συγκρίνεται με το τμήμα ελέγχου που μεταβιβάστηκε. Αν δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία των τμημάτων αυτών, τότε διαπιστώνεται το σφάλμα με βάση το σύστημα κωδικοποίησης που εφαρμόστηκε και ακολούθως εντοπίζεται η θέση του εσφαλμένου δυαδικού ψηφίου, προκειμένου να γίνει η διόρθωσή του.

Οι κώδικες που εφαρμόζονται στη μετάδοση πληροφοριών διαιρούνται σε ανιχνευτικούς κώδικες (error detecting codes) και σε διορθωτικούς κώδικες (error correcting codes). Οι πρώτοι δίνουν την δυνατότητα να διαπιστωθεί η ύπαρξη των σφαλμάτων, ενώ οι δεύτεροι επιτρέπουν επιπλέον και τον εντοπισμό των θέσεων των εσφαλμένων δυαδικών ψηφίων. Το τμήμα ελέγχου των διορθωτικών κωδίκων είναι πάντα πολύ μεγαλύτερο από το τμήμα ελέγχου των ανιχνευτικών κωδίκων. Επομένως η διόρθωση σφαλμάτων απαιτεί πολύ περισσότερα δυαδικά ψηφία ελέγχου από ότι η ανίχνευση σφαλμάτων.

## 4.2 Μέθοδοι Κωδικοποίησης Ελέγχου Σφάλματος

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται και οι διαδικασίες που ακολουθούνται κατά τις φάσεις της κωδικοποίησης και της αποκωδικοποίησης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος. Οι κώδικες διόρθωσης λαθών χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στους μπλοκ κώδικες (Block Codes) και στους συνελικτικούς κώδικες (Convolutional Codes).

### 4.2.1 Κωδικοποίηση Κατά Μπλοκ

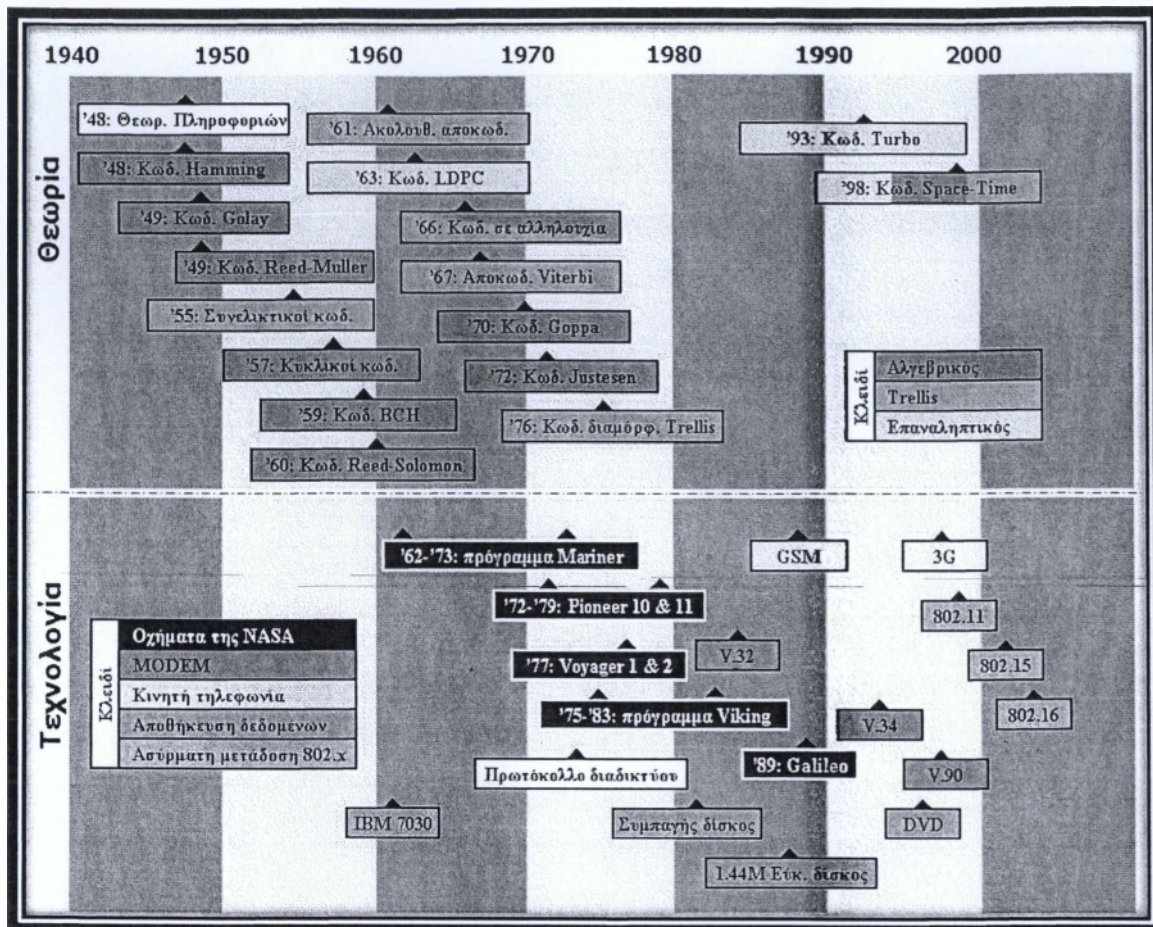
Η βασική ιδέα στην περίπτωση αυτή είναι η εξής: Σε μια ομάδα (μπλοκ) από ψηφία (bits) ή γενικότερα σύμβολα (π.χ.bytes), προστίθενται επιπλέον ψηφία ή σύμβολα που προκύπτουν από κατάλληλη επεξεργασία των ψηφίων / συμβόλων πληροφορίας, και εκπέμπονται. Στο δέκτη ο αποκωδικοποιητής, ελέγχει αν τα ψηφία / σύμβολα πληροφορίας που λαμβάνει, δίνουν τα πρόσθετα ψηφία / σύμβολα σύμφωνα με την ίδια επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό διαπιστώνει την ύπαρξη σφάλματος το οποίο μπορεί να διορθώσει χρησιμοποιώντας κατάλληλο αλγόριθμο.

### 4.2.2 Συνελικτική Κωδικοποίηση

Εδώ η ροή του Κωδικοποιητή προκύπτει μέσω ενός μηχανισμού μνήμης στον οποίο εμπλέκονται όλα τα ψηφία πληροφορίας εκπομπής. Ο αποκωδικοποιητής ανιχνεύει κάθε παραβίαση του μηχανισμού αυτού στο δέκτη (ανίχνευση σφάλματος) και αποκαθιστά τη λειτουργία του μηχανισμού (διόρθωση σφάλματος).

### 4.2.3 Σύγκριση Των Μεθόδων ECC

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών κωδικών είναι η ύπαρξη μνήμης στους συνελικτικούς κώδικες. Λόγω της πολυπλοκότητας του μηχανισμού μνήμης της συνελικτικής κωδικοποίησης, οι αντίστοιχοι Κωδικοποιητές – Αποκωδικοποιητές επιβαρύνονται ως προς την υλοποίηση και την ταχύτητα της επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό οι Κωδικοποιητές – Αποκωδικοποιητές Μπλοκ βρίσκουν ευρύτερη εφαρμογή.

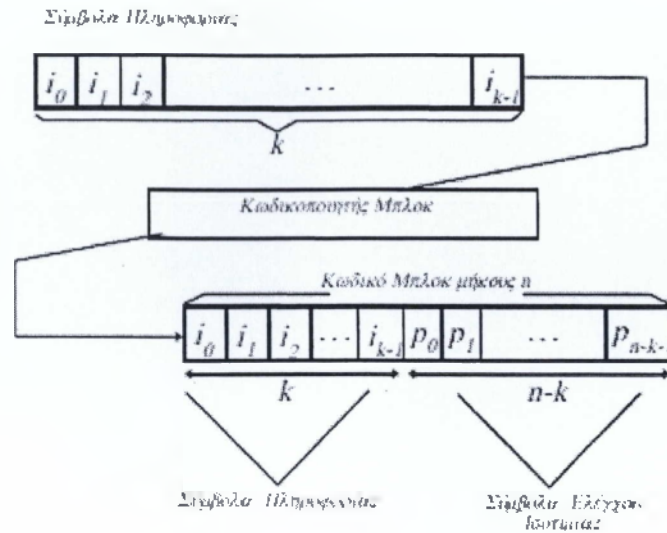


Εικόνα 4.5 : Οι σημαντικότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της κωδικοποίησης ελέγχου σφαλμάτων

### 4.3 Κώδικες Μπλοκ

Όπως ήδη αναφέρθηκε πιο πάνω, ένας κώδικας μπλοκ παίρνει μια ομάδα  $k$  συμβόλων πληροφορίας και την επεκτείνει με την προσθήκη  $n-k$  πρόσθετων συμβόλων, τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία, βάσει κατάλληλου αλγορίθμου των συμβόλων πληροφορίας. Τα πρόσθετα αυτά σύμβολα ονομάζονται σύμβολα ελέγχου ισοτιμίας (parity check symbols). Ακολουθείται, δηλαδή, η διαδικασία του παρακάτω σχήματος, και συμβολίζουμε έναν τέτοιο κώδικα με  $(n,k)$  :





Σχήμα 4.6 : Κωδικοποίηση κατά Μπλοκ

### 4.3.1 Γραμμικοί Μπλοκ Κώδικες

Ένας κώδικας είναι μία διαδικασία μονοσήμαντης απεικόνισης στοιχείων από ένα σύνολο A σε ένα σύνολο B. Στην περίπτωση της κωδικοποίησης καναλιού και των κωδικών που χρησιμοποιούνται για αυτήν, τα στοιχεία του συνόλου A ονομάζονται λέξεις πληροφορίας  $u_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ), ενώ εκείνα του συνόλου B, στα οποία και αντιστοιχίζονται, ονομάζονται κωδικές λέξεις, ή codewords,  $c_i$ . Το M ισούται με τους δυνατούς συνδυασμούς των ακολουθιών k δυαδικών ψηφίων, δηλαδή  $M=2^k$ . Δυαδικός ονομάζεται ένας κώδικας όταν τα στοιχεία και των δύο συνόλων είναι ακολουθίες δυαδικών ψηφίων (0 ή 1). Εφόσον μιλάμε για μονοσήμαντη απεικόνιση δεν μπορεί το πλήθος των στοιχείων των δύο συνόλων να διαφέρει.

Μια από τις κατηγορίες κωδικών καναλιού είναι οι γραμμικοί κώδικες μπλοκ. Ένας κώδικας μπλοκ είναι γραμμικός αν κάθε γραμμικός συνδυασμός δύο κωδικών του λέξεων είναι επίσης κωδική του λέξη. Στην περίπτωση δυαδικού κώδικα αυτό σημαίνει πως το αποτέλεσμα της συνιστώσας-προς-συνιστώσα XOR λογικής πράξης μεταξύ δύο κωδικών του λέξεων, είναι επίσης κωδική λέξη.

Η μετατροπή της ακολουθίας των k bits (λέξη πληροφορίας) σε ακολουθία των n bits (codeword) 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 :

$$c_i = u_i \otimes G$$

Προκύπτει έτσι η κωδική λέξη  $c_i$ . Τα  $n$  δυαδικά ψηφία που συνιστούν την κωδική λέξη ορίζουν έναν χώρο  $n$  διαστάσεων. Κάθε δυαδικό σύμβολο της κωδικής λέξης είναι και μία συνιστώσα του χώρου αυτού. Ο  $n$ -διάστατος χώρος περιλαμβάνει  $2^n$  στοιχεία, μόνο τα  $2^k$  εκ των οποίων αποτελούν έγκυρες κωδικές λέξεις. Οι  $2^k$  έγκυρες κωδικές λέξεις συνιστούν έναν  $k$ -διάστατο υποχώρο του  $n$ -διάστατου χώρου. Ονομάζουμε  $C$  αυτόν τον υποχώρο. Οι γραμμές του γεννήτορα πίνακα  $G$  δεν είναι τίποτα περισσότερο από τα  $k$  διανύσματα που αποτελούν τη βάση του υποχώρου  $C$ .

Έστω όλες οι δυαδικές ακολουθίες μήκους  $n$  οι οποίες είναι ορθογώνιες προς όλα τα διανύσματα του  $k$ -διάστατου υποχώρου  $C$ . Κάθε μία από αυτές τις ακολουθίες έχει την εξής ιδιότητα :

$$h \otimes c_i^T = 0, \quad (4.1)$$

όπου  $i = 1, 2, \dots, 2^k$ ,  $h$  είναι μία από τις ορθογώνιες ακολουθίες μήκους  $n$ ,  $c_i^T$  είναι η ανάστροφη εκδοχή της έγκυρης κωδικής λέξης  $c_i$ , ενώ ο τελεστής  $\otimes$  δηλώνει την συνιστώσα-προς-συνιστώσα XOR λογική πράξη ή, ισοδύναμα, την modulo-2 άθροιση.

Αποδεικνύεται ότι το πλήθος των μήκους  $n$  ακολουθιών που έχουν την παραπάνω ιδιότητα είναι  $2^{n-k}$ . Οι  $2^{n-k}$  ορθογώνιες ακολουθίες  $h_i$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι οι έγκυρες κωδικές λέξεις ενός  $(n, n-k)$  γραμμικού κώδικα μπλοκ, ο οποίος συμβολίζεται με  $C^T$  και καλείται δυϊκός (dual) του αρχικού  $(n, k)$  κώδικα  $C$ . Οι κωδικές λέξεις του κώδικα  $C^T$  είναι σύμφωνα με τη σχέση (4.1) ορθογώνιες ως προς τις κωδικές λέξεις  $c_i$  του κώδικα  $C$ . Έστω  $H$  ο γεννήτορας πίνακας του κώδικα  $C^T$ . Ο πίνακας  $H$  αποτελείται από  $(n-k)$  γραμμές  $n$  στοιχείων οι οποίες είναι τα διανύσματα βάσης του  $(n-k)$ -διάστατου χώρου. Κάθε μία εξ'αυτών είναι μία έγκυρη κωδική λέξη του κώδικα  $C^T$ . Επομένως, κάθε γραμμή του πίνακα  $H$  είναι ορθογώνια ως προς κάθε έγκυρη κωδική λέξη του κώδικα  $C$ . Κατά συνέπεια, ο πίνακας  $H$  μας παρέχει  $n-k$  σχέσεις, τις οποίες θα πρέπει να επαληθεύει μία κωδική λέξη για να είναι έγκυρη, και οι οποίες συνοψίζονται στην ακόλουθη σχέση:

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

Πρακτικά, στην περίπτωση του δυαδικού κώδικα, λόγω της modulo-2 άθροισης, κάθε μία γραμμή ελέγχει αν μεταξύ συγκεκριμένων ψηφίων της κωδικής λέξης υπάρχει άρτιο πλήθος άσων. Επομένως, ο πίνακας  $H$  ελέγχει την ισοτιμία των άσων της κωδικής λέξης. Για τον λόγο αυτό, ονομάζεται Πίνακας Ελέγχου Ισοτιμίας (Parity Check Matrix) του αρχικού κώδικα  $C$  και είναι, όπως και ο γεννήτορας πίνακας  $G$ , χαρακτηριστικός του κώδικα.

## 4.3.2 Κώδικες Ανίχνευσης Και Διόρθωσης Απλού Σφάλματος

### 4.3.2.1 Κώδικας Ανίχνευσης Απλού Σφάλματος

Έστω κώδικας (9,8) με το σύμβολο ελέγχου ισοτιμίας να ορίζεται ως το modulo-2 άθροισμα των συμβόλων πληροφορίας, να είναι δηλαδή 1 αν το πλήθος των μη μηδενικών συμβόλων πληροφορίας είναι περιττός αριθμός, και 0 αν είναι άρτιος.

Έτσι το μπλοκ πληροφορίας (0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0) κωδικοποιείται στο (0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0 / 0).

Έστω ότι στη λήψη παίρνουμε ("1", 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0 / 0). Εφαρμογή του αλγορίθμου εξαγωγής του συμβόλου ισοτιμίας δίνει γι' αυτό τιμή 1, που διαφέρει από την τιμή 0 στη λήψη. Άρα έχει συμβεί σφάλμα, που ανιχνεύεται από τον αποκωδικοποιητή.

Διόρθωση του σφάλματος αυτού δεν είναι δυνατή αφού στο ίδιο αποτέλεσμα (ανίχνευση λάθους) θα οδηγούσε, για παράδειγμα, και το μπλοκ (0, "0", 1, 0, 1, 0, 1, 0 / 0). Θα πρέπει να σημειωθεί, επίσης, η αδυναμία του κώδικα να ανιχνεύσει δύο ή περισσότερα λάθη. Μια τέτοια περίπτωση θα είχαμε αν στη λήψη έφτανε το μπλοκ ("1", 1, 1, 0, 1, 0, 1, "1" / 0), το οποίο δεν παραβιάζει τον κανόνα ισοτιμίας οπότε εκλαμβάνεται από τον αποκωδικοποιητή ως λέξη χωρίς λάθος.

### 4.3.2.2 Κώδικας Διόρθωσης Απλού Σφάλματος

Έστω κώδικας Hamming(8,4) με τα σύμβολα ελέγχου ισοτιμίας να προκύπτουν από την ακόλουθη διαδικασία:

Έστω το μπλοκ πληροφορίας ( $i_0, i_1, i_2, i_3$ ).

$i_0$	$i_1$	$i_2$
$i_2$	$i_3$	$i_2$
$r_1$	$r_2$	

Όπου  $i_1$  σύμβολο ισοτιμίας των στοιχείων της 1<sup>ης</sup> γραμμής,  $i_2$  το σύμβολο ισοτιμίας των στοιχείων της 2<sup>ης</sup> γραμμής και όμοια  $r_1$  και  $r_2$  για την πρώτη και δεύτερη στήλη του πίνακα, αντίστοιχα.

Το κωδικοποιημένο μπλοκ είναι  $(i_0, i_1, i_2, i_3 / r_1, r_2)$ .

Σύμφωνα με τον πιο πάνω ορισμό το μπλοκ πληροφορίας  $(0, 1, 1, 0)$  κωδικοποιείται ως εξής:

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

δηλαδή  $(0, 1, 1, 0 / 1, 1, 1, 1)$ .

Αν στη λήψη πάρουμε  $(0, 0, 1, 0 / 1, 1, 1, 1)$  τότε έλεγχος ισοτιμίας θα δώσει:

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

ένδειξη σφάλματος στη στήλη

Το εσφαλμένο σύμβολο εντοπίζεται ως η τομή της γραμμής και της στήλης για τα οποία προέκυψε παραβίαση ισοτιμίας, και επομένως η διόρθωση είναι δυνατή.

Στις δυνατότητες του κώδικα συγκαταλέγεται η ικανότητα εντοπισμού δύο σφαλμάτων, τα οποία αδυνατεί να διορθώσει, όπως φαίνεται στο παράδειγμα:

Λέξη εκπομπής:  $(0, 1, 1, 0 / 1, 1, 1, 1)$   
 Λέξη λήψης:  $(0, 0, 1, 1 / 1, 1, 1, 1)$   
 Έλεγχος ισοτιμίας:

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

ένδειξη σφάλματος στη γραμμή

ένδειξη σφάλματος στη γραμμή

### 4.3.3 Κώδικας Hamming

Το ενδιαφέρον του Richard Hamming στην κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων γεννήθηκε κατά την ανάπτυξη ενός πρωτόγονου υπολογιστή. Ο υπολογιστής παρουσίαζε κάθε τόσο πρόβλημα στη λειτουργία του, με συνέπεια να απαιτείται η παρέμβαση ενός ειδικού. Στην πράξη, η παρουσία του ειδικού θα έπρεπε να

είναι συνεχής, χωρίς να εξαιρούνται οι αργίες (π.χ. τα Σαββατοκύριακα), γεγονός που περιορίζει την πρακτική του αξία. Ο Hamming αναζήτησε ένα τρόπο, ώστε ο υπολογιστής να διορθώνει τα σφάλματα αυτόματα, δηλαδή χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Τελικά εφηύρε έναν κώδικα, ο οποίος προσθέτει 3 bits «ελέγχου» σε 4 bits «πληροφορίας». Τα bits «ελέγχου» επιλέγονται με βάση τα bits «πληροφορίας», ώστε η προκύπτουσα κωδική λέξη να υπακούει σε ένα σύνολο από γραμμικές δυαδικές εξισώσεις. Αν ένα και μοναδικό bit ληφθεί εσφαλμένα (δηλαδή έχει αντίθετη τιμή), η κωδική λέξη παύει να ικανοποιεί τις εξισώσεις και επιπλέον, είναι δυνατό να υπολογιστεί η θέση του σφάλματος. Οι κώδικες Hamming και οι μειωμένου μήκους εκδοχές τους, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για έλεγχο λαθών στις ψηφιακές επικοινωνίες και στα συστήματα αποθήκευσης δεδομένων, μιας και διαθέτουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης και απλή διαδικασία αποκωδικοποίησής τους.

Οι κώδικες Hamming ορίζονται ως εξής:

$$\text{Μήκος κώδικα: } n = 2m - 1,$$

$$\text{Πλήθος συμβόλων πληροφορίας: } k = 2m - m - 1$$

$$\text{Πλήθος συμβόλων ελέγχου ισοτιμίας: } n - k = m$$

$$\text{Ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων: } t = 1 \text{ (dmin} = 3 \text{)} .$$

Η μήτρα ελέγχου ισοτιμίας αυτών των κωδίκων αποτελείται από όλα τα μη-μηδενικά  $m$ -διάστατα διανύσματα ως στήλες. Σε συστηματική μορφή οι στήλες της μήτρας  $H$  διατάσσονται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$H = [I_m \ Q],$$

όπου  $I_m$  είναι η  $m \times m$  μοναδιαία μήτρα και η υπο-μήτρα  $Q$  αποτελείται από  $2m - m - 1$  στήλες, οι οποίες είναι  $m$ -διάστατα διανύσματα με βάρος μεγαλύτερο ή ίσο από 2. Για παράδειγμα, για  $m = 3$ , η μήτρα ισοτιμίας του κώδικα Hamming με μήκος 7 μπορεί να αναπαρασταθεί με τη μορφή

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

Οι στήλες της μήτρας  $Q$  μπορούν να διαταχθούν με οποιαδήποτε σειρά, χωρίς αυτό να επηρεάζει την ιδιότητα της απόστασης και την κατανομή του βάρους του κώδικα. Η μήτρα γεννήτορας  $G$  μπορεί να εκφραστεί σε συστηματική μορφή ως

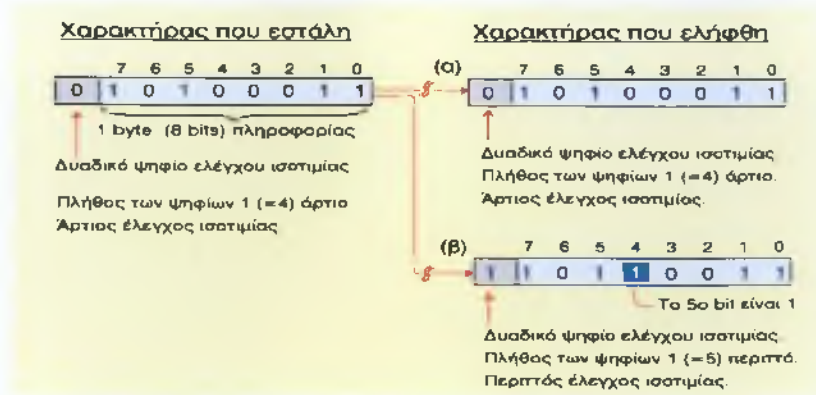
$$G = [Q^T \ I_{2^m - m - 1}],$$

όπου  $Q^T$  είναι η αντιμεταθετική μήτρα του  $Q$  και  $I_{2^m - m - 1}$  είναι ένας  $(2^m - m - 1) \times (2^m - m - 1)$  μοναδιαία μήτρα. Εφόσον οι στήλες της μήτρας  $H$  είναι μη-μηδενικές και διακριτές, το άθροισμα δύο στηλών της  $H$  δεν μπορεί να είναι μηδενικό. Με βάση τις ιδιότητες της ελάχιστης απόστασης κώδικα μπλοκ προκύπτει ότι η ελάχιστη απόσταση ενός κώδικα Hamming είναι 3. Επομένως ο κώδικας έχει την ικανότητα να διορθώσει όλα τα πρότυπα λάθους με ένα σφάλμα και να ανιχνεύσει όλα τα πρότυπα λάθους με δύο σφάλματα.

#### 4.3.4 Κώδικας Ισοτιμίας

Μερικά συστήματα μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιούν τον κατακόρυφο έλεγχο πλεονασμού (VRC, Vertical Redundancy Checking), μια τεχνική σύμφωνα με την οποία κάθε χαρακτήρας που μεταδίδεται συνοδεύεται από ένα δυαδικό ψηφίο ισοτιμίας (Parity Bit). Ο έλεγχος αυτός λέγεται και έλεγχος ισοτιμίας (Parity Check). Κατά την αποστολή ο πομπός θέτει στο δυαδικό ψηφίο ισοτιμίας την τιμή 0 ή 1. Η θέση του δυαδικού ψηφίου ισοτιμίας καθορίζεται από το εκάστοτε πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την μετάδοση της πληροφορίας. Υπάρχουν δύο κλασικοί έλεγχοι ισοτιμίας, ο έλεγχος περιττής ισοτιμίας (Odd Parity Check) και ο έλεγχος άρτιας ισοτιμίας (Even Parity Check). Ο έλεγχος είναι απλός. Στο μεταφερόμενο χαρακτήρα μετράμε τα ψηφία που έχουν τιμή 1 και εάν ο συνολικός αριθμός των δυαδικών ψηφίων που έχουν την τιμή 1 είναι περιττός, λέμε ότι έχουμε περιττό έλεγχο ισοτιμίας. Εάν ο συνολικός αριθμός των δυαδικών ψηφίων που έχουν την τιμή 1 είναι άρτιος, λέμε ότι έχουμε άρτιο έλεγχο ισοτιμίας. Όταν ο δέκτης ανιχνεύσει σφάλμα στο ψηφίο ισοτιμίας, γνωρίζει ότι έχει συμβεί σφάλμα μετάδοσης.

Στο σχήμα 4.7 περιγράφονται δύο σενάρια μεταφοράς ενός χαρακτήρα πληροφορίας. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μεταφορά χωρίς σφάλμα, επειδή το άρτιο ψηφίο ισοτιμίας της αποστολής είναι σύμφωνο με το άρτιο ψηφίο ισοτιμίας της λήψης. Επομένως στην περίπτωση αυτή υπάρχει άρτιος έλεγχος ισοτιμίας, σχήμα 4.7α. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε εσφαλμένη μεταφορά, επειδή το άρτιο ψηφίο ισοτιμίας της αποστολής δε συμφωνεί με το περιττό ψηφίο ισοτιμίας της λήψης, σχήμα 4.7β. Αυτό συνέβη, γιατί κατά την μεταφορά της πληροφορίας υπήρξε σφάλμα στο 5ο ψηφίο.



Σχήμα 4.7 : Ανίχνευση Σφάλματος με την τεχνική του Δυαδικού Ψηφίου Ισοτιμίας.

Ο έλεγχος ισοτιμίας είναι η παλαιότερη από τις τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων. Τα πλεονεκτήματά της είναι η απλότητα του αλγορίθμου και η εύκολη υλοποίησή της. Έτσι, αντίθετα με τις επιδόσεις της, που δεν θεωρούνται υψηλές, ειδικά όταν ο ρυθμός μετάδοσης είναι υψηλός, η μέθοδος, εφαρμόζεται ευρύτατα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο ρυθμός αναγνώρισης των σφαλμάτων είναι χαμηλός, με αποτέλεσμα όταν δημιουργηθεί κάποιο σφάλμα, να αλλοιώνονται πολλά γειτονικά ψηφία. Ο έλεγχος ισοτιμίας σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να δώσει θετικό αποτέλεσμα, ωστόσο πρέπει να έχουμε υπόψη μας το ενδεχόμενο να υπάρχουν και σφάλματα που δεν ανιχνεύτηκαν. Ένα πρόσθετο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η μη αναγνώριση άρτιου αριθμού σφαλμάτων. Είναι αυτονόητο ότι κάθε περιττός αριθμός σφαλμάτων που θα δημιουργηθεί στη μετάδοση θα προκαλέσει την αύξηση ή τη μείωση των ψηφίων 1 στην ακολουθία των δυαδικών ψηφίων και επομένως θα αλλάξει την τιμή του δυαδικού ψηφίου ισοτιμίας (από άρτια σε περιττή ή αντίστροφα). Αν όμως δημιουργηθεί άρτιος αριθμός σφαλμάτων, τότε δεν θα αλλάξει η τιμή του δυαδικού ψηφίου ισοτιμίας και επομένως δεν θα ανιχνευτούν αυτά τα σφάλματα.

Ακολουθία των 7+1 bits που στάλθηκε	Ακολουθία των 7+1 bits που έφτασε
1 0 1 1 0 0 1   0	1 0 0 1 0 0 1   1
1 1 1 0 1 0 1   1	1 0 1 1 1 0 1   1*
1 0 0 0 0 0 0   1	1 0 0 0 0 0 0   1
1 0 0 0 0 0 0   1	0 0 1 0 1 0 0   0
1 0 0 0 0 1 1   1	1 1 1 0 0 0 0   1*

Σχήμα 4.8 : Αδυναμία Ανίχνευσης Σφάλματος με την τεχνική του Δυαδικού Ψηφίου Ισοτιμίας.

Στο σχήμα 4.8 ο χαρακτήρας αποτελείται από 7 bits πληροφορίας και από 1 bit που παριστάνει το δυαδικό ψηφίο ισοτιμίας. Με τα υπογραμμισμένα δυαδικά

ψηφία ( ) δηλώνονται οι σειρές στις οποίες ανιχνεύτηκε το σφάλμα. Με τον αστερίσκο (\*) σημειώνονται οι εσφαλμένες σειρές που δεν ανιχνεύονται με την μέθοδο της ισοτιμίας. Όπως φαίνεται, η μέθοδος της ισοτιμίας δεν ανιχνεύει όλα τα σφάλματα. Δηλαδή δεν μπορεί να ανιχνεύσει άρτιο αριθμό σφαλμάτων, αφού το δυαδικό ψηφίο ισοτιμίας που στάλθηκε είναι ίδιο με το δυαδικό ψηφίο ισοτιμίας που έφτασε στον παραλήπτη.

Η μέθοδος που περιγράφηκε εφαρμόζεται ευρύτατα στην πράξη, επειδή χρησιμοποιεί απλούς αλγορίθμους δημιουργίας και ελέγχου ισοτιμίας και επομένως μη δαπανηρά κυκλώματα.

#### 4.3.5 Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού

Ένας από τους πιο κοινούς, και ένας από τους πιο ισχυρούς κώδικες ανίχνευσης σφαλμάτων, είναι ο Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC). Για ένα block ή μήνυμα, που αποτελείται από  $k$  bit, ο πομπός δημιουργεί

μια ακολουθία bit μήκους  $(n-k)$ , η οποία λέγεται ακολουθία πλαισίου (Frame check sequence, FCS), έτσι ώστε το πλαίσιο που προκύπτει, το οποίο αποτελείται από  $n$  bit, να διαιρείται ακριβώς με κάποιο προκαθορισμένο αριθμό, ο οποίος είναι γνωστός στον αποστολέα καθώς και στο δέκτη. Ο δέκτης διαιρεί το εισερχόμενο πλαίσιο με τον αριθμό αυτό και αν δεν υπάρξει υπόλοιπο, θεωρεί ότι δεν υπάρχει κανένα σφάλμα.

Η τεχνική αυτή είναι πιο αποτελεσματική στην ανίχνευση σφαλμάτων. Βασίζεται στη δυαδική διαίρεση. Ο πομπός προσαρμόζει μια ακολουθία από  $n-1$  '0' στο τέλος των δεδομένων και διαιρεί το σύνολο με ένα διαιρέτη (CRC Generator των  $n$  bits). Το υπόλοιπο (δηλαδή, το CRC των  $n-1$  bits) αντικαθιστά την ακολουθία των '0' στο τέλος των δεδομένων, ώστε η διαίρεση να είναι τέλεια. Ο δέκτης επαναλαμβάνει τη δυαδική διαίρεση και αν είναι τέλεια, δέχεται τα δεδομένα, αλλιώς απορρίπτει το frame. Ο γεννήτορας CRC μπορεί να αναπαρασταθεί και με μορφή πολυωνύμων, για συντομία και για τη μαθηματική τεκμηρίωση της τεχνικής. Με βάση τα πολυώνυμα, ο γεννήτορας CRC επιλέγεται έτσι ώστε να μην διαιρείται από το  $x$  και να διαιρείται από το  $(x + 1)$ . Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύει σε περιττού αριθμού bits, τα λάθη μήκους μικρότερου ή ίσου του βαθμού του πολυωνύμου, και με μεγάλη πιθανότητα τα λάθη καταίγισμού, μήκους μεγαλύτερου του βαθμού του πολυωνύμου. Τα πιο γνωστά πρωτόκολλα είναι τα: CRC-12, CRC-16, CRC-32 και CRC-ITU-T.

Η διαδικασία CRC μπορεί να αναπαρασταθεί και να υλοποιηθεί, ως ένα κύκλωμα διαίρεσης αποτελούμενο μόνο από πύλες XOR και από έναν

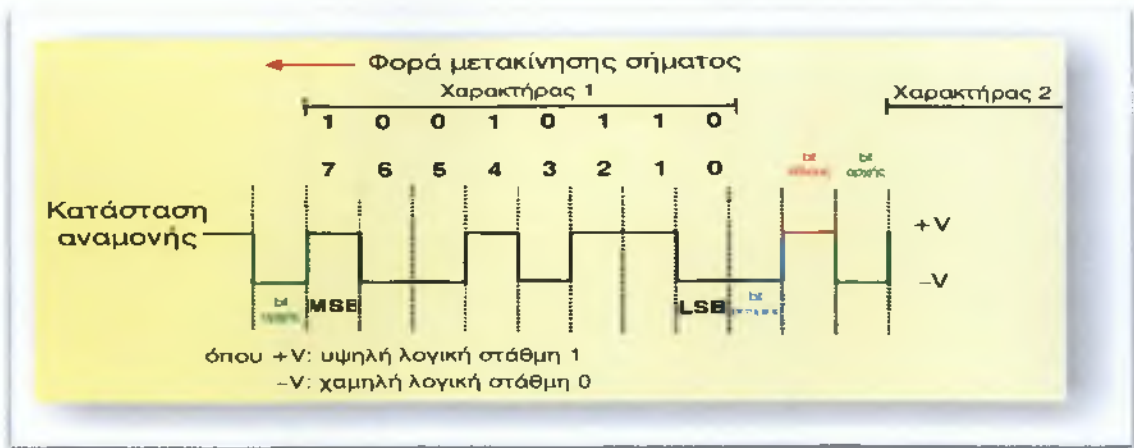


καταχωρητή ολίσθησης. Ο καταχωρητής ολίσθησης αποτελείται από μια σειρά στοιχείων αποθήκευσης του ενός bit. Κάθε στοιχείο έχει μια γραμμή εξόδου, η οποία δείχνει την τρέχουσα αποθηκευμένη τιμή, και μια γραμμή εισόδου. Σε διακριτές χρονικές στιγμές, που λέγονται χρόνοι ρολογιού, η τιμή στο στοιχείο αποθήκευσης αντικαθιστάται από την τιμή που υποδεικνύεται από την γραμμή εισόδου της. Τα στοιχεία αποθήκευσης του καταχωρητή χρονίζονται ταυτόχρονα, προκαλώντας ολίσθηση ενός bit, κατά μήκος ολόκληρου του καταχωρητή.

Για παράδειγμα το πλαίσιο 1 1 0 0 0 1 των 6 bit παριστάνει ένα πολυώνυμο 5ου βαθμού με 6 όρους, που έχουν συντελεστές τα δυαδικά ψηφία 1, 1, 0, 0, 0 και 1. Επομένως το πολυώνυμο θα είναι το :  $x^5 + x^4 + x^0$ . Οι πράξεις στα πολυώνυμα γίνονται modulo 2, σύμφωνα με τους κανόνες της άλγεβρας, που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν κρατούμενα στην πρόσθεση και δανεικά στην αφαίρεση. Αυτό φαίνεται και στις τέσσερις πράξεις που ακολουθούν.

$\begin{array}{r} 1001101 \\ + 11001010 \\ \hline 01010001 \end{array}$	$\begin{array}{r} 00110011 \\ + 11001101 \\ \hline 11111110 \end{array}$	$\begin{array}{r} 11110000 \\ - 10100110 \\ \hline 01010110 \end{array}$	$\begin{array}{r} 01010101 \\ - 10101111 \\ \hline 11111010 \end{array}$
---	--	--	--

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος του πολυωνυμικού κώδικα, ο πομπός και ο δέκτης πρέπει να συμφωνήσουν εκ των προτέρων στη μορφή του πολυωνύμου-γεννήτορα, δηλαδή του  $G(x)$ . Τόσο το πιο σημαντικό όσο και το λιγότερο σημαντικό δυαδικό ψηφίο του πολυωνύμου-γεννήτορα πρέπει να είναι το δυαδικό ψηφίο 1. Το πιο σημαντικό ψηφίο (MSB, Most Significant Bit) είναι το ψηφίο εκκίνησης της πληροφορίας στην γραμμή μετάδοσης, δηλαδή το 7ο ή το 8ο δυαδικό ψηφίο, σχήμα 4.9. Ακολούθως εμφανίζονται όλα τα άλλα δυαδικά ψηφία και τελευταίο το λιγότερο σημαντικό ψηφίο (LSB, Least Significant Bit), που είναι το 0 ή το 1ο δυαδικό ψηφίο.



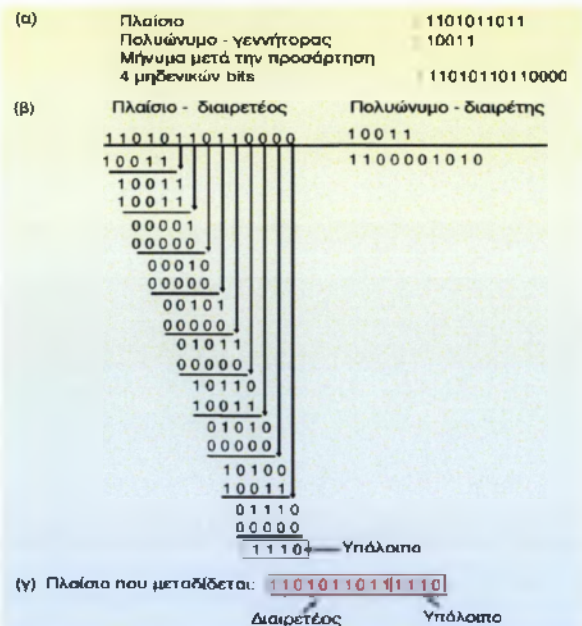
Σχήμα 4.9 : Μετάδοση των δυαδικών ψηφίων στη γραμμή επικοινωνίας.

Για να υπολογιστεί το άθροισμα ελέγχου μερικών πλαισίων των  $m$  bits, τα οποία αντιστοιχούν στο πολυώνυμο  $M(x)$ , πρέπει κάθε πλαίσιο να είναι μεγαλύτερο από το πολυώνυμο-γεννήτορα. Η βασική ιδέα είναι να προσαρτηθεί ένα

άθροισμα στο τέλος του πλαισίου, έτσι ώστε το πολυώνυμο που παριστάνεται από το πλαίσιο μαζί με το άθροισμα ελέγχου να διαιρείται ακριβώς με το  $G(x)$ .

Όταν ο δέκτης πάρει το πλαίσιο μαζί με το άθροισμα ελέγχου, το διαιρεί με το  $G(x)$  και αν υπάρχει υπόλοιπο, σημαίνει ότι υπήρξε σφάλμα μετάδοσης. Άρα αντί για πράξεις επάνω σε κώδικες-λέξεις είναι δυνατόν να γίνονται πράξεις στα αντίστοιχα πολυώνυμα που αυτές αντιπροσωπεύουν

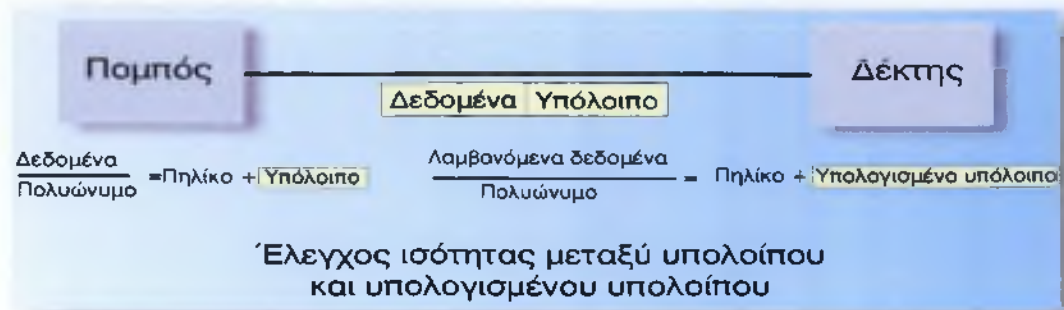
Πριν από τη μετάδοση η πληροφορία χωρίζεται σε πλαίσια, σχήμα 4.10α, κάθε πλαίσιο διαιρείται με ένα προκαθορισμένο



Σχήμα 4.10 : Διαίρεση Δυαδικών Αριθμών.

πολυώνυμο, σχήμα 4.10β, τόσο το πλαίσιο της πληροφορίας όσο και το υπόλοιπο της διαίρεσης αποστέλλονται στον αποδέκτη, σχήμα 4.10γ, ο αποδέκτης διαιρεί το πλαίσιο της πληροφορίας με το ίδιο προκαθορισμένο πολυώνυμο και εξετάζει αν το υπόλοιπο της διαίρεσης που υπολόγισε συμπίπτει

με το υπόλοιπο που του έστειλε ο πομπός. Η όλη διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 : Διαδικασία Ελέγχου Κυκλικού Κώδικα.

#### 4.3.6 Κώδικας BCH

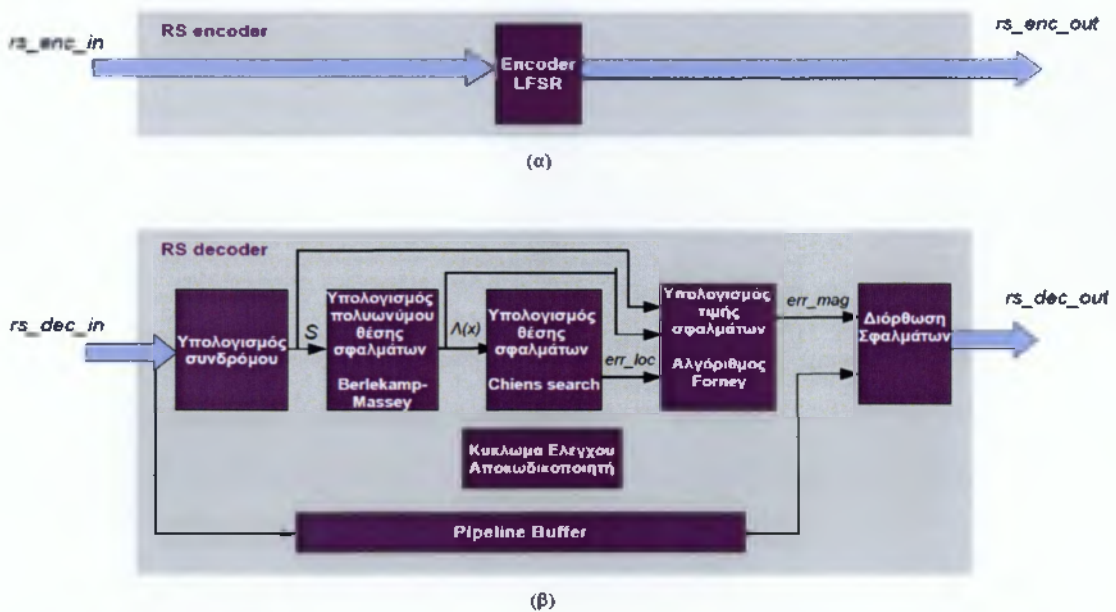
Το έτος 1967 εφευρέθηκε μία γενική μέθοδος αποκωδικοποίησης για τους κώδικες Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH). Πρόκειται για κυκλικούς κώδικες και παρέχουν στο σχεδιαστή ευρεία γκάμα επιλογών για το μέγεθος της λέξης κωδικοποίησης, τον ρυθμό του κώδικα και τη διορθωτική ικανότητα. Έχουν την καλύτερη δυνατή επίδοση, από όλες τις υπόλοιπες κλάσεις συμπαγών κωδίκων του ίδιου μεγέθους λέξης και ρυθμού κώδικα, όταν το μήκος λέξης τους είναι της τάξης των 100 ψηφίων. Η μέθοδος είναι αλγεβρική (algebraic decoding) και οριστικής απόφασης (hard decision). Χρησιμοποιώντας την αλγεβρική μέθοδο αποκωδικοποίησης, ο κώδικας BCH επιτυγχάνει  $P_b = 10^{-5}$  για  $E_b/N_o = 5.70$  dB με  $R_d \approx 0.5$  bits/σύμβολο. Το μέγεθος της επιτυχίας απορρέει αφενός από την ευκολία υλοποίησης του αποκωδικοποιητή και αφετέρου από τη μεγάλη ευρύτητα της τάξης των κωδίκων BCH. Πράγματι, η ίδια μέθοδος αποκωδικοποιεί εξίσου τόσο τους κώδικες Hamming όσο και τους κώδικες Reed-Solomon, οι οποίοι υπάγονται στους BCH.

#### 4.3.7 Κώδικας Reed – Solomon

Ο Reed-Solomon, όπως και όλοι οι κώδικες-μπλοκ επεξεργάζονται τα δεδομένα ως μονάδες πεπερασμένου μεγέθους (blocks). Στις τεχνικές των κωδίκων RS συμπεριλαμβάνονται πολλά στοιχεία ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (signal processing), όπως ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT), επαναληπτικοί αλγόριθμοι, ο καταχωρητής ολίσθησης με γραμμική ανάδραση (LFSR) κ.α. Ο γενικός τους συμβολισμός είναι ο  $RS(n,k,b)$ , όπου  $n$  το πλήθος των συμβόλων

(μήκος) της κωδικής λέξης που προκύπτει από την προσθήκη πλεονασμού στο αρχικό μήνυμα,  $k$  το πλήθος των συμβόλων του μηνύματος (καθαρή πληροφορία φορτίου) και  $b$  ο αριθμός των bits που συνθέτουν κάθε σύμβολο του κώδικα. Επιπλέον, με το πηλίκο  $r = k / n \leq 1$ , ορίζεται ο ρυθμός του κώδικα. Το μέγεθος αυτό αυξάνει το ρυθμό των δεδομένων στο κανάλι κατά  $1 / r$ , οπότε όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $r$ , τόσο μεγαλύτερη είναι η επιβάρυνση στο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης (εισάγονται περισσότερα σύμβολα κωδικοποίησης).

Η αρχιτεκτονική του Reed-Solomon κωδικοποιητή / αποκωδικοποιητή  $RS(n,k)$  φαίνεται στο δομικό διάγραμμα του σχήματος 4.12. Ο κωδικοποιητής φαίνεται στο σχήμα 4.12(α) και αντιστοιχεί σε μία υλοποίηση με LFSR. Ο αποκωδικοποιητής φαίνεται στο σχήμα 4.12(β) και αποτελείται από δομικά στοιχεία που αντιστοιχούν στα στάδια της αποκωδικοποίησης κωδικών Reed-Solomon και είναι i) υπολογισμός συνδρόμου, ii) υπολογισμός πολωνύμου θέσης σφαλμάτων, iii) υπολογισμός θέσης σφαλμάτων, iv) υπολογισμός τιμής σφαλμάτων, v) διόρθωση σφαλμάτων.



Σχήμα 4.12 : Δομικό Διάγραμμα (α) Κωδικοποιητή και (β) Αποκωδικοποιητή Reed-Solomon

Τόσο ο κωδικοποιητής, όσο και ο αποκωδικοποιητής λειτουργούν σειριακά σε επίπεδο συμβόλου. Στον κωδικοποιητή εισάγεται μια ακολουθία  $k$  συμβόλων δεδομένων και μεταδίδεται μία ακολουθία  $n$  συμβόλων ( $k$  σύμβολα δεδομένων +  $n-k$  σύμβολα ελέγχου ισότητας). Ο αποκωδικοποιητής δέχεται μπλοκ των  $n$  συμβόλων, εντοπίζει και διορθώνει πιθανά σφάλματα και εξάγει τα  $k$  σύμβολα δεδομένων του αρχικού μηνύματος.

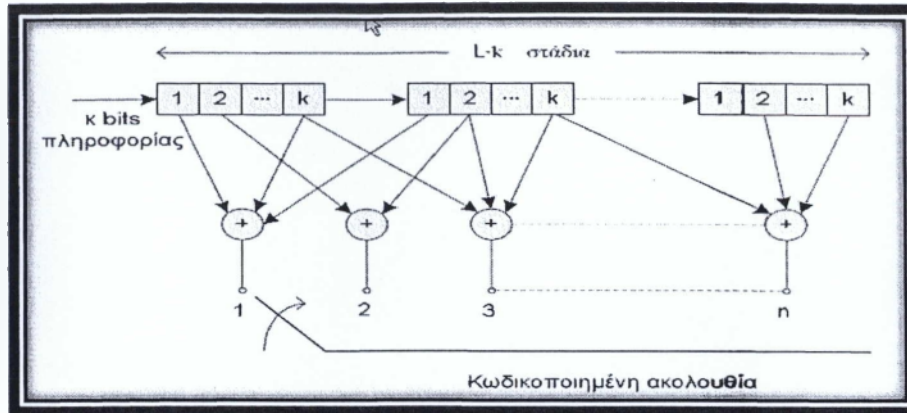
### 4.3.8 Κώδικες LDPC

Οι LDPC είναι κώδικες διόρθωσης λαθών και ανήκουν στους block κώδικες. Δε μπορούν να εξασφαλίσουν την τέλεια μετάδοση, μπορούν όμως, να εξαλείψουν κατά πολύ την πιθανότητα λάθους. Οι LDPC ήταν οι πρώτοι κώδικες διόρθωσης λαθών, οι οποίοι μπορούσαν να προσεγγίσουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, πολύ κοντά στο θεωρητικό μέγιστο, το όριο Shannon.

Το Μάρτιο του 2005, οι LDPC κώδικες έγιναν standard για το DVB-S2 (Digital Video Broadcasting). Συγκεκριμένα, το DVB-S2 χρησιμοποιεί σύστημα διόρθωσης λαθών, το οποίο βασίζεται στην αλληλουχία ενός Bose-Chaudhuri-Hocquenghem κώδικα με ένα LDPC κώδικα. Η απόδοση του συστήματος θα πρέπει να απέχει μέχρι 0.7 dB από το όριο Shannon. Επίσης, από το Δεκέμβριο του 2005, το πρότυπο επικοινωνίας WiMAX που ενσαρκώνεται μέσω του "Mobile WiMAX" βασίζεται στα πρότυπο IEEE 802.16e-2005-WirelessMAN που αποτελεί αναβάθμιση του παλαιότερου IEEE 802.16-2004. Σύμφωνα με αυτό το Mobile WiMAX χρησιμοποιεί κωδικοποίηση με κώδικες υψηλής απόδοσης όπως οι LDPC και οι turbo, ενισχύοντας έτσι την ασφάλεια και την απόδοση NLOS. Το WiMAX-Worldwide Interoperability for Microwave Access είναι μια τεχνολογία τηλεπικοινωνιών, που παρέχει ασύρματα δεδομένα με ποικίλους τρόπους, από συνδέσεις «σημείο-προς-σημείο», μέχρι την πλήρη πρόσβαση για κινητή τηλεφωνία.

## 4.4 Συνελικτικοί Κωδικες

Οι συνελικτικοί κώδικες αποτελούν μια κατηγορία κωδίκων, οι οποίοι επιτυγχάνουν μεγάλα κέρδη κωδικοποίησης και χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Το όνομά τους προέρχεται από τον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η κωδικοποίηση του σήματος πληροφορίας, αφού ο σχηματισμός τους μπορεί να θεωρηθεί ως η συνέλιξη των ψηφίων πληροφορίας, με την κρουστική απόκριση ενός καταχωρητή ολίσθησης. Οι συνελικτικοί κώδικες μεταχειρίζονται τα δεδομένα εισόδου σαν μια συνεχή ακολουθία δεδομένων και παράγουν μεγαλύτερες ομάδες στην έξοδό τους. Το βασικό χαρακτηριστικό των συνελικτικών κωδίκων είναι ότι, το μπλοκ των καινούργιων  $n$  δυαδικών ψηφίων δεν εξαρτάται μόνο από το τρέχον μπλοκ των  $k$  δυαδικών ψηφίων, αλλά και από προηγούμενα δυαδικά ψηφία. Η εξάρτηση αυτή μετατρέπει τον κωδικοποιητή σε μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων.



Σχήμα 4.13 : Συνελκτική Κωδικοποίηση

#### 4.4.1 Κωδικοποιημένη Διαμόρφωση TCM

Ο πρώτος διαμορφωτής/αποδιαμορφωτής MODEM για τηλεφωνικά κανάλια έγινε εμπορικά διαθέσιμος το έτος 1962 και επιτύγχανε ρυθμό μετάδοσης ίσο με 2400 bits/s. Στο διάστημα των επομένων 10 με 15 ετών, οι ρυθμοί μετάδοσης βελτιώθηκαν, φθάνοντας έως και τα 9600 bits/s, ρυθμός που μάλιστα θεωρήθηκε ως ο μέγιστος δυνατός. Ο δρόμος για τους υψηλότερους ρυθμούς άνοιξε αναπάντεχα στα τέλη της δεκαετίας του 1970, όταν εφευρέθηκε η κωδικοποιημένη κατά «trellis» διαμόρφωση (trellis-coded modulation – TCM) από τον Gottfried Ungerboeck. Χρησιμοποιώντας την κωδικοποιημένη διαμόρφωση TCM, οι ρυθμοί των MODEM αυξήθηκαν άμεσα στα 14400 bits/s και με τη σύνθετη κωδικοποιημένη διαμόρφωση, σύντομα έφθασαν στα 19200 bits/s. Εντούτοις, στους υψηλούς αυτούς ρυθμούς, τα MODEM λειτουργούν με επιτυχία σε ένα μικρό μόνο ποσοστό των τηλεφωνικών συνδέσεων, επειδή η χωρητικότητα των καναλιών φωνής κυμαίνεται κοντά στα 30000 bits/s. Η εφαρμογή της TCM είναι μνημείο ταχύτατης μεταφοράς από το πρωτότυπο εργαστηριακό σύστημα σε μία διεθνή σύσταση : αυτό που αρχικά θεωρείτο αδύνατο, δηλαδή η προσέγγιση της χωρητικότητας σε κανάλια φωνής, έγινε γεγονός εντός μίας δεκαετίας και μισής από την αρχική εφεύρεση της TCM.

Τα τηλεφωνικά κανάλια απέτελεσαν από νωρίς το ιδεώδες πεδίο πειραματισμού για μεθόδους ελέγχου σφαλμάτων υψηλής πολυπλοκότητας. Δεν πρέπει επομένως να μας εκπλήσσει ότι η κωδικοποίηση τηλεφωνικών καναλιών ήταν η ιστορικά πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή ελέγχου σφαλμάτων με κίνητρο την απόδοση φάσματος. Σήμερα, τόσο η κωδικοποιημένη διαμόρφωση κατά «trellis» (TCM) όσο και οι πιο συμβατικοί συνελκτικοί κώδικες, έχουν πληθώρα εφαρμογών. Μεταξύ άλλων, εφαρμόζονται στις δορυφορικές επικοινωνίες (GEO/LEO SATCOM), τις επίγειες και δορυφορικές κινητές επικοινωνίες, τις

προσωπικές υπηρεσίες επικοινωνίας (PCS) και τις υψίσυχνες (HF) τροποσφαιρικές επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων.

#### 4.4.2 Κώδικες Turbo

Εφαρμόζοντας την επαναληπτική αποκωδικοποίηση, οι κώδικες «turbo» κατόρθωσαν πρόσφατα να καλύψουν σχεδόν πλήρως το κενό, που χωρίζει την αιχμή της τεχνολογίας από τη χωρητικότητα του καναλιού, επιτυγχάνοντας ρυθμό σφαλμάτων  $P_b = 10^{-5}$  για τη θεαματικά χαμηλή τιμή  $E_b/N_o = 0.70$  dB με  $R_d = 0.5$  bits/σύμβολο. Μάλιστα, οι παραπάνω κώδικες προσεγγίζουν ακόμα περισσότερο τη χωρητικότητα του καναλιού, όταν το μήκος τους αυξάνεται. Οι κώδικες «turbo» εφευρέθηκαν το έτος 1993 από τους Γάλλους ερευνητές Claude Berrou και Alain Glavieux. Οι κώδικες αυτοί εμπεριέχουν εύκολη άλγεβρα, χρησιμοποιούν επαναληπτικούς και κατανεμημένους αλγόριθμους, εισάγουν την έννοια της τυχαιότητας στη διαδικασία της αποκωδικοποίησης και παρουσιάζουν εξαιρετες αποδόσεις που φτάνουν πολύ κοντά στο όριο του Shannon. Προσπαθώντας να εξηγήσουν την υπερβολικά καλή απόδοση των Turbo Codes, οι ερευνητές παρατήρησαν ότι υπήρχαν κοινά χαρακτηριστικά με τους LDPC κώδικες, και η ομοιότητα αυτή επανέφερε το ενδιαφέρον των ερευνητών για τους LDPC κώδικες. Πριν από την εφεύρεση των Turbo Codes, ουδείς γνώριζε πρακτικό τρόπο για την προσέγγιση της θεωρητικής επίδοσης, που προδιέγραψε ο Shannon. Χωρίς υπερβολή, η ιστορία της κωδικοποίησης ελέγχου σφαλμάτων μπορεί να χωριστεί στην εποχή πριν από τους κώδικες «turbo» και μετά από αυτούς.

### 4.5 Πρακτικά Συστήματα Ανίχνευσης Και Διόρθωσης Σφαλμάτων

#### 4.5.1 Τεχνολογία Οπτικής Μετάδοσης

Η τεχνολογία οπτικής πολύπλεξης με διαίρεση στο μήκος κύματος (WDM) απετέλεσε σταθμό στην εξέλιξη της οπτικής μετάδοσης, επειδή άνοιξε το δρόμο για την καλύτερη εκμετάλλευση του πρακτικά απεριόριστου εύρους ζώνης μίας οπτικής ίνας. Η επιτυχία της οφείλεται στην καθαρά οπτική ενίσχυση των οπτικών παλμών, η οποία διεξάγεται χωρίς οπτοηλεκτρονική μετατροπή και από κοινού για όλα τα μήκη κύματος. Αν δεν υπήρχε η παραπάνω δυνατότητα, τότε η αναγέννηση θα έπρεπε αφενός να διεξάγεται ανεξάρτητα για κάθε μήκος κύματος και αφετέρου να είναι πλήρης. Όμως, η πλήρης αναγέννηση ενός

οπτικού σήματος είναι μία ιδιαίτερα δαπανηρή λειτουργία. Επομένως, χωρίς την καθαρά οπτική ενίσχυση των οπτικών παλμών, το συνολικό κόστος ενός δικτύου WDM θα εκτινασσόταν κυριολεκτικά, αφού το ήδη υψηλό κόστος της πλήρους αναγέννησης θα πολλαπλασιαζόταν με το πλήθος των πολυπλεγμένων μηκών κύματος για κάθε κόμβο του δικτύου.

#### 4.5.2 Γενεές Συστημάτων FEC

- **1<sup>η</sup> Γενεά**

Τα παραπάνω φανερώνουν την καθοριστική σημασία της καθαρά οπτικής ενίσχυσης για την εμπορική επιτυχία των δικτύων WDM. Εντούτοις, η καθαρά οπτική ενίσχυση έχει το μειονέκτημα ότι μαζί με το ωφέλιμο σήμα ενισχύεται και ο εσωτερικός θόρυβος του ενισχυτή (ASE), ο οποίος προκαλεί σφάλματα τυχαίου χαρακτήρα. Αυτά τα σφάλματα ήταν η κυρίαρχη ατέλεια της οπτικής μετάδοσης στα πρώτα εμπορικά δίκτυα WDM (ρυθμοί μετάδοσης μέχρι 2.5 Gb/s) και για την αντιμετώπιση τους έγινε για πρώτη φορά συστηματική χρήση της κωδικοποίησης FEC. Το γεγονός αυτό οδήγησε σύντομα στην πρώτη διεθνή τυποποίηση σε σχέση με την εφαρμογή της κωδικοποίησης FEC σε οπτικά δίκτυα. Τα συστήματα, που σχεδιάστηκαν για την αντιμετώπιση του θορύβου των οπτικών ενισχυτών στα πρώτα δίκτυα WDM, αποτελούν την 1<sup>η</sup> γενεά συστημάτων FEC (1993-1996) και διακρίνονται από ένα κέρδος κωδικοποίησης της τάξεως των 6 dB.

- **2<sup>η</sup> Γενεά**

Καθώς όμως οι ρυθμοί μετάδοσης συνέχισαν να αυξάνονται, πρώτα στα 10 Gb/s και έπειτα στα 40 Gb/s, άλλες ατέλειες της οπτικής μετάδοσης κέρδισαν σε βαρύτητα, όπως τα μη-γραμμικά φαινόμενα (NL), η χρωματική διασπορά (CD) και η διασπορά τρόπου πόλωσης (PMD). Τα συστήματα κωδικοποίησης FEC 1<sup>ης</sup> γενεάς αποδείχτηκαν ανεπαρκή στην αντιμετώπιση αυτών των ατελειών. Κατά συνέπεια, σχεδιάστηκαν συστήματα με ισχυρότερη και πιο περίπλοκη κωδικοποίηση FEC, που αποτελούν τη 2<sup>η</sup> γενεά συστημάτων FEC (2000-2004) και διακρίνονται από ένα κέρδος κωδικοποίησης της τάξεως των 8dB. Από την άλλη όμως πλευρά, τα συστήματα FEC 2<sup>ης</sup> γενεάς συνέβαλαν στη σοβαρή κλιμάκωση του κόστους των οπτικών δικτύων, που επισκίασε την ώριμη πλέον τεχνολογία οπτικής μετάδοσης ρυθμού 10 Gb/s. Η κλιμάκωση του κόστους, που αναμένεται με το πέρασμα στην τεχνολογία οπτικής μετάδοσης ρυθμού 40 Gb/s, είναι ακόμα μεγαλύτερη. Άρα, η οικονομική βιωσιμότητα των νέων τεχνολογιών της οπτικής μετάδοσης τίθεται σε κίνδυνο, ιδιαίτερα κατά την ευαίσθητη φάση της διεξόδου στη σύγχρονη αγορά τηλεπικοινωνιών.



- **3<sup>η</sup> Γενεά**

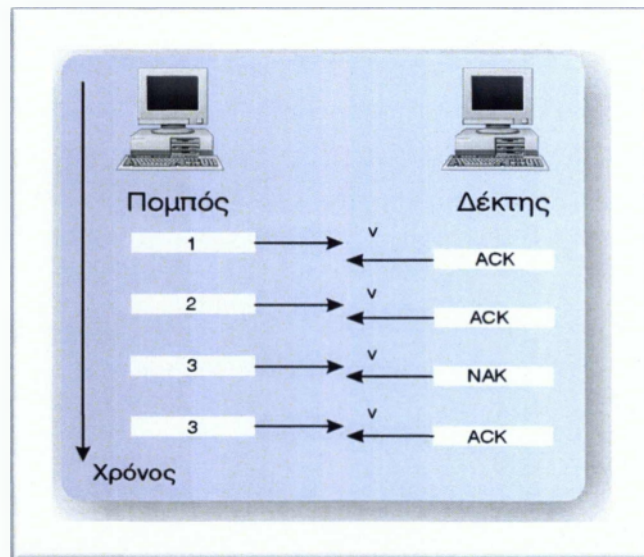
Η επίλυση του διαφαινόμενου οικονομικού αδιεξόδου επιτάσσει την κατά το δυνατό μείωση ή ακόμα και εξάλειψη των πλήρων αναγεννητών 3R, καθώς αυτοί εκπροσωπούν ένα σημαντικό μέρος του κόστους των οπτικών δικτύων. Όμως, η αντικατάσταση των πλήρων αναγεννητών 3R από κατά πολύ οικονομικότερους, καθαρά οπτικούς αναγεννητές 1R οδηγεί σε ένα νέο αδιέξοδο: οι αλλοιώσεις των οπτικών παλμών εξαιτίας των ατελειών της οπτικής μετάδοσης συσσωρεύονται σε μεγαλύτερα διαστήματα με αποτέλεσμα να αστοχούν ακόμα και τα συστήματα FEC 2<sup>ης</sup> γενεάς. Για αυτό το λόγο, συστήματα FEC 3<sup>ης</sup> γενεάς έχουν ήδη αρχίσει να διαδέχονται τους προκατόχους τους 2<sup>ης</sup> γενεάς (2004). Τα συστήματα FEC 3<sup>ης</sup> γενεάς διακρίνονται από κέρδη κωδικοποίησης άνω των 10 dB και καθιστούν οικονομικά προσιτή την εγκατάσταση οπτικών ζεύξεων υψηλής ταχύτητας (10Gb/s και άνω), τοποθετούμενα μόνο στα άκρα των ζεύξεων (end-to-end).

Μία μεγάλη ποικιλία συστημάτων FEC έχουν σήμερα μερίδιο στην αγορά των οπτικών τηλεπικοινωνιών. Διαφέρουν σε αρκετές απόψεις, όπως το ποσοστό του πλεονασμού, η πολυπλοκότητα υλοποίησης, το κέρδος-κωδικοποίησης, η καμπύλη βελτίωσης του ρυθμού σφαλμάτων (BER-performance), η ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων που εμφανίζονται σε ομοβροντίες, κ.λπ. Σημαντικό μέρος της σύγχρονης έρευνας εστιάζεται σε υβριδικά σχήματα, που συνδυάζουν την άμεση διόρθωση σφαλμάτων με προηγμένες κωδικοποιήσεις γραμμής (line-coding formats) και μεθόδους ισοστάθμισης σήματος (equalization).

## 4.6 Τεχνικές Ελέγχου Και Διόρθωσης Των Σφαλμάτων

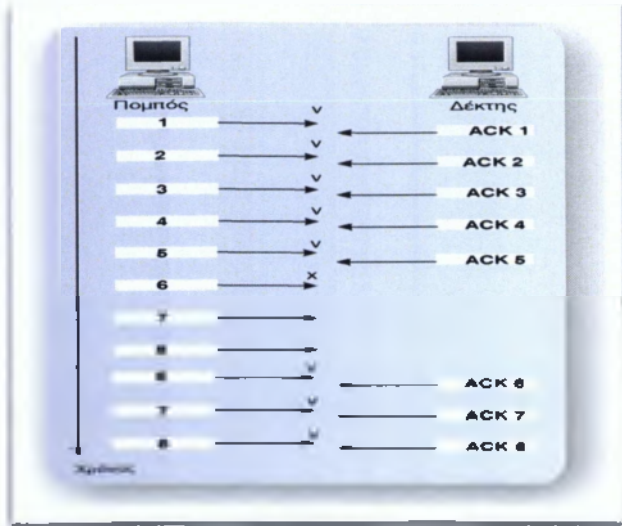
### 4.6.1 Αυτόματη Αίτηση Επανεκπομπής (Automatic Repeat Request, ARQ)

Στο σύστημα αυτό ο δέκτης εκτελεί ανίχνευση των σφαλμάτων και απλα ζητά από τον πομπό, επανεκπομπή των εσφαλμένων πακέτων δεδομένων. Η συγκεκριμένη τεχνική συμβάλλει στην αξιοπιστία της λαμβανόμενης πληροφορίας, αν και έχει αυξημένη πολυπλοκότητα, αφού απαιτεί την ύπαρξη ενός καναλιού ανάδρασης, το οποίο όμως δεν είναι πάντα διαθέσιμο, καθιστώντας την έτσι μη πρακτική για αρκετές εφαρμογές. Στην περίπτωση της διόρθωσης των σφαλμάτων με επαναμετάδοση, ο παραλήπτης αποστέλλει στον αποστολέα ένα ειδικό πλαίσιο ελέγχου, το οποίο περιέχει μία θετική επιβεβαίωση (ACK), εφόσον η μετάδοση υπήρξε επιτυχής, ή μια αρνητική επιβεβαίωση (NAK), εφόσον εντοπίστηκαν σφάλματα στα διακινούμενα δεδομένα. Η μέθοδος αυτή εμφανίζεται σε τρεις παραλλαγές οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις περιστάσεις. Στην πρώτη περίπτωση, **ARQ Παύσης και Αναμονής (ARQ Stop And Wait)**, για κάθε μεταδιδόμενο πακέτο,

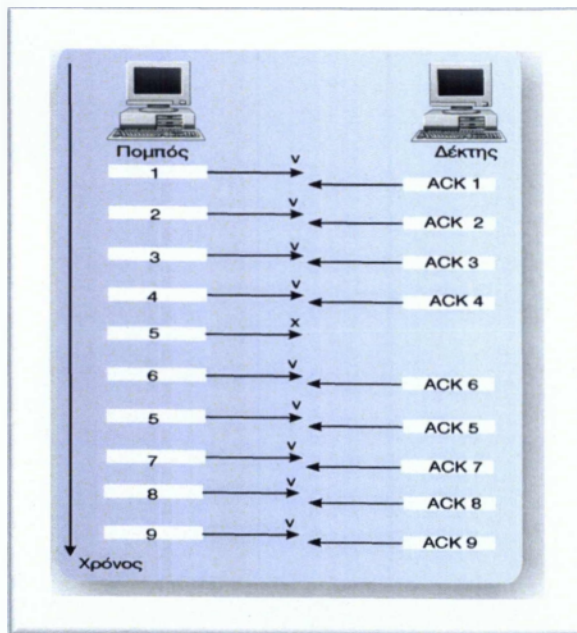


αποστέλλεται ένα πλαίσιο επιβεβαίωσης στον αποστολέα. Εάν η επιβεβαίωση αυτή είναι θετική, ο αποστολέας στέλνει το επόμενο πακέτο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, επαναμεταδίδει αυτό που έφτασε εσφαλμένο. Σχήμα 4.14.

Στην δεύτερη περίπτωση **ARQ** **Οπισθοδρόμησης Κατά N (ARQ Go-Back-N)**, ο αποστολέας δεν περιμένει την επιβεβαίωση για το κάθε πακέτο, αλλά αποστέλλει όλα τα πακέτα της πληροφορίας, το ένα μετά το άλλο. Εάν όμως λάβει αρνητική επιβεβαίωση για κάποιο από τα προηγούμενα πακέτα, τότε επαναμεταδίδει αυτό το πακέτο, και μαζί με αυτό, όλα τα πακέτα από εκεί και κάτω, ακόμα και αν αυτά έχουν μεταδοθεί σωστά. Σχήμα 4.15.



Σχήμα 4.15 : Τεχνική Οπισθοδρόμησης Κατά N.



Σχήμα 4.16 : Τεχνική Επιλεκτικής Απόρριψης.

Τέλος, ο αποστολέας αποστέλλει όλα τα πακέτα της πληροφορίας και αν λάβει αρνητική επιβεβαίωση για κάποιο από τα προηγούμενα πακέτα, ξαναστέλνει μόνο το εσφαλμένο πακέτο και όχι όλα τα υπόλοιπα. Αυτή είναι η τρίτη μέθοδος **ARQ** **Επιλεκτικής Απόρριψης (ARQ Selective Reject)**, όπου είναι μία παραλλαγή της δεύτερης περίπτωσης. Σχήμα 4.16.

#### 4.6.2 Πρωθymένη ή Πρόσθια Διόρθωση Λαθών (Forward Error Correction, FEC)

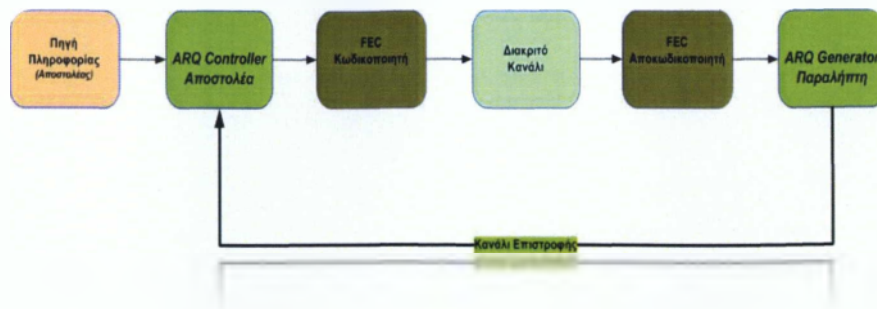
Εδώ ο δέκτης, σε περίπτωση ανίχνευσης σφάλματος, προβαίνει και στην διόρθωσή του σύμφωνα με τους κανόνες κωδικοποίησης. Η κωδικοποίηση FEC χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες και στην θεωρία πληροφορίας, ως ένα σύστημα ελέγχου λαθών (error correction code). Ο αποστολέας αποστέλλει πλεονάζουσα πληροφορία στο μήνυμά του, που επιτρέπει στο δέκτη να ανιχνεύσει και να διορθώσει λάθη, χωρίς να ζητήσει αναμετάδοση πακέτων.

Η αυτόματη διόρθωση σφαλμάτων μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Ο πλέον γνωστός κώδικας αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων είναι ο κώδικας Hamming, που διορθώνει απλά σφάλματα με την προσθήκη δυαδικών ψηφίων ελέγχου. Παράδειγμα χρησιμοποίησης της μεθόδου αυτής αποτελεί το σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται στους δίσκους CD-ROM, στους οποίους το φυσικό μέσο αποθήκευσης είναι πολύ ευαίσθητο σε σφάλματα. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε με την προοπτική να διορθώνεται αυτόματα ένας μεγάλος αριθμός σφαλμάτων, ώστε το σύστημα αποθήκευσης να έχει τον απαιτούμενο βαθμό αξιοπιστίας.

Η τεχνική αυτή, αν και δυσκολότερη στην εφαρμογή από την ARQ, το πλεονέκτημά της έγκειται στο ότι δεν απαιτείται αμφίδρομο κανάλι για την επικοινωνία προορισμού – πηγής και συνεπώς αποφεύγεται η αναμετάδοση πακέτων και η αντίστοιχη σπατάλη εύρους ζώνης. Βασική διαφορά των δύο τεχνικών αποτελεί η διόρθωση σφαλμάτων, διαδικασία που συμβαίνει μόνο στη FEC.

#### 4.6.3 Υβριδική FEC / ARQ Μέθοδος

Η κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους FEC και ARQ, κατέχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ιδανικό σενάριο θα ήταν τα πλεονεκτήματα των παραπάνω τεχνικών, επικερδώς να τα ενσωματώσουμε σε μια νέα μέθοδο, έτσι ώστε όταν έχουμε να κάνουμε με μεσαίες προς καλές συνθήκες καναλιού, να φροντίζει ο FEC κώδικας για τη χωρίς σφάλματα μετάδοση, ξεπερνώντας το μειονέκτημα που παρουσιάζει ο ARQ. Στην περίπτωση που οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι δεν είναι ιδανικές, οπότε θα υπάρχουν σφάλματα κατά την μετάδοση, θα φροντίζει η ARQ μέθοδος για τη συγκεκριμένη επαναμετάδοση.



Σχήμα 4.17 : Απεικόνιση ενός Υβριδικού FEC-ARQ Συστήματος.

#### 4.7 Έλεγχος Πολλαπλής Πρόσβασης

Η χρήση κοινόχρηστων μέσων μετάδοσης προϋποθέτει την υιοθέτηση κοινών κανόνων ελέγχου της χρήσης του μέσου. Το περιεχόμενο των κανόνων ελέγχου μπορεί να λάβει πολλές εναλλακτικές μορφές, αλλά για την περίπτωση των τοπικών δικτύων Η/Υ η συνήθης τεχνική βασίζεται, στην Πολλαπλή Πρόσβαση με Ανίχνευση Φέροντος (Carrier Sense Multiple Access) όπου ο χρήστης ανιχνεύει την ύπαρξη εκπομπών και περιμένει μέχρι το μέσο να είναι διαθέσιμο και στην Ανίχνευση Συγκρούσεων (Collision Detection), οι οποίες λαμβάνουν χώρα όταν πραγματοποιούνται ταυτόχρονες εκπομπές πάνω από το κοινόχρηστο μέσο, όπου όταν ο χρήστης ανιχνεύσει σύγκρουση, σταματά να εκπέμπει και επιχειρεί να μεταδώσει κάποια άλλη χρονική στιγμή.

Η αποτελεσματικότητα ενός κώδικα κρίνεται από τις εξής παραμέτρους:

- Γρήγορη κωδικοποίηση πληροφοριών.
- Εύκολη μετάδοση των κωδικοποιημένων μηνυμάτων.
- Γρήγορη αποκωδικοποίηση των ληφθέντων μηνυμάτων.
- Διόρθωση λαθών, λόγω «θορύβου».
- Μέγιστη μετάδοση πληροφοριών στη μονάδα του χρόνου.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Έντυπη βιβλιογραφία**

- [1] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", Bell System Technical Journal, 1948
- [2] R.W. Hamming, "Error detection and error correcting codes", Bell Syst. Technology Journal, 1950
- [3] David J. C. MacKay, Radford M. Neal, "Near Shannon Limit Performance of Low Density Parity Check Codes", July 12 1996
- [4] John G. Proakis, "Digital Communications", Fourth Edition
- [5] Branka Vucetic, Jinhong Yuan, "Turbo Codes Principles and Applications", Kluwer Academic Publishers
- [6] Bernard M. J. Leiner, "LDPC Codes – a brief Tutorial", April 8 2005
- [7] B. Sklar "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems-Part1:Characterization", IEEE Communications Magazine, July 1997
- [8] Lin Shu, Daniel J. Costello Jr, "Error Control Coding, Fundamentals and Applications", Prentice Hall 1983
- [9] G. Kabatiansky, E. Krouk, S. Semenov, "Error Correcting Coding and Security for Data Networks", Wiley
- [10] Leach and Malvino, "Ψηφιακά Ηλεκτρονικά", 5<sup>η</sup> Έκδοση, 2006, Εκδόσεις Τζιόλα
- [11] Andrew S. Tanenbaum, "Η Αρχιτεκτονική Των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών", 4<sup>η</sup> Αμερικανική Έκδοση, 2009, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [12] Douglas E. Comer, "Δίκτυα Και Διαδίκτυα Υπολογιστών", 4<sup>η</sup> Αμερικανική Έκδοση, 2008, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [13] Andrew S. Tanenbaum, "Δίκτυα Υπολογιστών", 4<sup>η</sup> Αμερικανική Έκδοση, 2008, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [14] Μπάρδης Γ., Νικολόπουλος Β., Μπράττος Ι., "Μελέτες – Εφαρμογές Και Υλοποίηση Δικτύων Η/Υ", 1<sup>η</sup> Έκδοση, 2007, Β. Γκιούρδας Εκδοτική

- [15] Ζορκάδης Β., “Θεωρία Πληροφορίας και Κωδικοποίηση”, Τόμος Α’, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2002
- [16] Γεώργιος Κων. Κοκκινάκης, “Εισαγωγή στις Επικοινωνίες”, 2004
- [17] Διπλωματική Εργασία του Φοιτητή Γεώργιου Αγγελόπουλου του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρων με Θέμα “Ανάλυση, σχεδιασμός και υλοποίηση κωδίκων διόρθωσης λαθών για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων”, 2009
- [18] Κ. Sam Shammungen “Ψηφιακά και Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας”, 1979, Αγγλόφωνη Έκδοση John Wiley & Sons, Εκδ. Γ. Πνευματικού

## Ηλεκτρονικές Πηγές

- [19] <http://www.ipet.gr/digitech2/index.php>
- [20] <http://el.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
- [21] <http://de.wikipedia.org/wiki/Turbo-Code>
- [22] <http://www.e-yliko.gr/htmls/diktya/senario4/theory/files/DiktyMetds1Kef2.pdf>
- [23] [http://venus.cs.teicrete.gr/magaz/25/02\\_tcpip-1.html](http://venus.cs.teicrete.gr/magaz/25/02_tcpip-1.html)
- [24] <http://eclass.teilam.gr/claroline/document/document.php>
- [25] <http://courses.softlab.ntua.gr/softdev/#lesson2811>